

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та системи

Бакалаврська дипломна робота на тему:

на тему: «Особливості функціонування віртуальних електростанцій в електричних мережах»

Виконав: студент 4 курсу, групи 2ЕЕ-206
Спеціальності 141 - «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
За ОП «Електроенергетика та електротехніка»
Пасло Н.О.

Керівник: к.т.н., ст.викл. каф. ЕСС
Сікорська О. В.

« » _____ 2024 p.

Рецензент К. Г. И., доц. канд. ЕРЕЕМ
(науковий ступінь, вч. звання, назва кафедри)
Васильков О. В.
« » 2024 р.

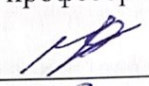
Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В.О.

«17» 66 2024p.

Вінниця – 2024 року

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В.О.


« 11 » 03 2024р.

ЗАВДАННЯ **НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Пасло Нікіті Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Особливості функціонування віртуальних електростанцій в електричних мережах

Керівник роботи к.т.н., ст. викладач Сікорська Олена Вікторівна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року №80

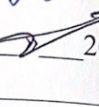
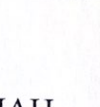
2. Термін подання студентом роботи 12 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи Експериментальна модель віртуальної електростанції з розділенням тестової системи 68-шин потужністю в 100МВт і частотою 60Гц в Новій Англії на чотири ММ.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Теоретичні аспекти віртуальних електростанцій. 2. Аналіз ВЕС в ЕМ та на ринку електроенергії 3. Моделювання ВЕС в експериментальній системі 4. Охорона праці. Висновки. Список використання джерел. Додатки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Титулка. 2. Теоретичні аспекти віртуальних електростанцій. 3. Аналіз ВЕС в ЕМ та на ринку електроенергії. 4. Моделювання ВЕС в експериментальній системі. 5. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання видав	
		«_»_2024	«_»_2024
Спеціальна частина	Керівник роботи Сікорська О. В., к.т.н., ст.викладач кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О.В. д. пед. н., професор, завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання « 16» січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	
		початок	кінець
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	15.02.24
2	Теоретичні аспекти віртуальних електростанцій	16.02.24	15.03.24
3	Аналіз ВЕС в ЕМ та на ринку електроенергії	16.03.24	10.04.24
4	Моделювання ВЕС в експериментальній системі	11.04.24	11.05.24
5	Охорона праці	20.05.24	24.05.24
6	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	25.05.24	04.06.24
7	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	05.06.24	07.06.24
8	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	8.06.24	10.06.24
9	Рецензування БДР	11.06.24	12.06.24
10	Захист БДР	За графіком	

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Пасло Н.О.

(прізвище та ініціали)

Сікорська О.В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК 131

Пасло Нікіта Олександрович «Особливості функціонування віртуальних електростанцій в електромережах». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2024. – с. Бібліогр.: 35. Рис. : 16. Табл. :10.

У роботі розглядаються віртуальні електростанції (ВЕС) в електромережах, зосереджуючись на їхній здатності оптимізувати розподілені джерела енергії, такі як сонячні панелі та акумулятори. Використовуючи такі технології, як IoT та штучний інтелект, ВЕС підвищують надійність мережі та підтримують інтеграцію відновлюваної енергетики. У дослідженні підкреслюється, як ВЕС можуть призвести до створення більш стійкої та надійної енергетичної системи, пропонуючи інформацію для політиків та зацікавлених сторін галузі щодо подальшого впровадження ВЕС.

Ключові слова: віртуальні електростанції, розподілені джерела енергії, електроенергія, відновлювальні джерела енергії, ринок електроенергії, мікромережі.

ABSTRACT

UDC 131

Paslo Nikita O. "Features of the functioning of virtual power plants in power grids".
Bachelor's thesis - Vinnytsia: VNTU. - 2024. - p. Bibliography: 35. Figures: 16.
Table: 10.

The article examines virtual power plants (VPPs) in power grids, focusing on their ability to optimize distributed energy sources such as solar panels and batteries. By utilizing technologies such as IoT and artificial intelligence, wind farms improve grid reliability and support the integration of renewable energy. The study emphasizes how VPPs can lead to a more resilient and reliable energy system, offering insights for policy makers and industry stakeholders to further implement VPPs.

Keywords: virtual power plants, distributed energy sources, electricity, renewable energy sources, electricity market, microgrids.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. Теоретичні аспекти віртуальних електростанцій	10
1.1 Поняття ВЕС	10
1.2 Структура ВЕС	13
1.2.1 Структура та функціонування КВЕС	14
1.2.2 Структура та функціонування ТВЕС	16
1.3 Внутрішній контроль ВЕС	17
1.3.1 Централізований метод управління	18
1.3.2 Розподілений метод управління	19
1.3.3 Комплексний метод управління	21
1.4 Різниця між ВЕС та ММ.....	24
1.5 Переваги створення ВЕС.....	29
2. Аналіз ВЕС в ЕМ та на ринку електроенергії.....	33
2.1 Структура ринку електроенергії.....	33
2.2 Ринок на добу наперед.....	34
2.2.1 Центральна диспетчерська НСО	34
2.2.2 Конкурсні торги.....	36
2.2.3 Двосторонні переговори	38
2.3 Ринок балансування в реальному часі	39
2.4 Спільний ринок	41
2.5 Інвестиції в ВЕС	42
3. Моделювання ВЕС в експериментальній системі	46
3.1 Однорангова торгівля енергією як допоміжна послуга для розподіленої оптимізації.....	46
3.2 ВЕС як джерело допоміжних послуг з регулювання частоти на стороні споживання	50
3.3 ВЕС, що складаються з взаємопов'язаних мікромереж для допоміжних послуг з регулювання частоти на основі попиту	51
3.3.1 Планування на день наперед.....	53

3.3.2 Регулювання потужності в реальному часі	54
4 Охорона праці	58
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації обладнання	58
4.1.1 Вимоги з безпечної організації робочих місць	58
4.1.2 Електробезпека	61
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	63
4.2.1 Мікроклімат	63
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	64
4.2.3 Виробниче освітлення	64
4.2.4 Виробничий шум.....	65
4.3 Пожежна безпека.....	66
Висновки	70
Список використаних джерел	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВЕС – віртуальна електростанція;
ММ – мікромережі;
ТЕЦ – теплоелектроцентралі;
АРМ – активні розподільчі мережі;
РДЕ – розподілені джерела енергії;
НСО – незалежний системний оператор;
ВДЕ – відновлювальні джерела енергії;
КВЕС – комерційні віртуальні електростанції;
ТВЕС – технічні віртуальні електростанції;
ЕМ – електричні мережі;
ГЕС – гідроелектростанції;
РП – реагування на попит;
СЕС – сонячні електростанції;
ПГЕ – підключений гібридний автомобіль;
ОСР – оператор системи розподілу;
РДН – ринок на добу наперед;
РБРЧ – ринок балансування в реальному часі;
РДП – ринок допоміжних послуг;
ESS – установка зберігання енергії;
РГ – розподілені генератори.

ВСТУП

Стрімка еволюція енергетичних систем в останні роки призвела до появи інноваційних концепцій, покликаних підвищити ефективність, надійність і стійкість електромереж. Однією з таких трансформаційних концепцій є віртуальна електростанція (ВЕС). Віртуальна електростанція об'єднує потужності різних децентралізованих енергоресурсів, таких як сонячні панелі, вітрогенератори та акумуляторні системи, для роботи в якості єдиної електростанції. Така інтеграція дозволяє оптимізувати виробництво, розподіл і споживання енергії, відіграючи таким чином вирішальну роль у сучасному управлінні енергією.

Традиційна модель енергосистеми, яка значною мірою покладається на централізоване виробництво електроенергії, стикається з численними проблемами, включаючи застарілу інфраструктуру, зростаючий попит і нагальну потребу в скороченні викидів вуглецю. На противагу цьому, ВЕС пропонують гнучкий і адаптивний підхід до вирішення цих проблем, використовуючи передові інформаційно-комунікаційні технології. Завдяки складним алгоритмам та аналізу даних у режимі реального часу ВЕС можуть динамічно балансувати попит і пропозицію, сприяти інтеграції відновлюваних джерел енергії та підвищувати стабільність і стійкість енергосистеми.

У цій роботі досліджуються особливості функціонування віртуальних електростанцій в енергосистемах з метою забезпечення комплексного розуміння механізмів їх роботи, переваг та потенційних викликів. Основна увага приділяється технологічній архітектурі ВЕС, їх ролі в управлінні мережею, економічним наслідкам та регуляторним аспектам. Вивчаючи конкретні приклади та останні досягнення в цій галузі, це дослідження має на меті надати цінну інформацію про розгортання та оптимізацію ВЕС, що в кінцевому підсумку сприятиме переходу до більш сталого та стійкого енергетичного майбутнього.

1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВІРТУАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1 Поняття ВЕС

Концепція віртуальних електростанцій (ВЕС) виникла на основі концепції віртуальної комунальної послуги, запропонованої Авербухом та Престоном у 1997 році. Визначена як гнучка співпраця між комунальними підприємствами, вона дозволяє окремим учасникам надавати високоефективні енергетичні послуги споживачам шляхом віртуального спільного використання їхньої приватної власності, що не тільки підвищує індивідуальну ефективність використання, але й дозволяє уникнути надлишкового виробництва. Розширюючи початкове визначення віртуальної корисності, концепція ВЕС фокусується на віртуальній агрегації розподілених джерел енергії (РДЕ), які в основному залежать від математичної комбінації різних кривих вартості енергоресурсів. Як показано на рис. 1.1, ВЕС змінюють традиційну топологію енергосистеми, встановлюючи інформаційний зв'язок між змінними енергоресурсами та координуючи профілі їхньої генерації.

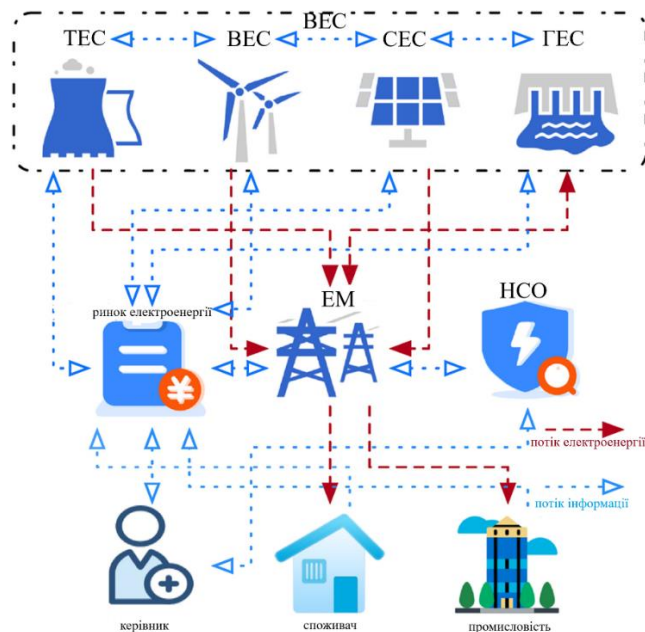


Рисунок 1.1 – Структура енергосистеми з ВЕС

Хоча з моменту першої пропозиції ВЕС минули десятки років, досі не існує загальноприйнятого визначення ВЕС. Наприклад, ВЕС визначається як енергетичний інтернет-хаб, який спирається на технологію дистанційного керування та централізовану оптимізацію. На противагу цьому, концепція ВДЕ обмежується вільною коаліцією між однотипними енергетичними ресурсами, такими як мікромережі (ММ), теплоелектроцентралі (ТЕЦ) або активні розподільчі мережі (АРМ), а також гібридна енергетична система. Дійсно, наведені вище припущення щодо ВЕС є окремо перевіреними ефективними та обґрунтованими, але визначення ВЕС заслуговує на подальше розширення. Таким чином, ключові характеристики ВЕС можна звести до трьох основних:

- Збір та обробка інформації: майже в кожній імітаційній моделі ВЕС обмін інформацією та її збір є основою функціонування та оптимізації ВЕС. Хоча модель управління ВЕС може бути як централізованою, так і розподіленою, інформаційний центр створюється у всіх без винятку випадках. Таким чином, ВЕС може збирати інформацію про свої внутрішні енергетичні ресурси в режимі реального часу та ефективно обробляти її, щоб отримати корисні підказки для загальної оптимізації. Для своєчасного отримання та аналізу величезних обсягів інформації в режимі реального часу необхідна достатня пропускна здатність каналів зв'язку та високошвидкісний алгоритм обробки.
- Ігнорування географічного впливу: як найбільш характерна риса ВЕС, дефект географічного розподілу РДЕ випадає з поля зору при управлінні та оптимізації ВЕС, що дозволяє ВЕС інтегрувати РДЕ поза обмеженнями загальної структури електромережі. Однак, обмеження на перетоки потужності залишаються в силі, а профіль генерації ВЕС не повинен порушувати правила безпеки незалежного системного оператора (НСО).
- Динамічна експлуатація та оптимізація: Інтеграція РДЕ за допомогою ВЕС є динамічним профілем, а не статичною математичною комбінацією, що означає, що стратегія оптимізації, запропонована ВЕС, не лише

забезпечує найкращий економічний графік роботи, але й враховує стан енергосистеми в реальному часі. Для досягнення рівноваги між прибутком і безпекою, динамічна процедура прийняття рішень ВЕС значною мірою залежить від збору та обробки інформації в режимі реального часу.

Окрім подібності у визначеннях та характеристиках, енергетичні ресурси, інтегровані за допомогою ВЕС, можна також класифікувати на два основні типи та сім підкласів наступним чином:

а) ВДЕ:

ВЕС: Вітряні електростанції потужністю в сотні МВт зазвичай підключаються безпосередньо до основної електромережі, що знаходиться поза межами контролю віртуальної електростанції. Однак, ВЕС малої потужності, розміщені на стороні користувача, підходять для інтеграції та експлуатації віртуальної електростанції.

Сонячні електростанції: Централізовані сонячні електростанції зазвичай керуються безпосередньо НСО, тому сонячні панелі малої потужності, встановлені на дахах будівель, є ідеальними компонентами ВЕС.

ГЕС: Великі гідроелектростанції, підключаються до електромережі напряму, щоб задовольнити базовий попит центру навантаження. Однак, малопотужні насосні ГЕС навколо центру попиту можуть бути інтегровані ВЕС як конкурентні учасники перерозподілу навантаження на основі принципу керування навантаженням та згладжуванням пікових навантажень .

б) Традиційні енергоресурси:

ТЕЦ: З популяризацією побутової системи опалення, ТЕЦ складають основну частину споживання комунальних послуг взимку. Щоб з'ясувати рівновагу між попитом на тепло та споживанням комунальних послуг, оптимізоване управління ТЕЦ заслуговує на подальше дослідження в рамках ВЕС.

Системи акумулювання енергії (CAE) : Інтеграція CAE у ВЕС, безсумнівно, може підвищити надійність та якість електропостачання ВЕС, що може нейтралізувати дисбаланс потужності непостійних ВДЕ.

Гібридний електромобіль, що підключається до електромережі (ПГЕ): Популяризація ПГЕ у громадському транспорті підвищує важливість планування заряджання та розряджання електромобілів ПГЕ. В іншому випадку, непередбачувані дії з заряджання та розряджання можуть призвести до непередбачуваних коливань навантаження. Таким чином, завдяки належному управлінню ВЕС, заряджання ПГЕ може бути розумно розподілене, а адекватний попит на заряджання може також задовольнити попит долини в нічний період.

Реагування на попит (РП): Відоме як управління попитом (УП), РП фокусується на оптимізаційному управлінні гнучким попитом на електроенергію у відповідь на стимулювання цін на енергоносії. За допомогою управління ВЕС зменшення попиту на електроенергію може бути еквівалентним регулюванню потужності розподіленого генератора (РГ), який може бути поєднаний з ВДЕ як ефективна резервна послуга для нейтралізації його нестабільності.

Перш за все, для того, щоб ефективно поєднувати різні види РДЕ, необхідно створити базову структуру ВЕС, яка описана в наступному підрозділі.

1.2 Структура ВЕС

Як зазначалося вище, ВЕС має на меті об'єднати різні види РДЕ в скоординовану операційну структуру, яка могла б конкурувати на ринку електроенергії. Для досягнення цієї мети необхідно побудувати базову структуру ВЕС. Виходячи з характеристик інтегрованих енергоресурсів та ключових особливостей функціонування, описаних вище, структуру ВЕС можна розділити по вертикалі на дві основні частини, а саме: комерційну ВЕС (КВЕС) та технічну ВЕС (ТВЕС). Виходячи з їх різного призначення, ВЕС класифікуються на основі їх внутрішніх та зовнішніх особливостей, як показано на рис. 1.2.

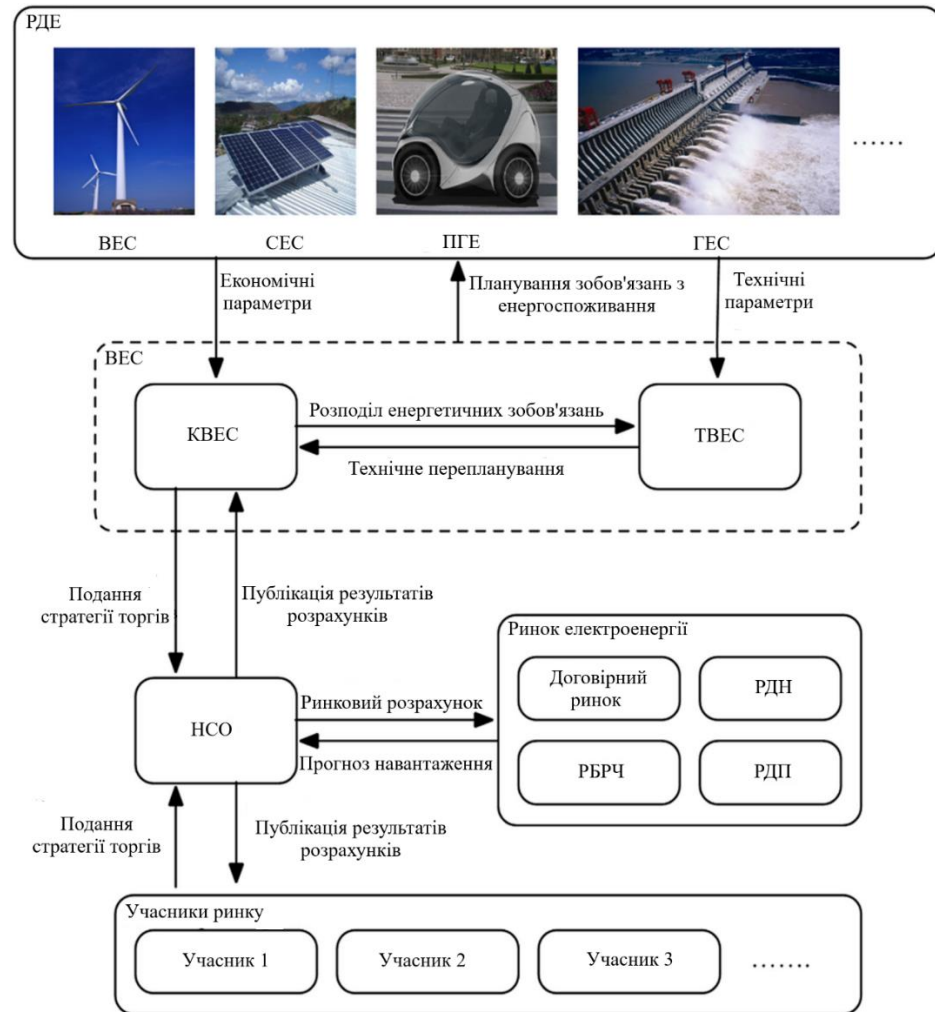


Рисунок 1.2 – Базова структура ВЕС

Розділивши структуру ВЕС на дві основні частини, можна підсумувати мету та детальну структуру кожного блоку окремо.

1.2.1 Структура та функціонування КВЕС

Як показано на рис. 1.2, основна увага КВЕС приділяється економічному прибутку, отриманому на ринку електроенергії. Як для комерсанта, який прагне максимізації прибутку, рамки КВЕС можуть бути виражені у вигляді гнучкого профілю інвестицій у РДЕ, який не тільки вимагає точної оцінки граничної вартості внутрішніх енергоресурсів, але й залежить від раціональної оцінки стану зовнішнього ринку. Згідно з Розділом 1.1, граничною вартістю ВДЕ можна знехтувати порівняно з не-ВДЕ, що гарантує попереднє

планування ВДЕ в диспетчерському графіку ВЕС. Однак, потенційний ризик, пов'язаний з нестабільністю ВДЕ, може поставити під загрозу очікуваний економічний прибуток, що підкреслює важливість надійного прогнозу виробництва електроенергії для інтегрованих ВДЕ протягом диспетчерського циклу. Крім того, раціональна оцінка попиту на навантаження та стратегій участі в торгах інших учасників може слугувати основою для оптимізації стратегії участі KBES в торгах на ринку електроенергії. До цього часу численні дослідження були зосереджені на точності прогнозування виробництва електроенергії з ВДЕ та попиту на неї. Оскільки ця робота зосереджена на структурі та роботі ВЕС, методи прогнозування ВДЕ та відповідні методи вдосконалення виходять за рамки цієї теми. Як висновок, процедуру роботи KBES можна узагальнити наступним чином:

1. На основі належної оцінки інтегрованих економічних параметрів ВДЕ та не-ВДЕ (наприклад, кривої витрат, прогнозного обсягу виробництва), KBES визначає пріоритетний порядок використання своїх внутрішніх енергетичних ресурсів.
2. KBES збирає та обробляє інформацію про ринок електроенергії, яка включає не лише попит на електроенергію, але й історичну інформацію про стратегію торгів інших учасників.
3. На основі зібраної інформації KBES формує оптимізований профіль генерації з економічно обґрунтованим графіком для кожного інтегрованого енергоресурсу. Після цього ВЕС подає стратегію участі в торгах до НСО як унікальний суб'єкт господарювання.
4. НСО збирає інформацію про торги та проводить ринковий кліринг/централізоване диспетчерське управління. Залежно від результатів ринкового клірингу [наприклад, акцептованих заявок та ринкової розрахункової ціни (РРЦ)], KBES оптимізує внутрішній профіль планування.
5. Остаточний профіль генерації подається на перевірку безпеки енергосистеми. Якщо НСО виявляє будь-яке технічне порушення, KBES

має переглянути графік генерації і знову пройти кроки (3)-(5), доки не будуть дотримані всі правила безпеки.

6. Наприкінці диспетчерського циклу KBES розраховується з НСО та здійснює внутрішній перерозподіл прибутку на основі експлуатаційних показників кожного ресурсу та штрафних санкцій за відхилення, розрахованих ТВЕС.

Дотримуючись вищезазначених процедур, KBES вдається інтегрувати різні види РДЕ в скоординовану структуру для участі у всіх формах ринку електроенергії, що не тільки зменшує труднощі управління РДЕ, але й покращує використання ВДЕ на стороні споживача.

1.2.2 Структура та функціонування ТВЕС

Як інша важлива частина ВЕС, ТВЕС має на меті забезпечення безпечної експлуатації ВЕС та надання даних про стан роботи РДЕ у реальному часі. На відміну від KBES, метою якої є отримання прибутку, ТВЕС поділяє відповідальність НСО, яка, в основному, зосереджена на виконанні графіків виробництва електроенергії та балансу потужності. Процедура роботи ТВЕС може бути виражена наступним чином:

1. ТВЕС збирає технічні параметри інтегрованих РДЕ, які містять статичну технічну інформацію (наприклад, межа швидкості, межа потужності тощо) та динамічні експлуатаційні дані (наприклад, несправності, робочий стан, вихідна потужність, стан накопичувачів електроенергії тощо).
2. ТВЕС подає загальні технічні параметри до НСО та отримує від НСО відповідні правила безпеки системи (наприклад, топологія енергосистеми, обмеження перетоків потужності).
3. На основі економічного профілю, визначеного KBES, та правил безпеки системи, наданих НСО, ТВЕС проводить перевірку безпеки ВЕС та інформує KBES про необхідні модифікації.
4. Як тільки НСО виявляє порушення безпеки, ТВЕС вчасно реагує, щоб забезпечити вимогу безпеки, і змінює графік відпуску потужності до тих

пiр, поки всi правила безпеки не будуть виконанi.

5. Пiд час виконання зобов'язань ВЕС з видачi потужностi, ТВЕС контролює в реальному часi стан роботи всiх РДЕ для пiдтримання внутрiшнього балансу потужностi, який може бути досягнутий шляхом змiни потужностi керованих РДЕ вiдповiдно до вiдхилення потужностi ВДЕ.

6. Наприкинцi диспетчерського циклу ТВЕС розраховує точну потужнiсть кожної РДЕ та передає встановлену потужнiсть до KBES для розрахунку та перерозподiлу прибутку.

Як висновок, виконання обов'язкiв ТВЕС значною мiрою залежить вiд спiвпрацi технологiй зв'язку та технологiй ситуацiйної обiзнаностi. Крiм того, важливу роль у перевiрцi безпеки ТВЕС вiдiграє структура електромережi, яка безпосередньо обмежує потiк потужностi в кожнiй лiнiї електропередачi. Щоб задовольнити обмеження перетоку потужностi, буде проводитися внутрiшнiй перерозподiл зобов'язань з передачi потужностi за допомогою спiвпрацi мiж KBES та ТВЕС. Тiльки тiсна спiвпраця мiж цими двома складовими ВЕС може забезпечити ефективну та безперебiйну роботу ВЕС як єдиного цiлого.

1.3 Внутрiшнiй контроль ВЕС

На основi концепцiї ВЕС, належний метод внутрiшнього енергетичного управлiння формує основу економiчної дiяльностi ВЕС. Для того, щоб бути репрезентативним учасником ринку електроенергiї, iнтеграцiя РДЕ та вiдповiднi методи управлiння привертають увагу численних наукових дослiджень. З точки зору моделей контролю ВЕС, методи внутрiшнього управлiння можна роздiлити на три групи: централiзоване управлiння, розподiлене управлiння та комплексне. Характеристики кожного методу управлiння окремо представленi наступним чином.

1.3.1 Централізований метод управління

Порівняно з іншими методами, метод централізованого управління надає ВЕС абсолютну владу над управлінням. ВЕС створює центр координації управління, який гарантує собі абсолютні повноваження щодо диспетчеризації всіх інтегрованих РДЕ. Як показано на рис. 1,2, структура централізованого управління значною мірою залежить від мережі зв'язку, яка об'єднує як внутрішню, так і зовнішню інформацію для прийняття рішень ВЕС. Крім того, завдяки ефективному каналу зв'язку, графік роботи ВЕС може бути вчасно переданий на генеруючий термінал. Таким чином, метод централізованого управління посилює інтеграцію РДЕ та перетворює початкові нескоординовані РДЕ малої потужності у великомасштабний генеруючий альянс. Завдяки централізованій координації великих генеруючих потужностей, ВЕС розглядається як ціноутворювач на ринку електроенергії через її величезний вплив на процедуру ринкового регулювання. Тим не менш, ВЕС визначається як ціноутворювач через її низьку потужність та обмежений вплив. Хоча ринкова роль ВЕС може змінюватися залежно від інтегрованих ресурсів, поступово визнається зростаючий вплив ВЕС на роботу енергосистеми та ринку електроенергії.

Окрім ринкової конкурентоспроможності, яку приносить зростаюча потужність ВЕС, продовжує зростати розрахункове навантаження централізованого методу управління. Оскільки всі профілі роботи РДЕ визначаються ВЕС при централізованому управлінні, під час процедури оптимізації необхідно враховувати численні змінні, що посилює складність розрахунків для центру управління ВЕС. Метод внутрішнього централізованого управління ВЕС зазвичай є моделлю змішаного цілочисельного нелінійного програмування (МЗЦНП), яка може бути математично перетворена в змішане цілочисельне лінійне програмування (ЗЦЛП) за допомогою умов оптимальності Каруша-Куна-Таккера (ККТ) або дуалістичного перетворення. Після цього дворівневу оптимізаційну задачу між ВЕС та НСО можна перетворити на однорівневу, а для її розв'язання

застосувати програмний пакет CPLEX або Python. Що стосується аналізу ризиків, то вводиться стохастичне програмування із заздалегідь визначеним розподілом ймовірностей невизначеності. Тим часом, задача централізованого управління ВЕС також формулюється в ЗЦЛП, де застосовується метод стійкої оптимізації. Порівняно зі звичайним стохастичним програмуванням, надійна оптимізація враховує найгірший сценарій, що підвищує достовірність результатів оптимізації. Крім математичних рішень, згаданих вище, розглядається проблема нелінійної оптимізації, коли існують нелінійні обмеження. Задача централізованого управління ВЕС визначається як задача одиничних зобов'язань (ОЗ), де міжчасові обмеження забороняють застосування математичного методу, тому для її розв'язання застосовуються евристичні алгоритми, такі як генетичний алгоритм (ГА) або оптимізація рою частинок (ОРЧ). Вводячи обмеження на топологію сітки, задача ОЗ перетворюється на задачу з обмеженими зобов'язаннями щодо безпеки (ОЗЩБ), де до оригінальних евристичних алгоритмів застосовуються модифікації, спрямовані на прискорення ефективності обчислень.

Як висновок, в методі централізованого управління ВЕС відповідає за оптимізоване планування внутрішніх енергоресурсів, де достатня пропускну здатність зв'язку є основою для збору інформації та прийняття рішень. Обмежена ефективністю обчислень, централізоване управління ВЕС обмежується в розумних межах.

1.3.2 Розподілений метод управління

На відміну від централізованого методу управління, структура розподіленого методу управління досягається шляхом поділу ВЕС на два незалежні рівні. Як показано на рис. 1.3, перший рівень - це центральний рівень зв'язку, яким керує ВЕС, а другий - рівень незалежної підсистеми, яким керують зацікавлені учасники генерації.

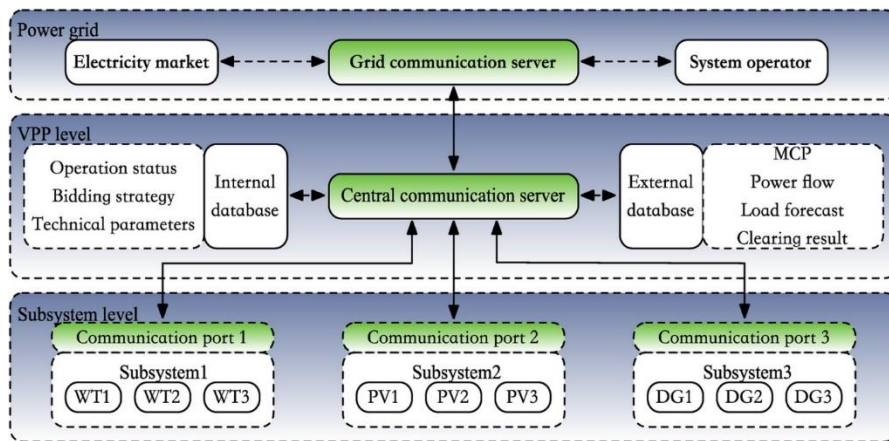


Рисунок 1.3 – Структура методу розподіленого управління ВЕС

Незалежна підсистема планує регіональні енергетичні ресурси з метою максимізації індивідуального прибутку, в той час як ВЕС забезпечує інформаційний зв'язок між декількома підсистемами. Оскільки всі енергетичні ресурси знаходяться поза контролем ВЕС, застосування методу розподіленого управління допомагає уникнути проблеми ринкової монополії, що виникає при централізованому управлінні великомасштабними ВЕС. Крім того, розподіл змінних рішень по підсистемах може також зменшити об'єм обчислень.

Незважаючи на вищезазначені переваги розподіленого управління, нещодавні дослідження також вказують на потенційні недоліки. Через відсутність централізованої оптимізації профіль роботи кожної підсистеми може суперечити один одному, що знижує загальну конкурентоспроможність і загострює ринкову конкуренцію. Координація егоїстичних стратегій роботи вимагає великих обчислень. Однак застосування теорії гри може прискорити зближення неузгоджених стратегій. Однак для того, щоб використовувати теорію ігор, вихідні обмеження повинні бути перетворені в стандартні математичні обмеження, а еквівалентні припущення застосовуються для заміни неконвертованих обмежень, що значно обмежує застосовність теорії ігор в реалістичних ситуаціях.

Крім теорії ігор, для розв'язання задачі розподіленого управління також

застосовуються алгоритми розподілених обчислень. Підсистема визначається як агент, основною метою якого є максимізація індивідуального прибутку. Завдяки оновленню та поширенню стратегії торгів кожного окремого учасника, мультиагентна система може бути ефективно об'єднана і досягти рівноваги, яка формулює вільні корпоративні відносини між усіма залученими агентами. Пропонується розподілений первинно-дуальний субградієнтний алгоритм. За допомогою обмеженої комунікації індивідуальні рішення РДЕ координуються ВЕС і досягають загальної максимізації прибутку. Для моделювання обміну інформацією між незалежними РДЕ вводиться матриця зв'язків. Вважається, що локальна мережа зв'язку, яка задовольняє обмеженню зв'язності, дозволяє використовувати розподілений градієнтний алгоритм і формулює оптимізовану рівновагу. Запропоновано нову стратегію управління, яка називається алгоритмом управління симетричними компонентами, для роботи розподіленої енергетичної системи. В той час як береться до уваги неідеальна мережа зв'язку, яка містить часові затримки, шуми в каналах і несправності в каналах. Застосовуючи розподілений первинно-дуальний субградієнтний алгоритм, ефективність зв'язку та ефективність обчислень у розподіленому сценарії покращується.

Перш за все, в розподіленому методі управління ВЕС виступає в ролі комунікаційного сервера, що надає послугу обміну інформацією. Розгортаючи розподілені алгоритми, ВЕС допомагає сформувати вільний альянс між незалежними РДЕ, що покращує загальну вигоду, поки задовольняється здатність комунікаційної мережі до взаємодії.

1.3.3 Комплексний метод управління

Метод комплексного управління також визначається як централізовано-розподілене управління. Судячи з визначення, цей метод поєднує в собі характеристики централізованого та розподіленого контролю. Як показано на рис. 1.4, комплексний метод управління можна розділити на два підрівні управління, при цьому всі підрівні тісно пов'язані між собою центром

управління ВЕС.

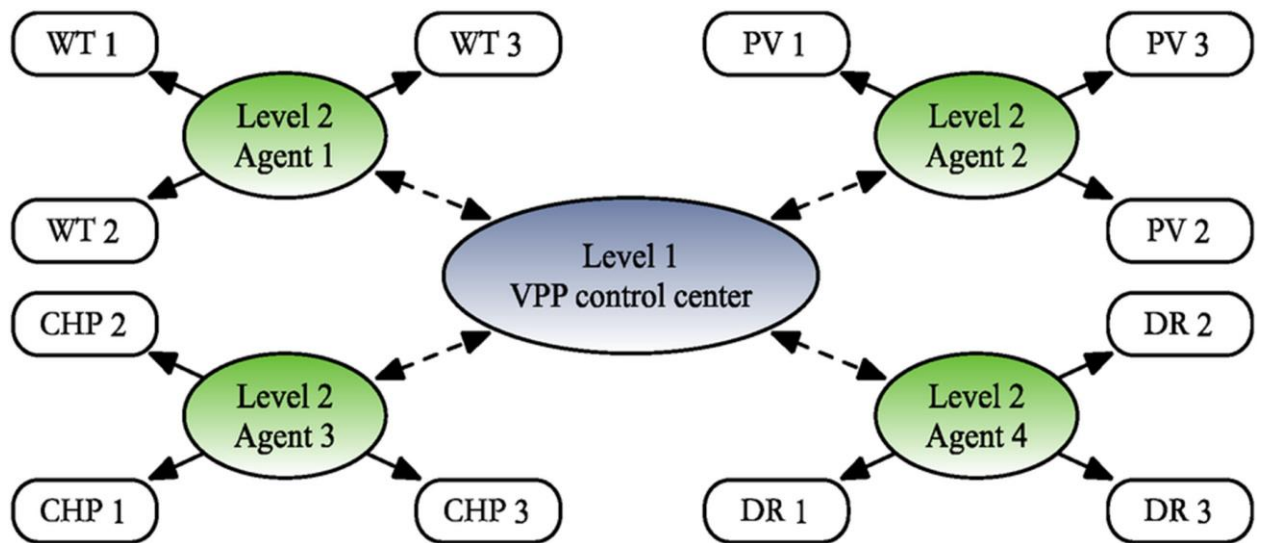


Рисунок 1.4 – Структура комплексного методу управління ВЕС

Рівень I: Централізоване управління ВЕС: На першому рівні ВЕС централізовано координує стратегію торгів кожного агента та формулює остаточну стратегію участі в торгах. На відміну від величезного обчислювального навантаження при централізованому управлінні, обчислювальне навантаження ВЕС розподіляється між агентами на рівні II через запровадження режиму представництва агентів.

Рівень II: Розподілене управління агентами: На рівні II розподілені агенти беруть на себе відповідальність за регіональну оптимізацію і подають регіональний профіль роботи до ВЕС для загальної оптимізації. Після отримання остаточного скоординованого операційного профілю, виданого ВЕС, всі агенти проводять регіональне перепланування і переходять до виконання.

Завдяки застосуванню режиму представництва агентів, часткове обчислювальне навантаження переноситься з рівня I на рівень II, що прискорює зближення внутрішньої інтеграції ВЕС. Більше того, існування центральної координації ВЕС дозволяє уникнути неупорядкованої

конкуренції та забезпечує баланс Неша для стратегій торгів агентів. Завдяки формулюванню лінеаризованої моделі оптимізації агентів, швидкість обчислень центральної оптимізації ВЕС значно підвищується.

Окрім вищезазначених переваг, недоліки комплексного методу контролю полягають у комунікації та сумісності. Через обмін інформацією між двома рівнями комплексний метод контролю є вразливим до кібератак, а недостатній канал зв'язку може бути перевантажений. Для підвищення надійності зв'язку потрібні більші фізичні інвестиції та модифікація програмного забезпечення. Таким чином, сумісність комплексного методу контролю буде обмежена пропускнуою здатністю каналу зв'язку.

Підводячи підсумок, проведемо порівняння згаданих трьох методів контролю ВЕС, як показано в таблиці 1.1, де наведені як переваги, так і недоліки кожного з них.

Таблиця 1.1 – Порівняння функціональних можливостей, переваг та недоліків методів внутрішнього управління ВЕС

Тип управління	Повноваження ВЕС	Позиція на ринку	Обчислювальне навантаження	Функція центру управління ВЕС	Сумісність з РДЕ	Конкурентоспроможність на ринку
Централізований метод	повний контроль	ціноутворювач	великі та концентровані	централізований зв'язок та обчислення	складні та необхідні оновлення алгоритмів	дуже конкурентоспроможний
Комплексний метод	частковий контроль	переважно ціноутворювач	нормальний і частково розподілений	централізований зв'язок і часткові обчислення	звичайні з деякими необхідними модифікаціями	конкурентоспроможний
Розподілений метод	самоконтроль	переважно ціноутворювач	повністю розподілений	тільки комунікація	гнучкі та відкриті для доступу	менш конкурентоспроможний

1.4 Різниця між ВЕС та ММ

ВЕС слугують енергетичними кластерами, які об'єднують місцевих виробників та споживачів для сприяння розвитку ВДЕ. Вони складаються з Мікромереж(ММ) у географічно близьких районах в межах обмеженого регіону, які співпрацюють з метою мінімізації витрат на передачу енергії. ВЕС також включають окремі віддалені райони або функціонують як великі ММ. ММ є новою формою енергосистеми, яка може похвалитися такими перевагами, як краще використання ВДЕ за допомогою акумуляторних накопичувачів, вища прозорість роботи мережі та підвищена стабільність завдяки вдосконаленій технології управління. ММ можна розглядати як інтегровану енергетичну систему, що складається з РДЕ та декількох навантажень. Вони функціонують як менша енергосистема, яка може працювати в режимі підключення до мережі або в ізолюваному режимі (незалежно), як показано на Рисунку 1.5.

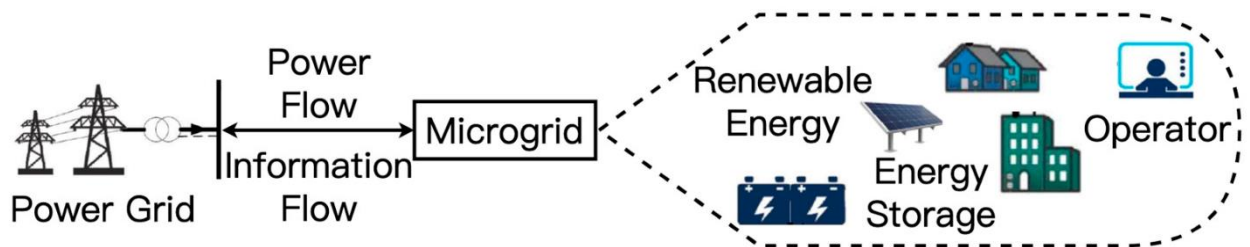


Рисунок 1.5 – Структура Мікромережі

Найбільш очевидною особливістю ММ є її здатність ізолюватись від розподільчої системи під час аварійних відключень або перебоїв. Це досягається за рахунок використання накопичувачів електроенергії або інших технологій зберігання, а також інтеграції ВДЕ. Виробляючи та зберігаючи власну енергію, ММ може продовжувати функціонувати, навіть якщо велика мережа зазнає збоїв. Ще однією ключовою особливістю ММ є їхня здатність

керувати споживанням та виробництвом електроенергії в режимі реального часу за допомогою сучасних систем управління та алгоритмів. Це дозволяє збалансувати попит і пропозицію в межах ММ, оптимізуючи використання енергії та мінімізуючи відходи. Крім того, ММ можуть забезпечити низку інших переваг, таких як підвищена стійкість і надійність, зниження витрат на електроенергію та підвищення енергетичної незалежності.

І навпаки, ВЕС використовують програмні системи для дистанційного контролю та оптимізації виробництва електроенергії, ресурсів зберігання та управління попитом в межах захищеної мережевої інфраструктури. Використовуючи існуючу мережу, ВЕС надають допоміжні послуги користувачам, максимізуючи при цьому вигоду для споживачів та розподільчих компаній. Основна перевага ВЕС полягає в тому, що вони можуть швидко реагувати на зміну навантаження користувачів, надавати послуги в режимі реального часу та оптимізувати роботу всієї системи. Це досягається завдяки сучасному програмному забезпеченню, яке може аналізувати дані користувачів і відповідно регулювати виробництво та споживання електроенергії. Наприклад, у періоди високого попиту на енергію ВЕС можуть збільшити виробництво електроенергії з ВДЕ. І навпаки, в періоди низького попиту ВЕС можуть зменшувати виробництво енергії та зберігати надлишок енергії для використання в майбутньому.

Хоча ММ та ВЕС пропонують рішення для забезпечення надійного електропостачання в енергосистемах і мають спільні риси, такі як розподілене виробництво електроенергії з ВДЕ, системи зберігання та здатність інтегрувати РДЕ, вони все ж мають відмінності:

1. ВЕС завжди існують у підключеному до мережі вигляді (в той час як ММ можуть бути як підключеними до мережі, так і не підключеними до мережі). ВЕС завжди підключені до електромережі і використовують сучасне програмне забезпечення для управління групою РДЕ. ВЕС можуть диспетчеризувати РДЕ для надання мережевих послуг або участі в енергетичних ринках. На відміну від них, ММ можуть працювати

ізолювано від енергосистеми, тобто в автономному режимі, або бути підключеними до енергосистеми, тобто в режимі приєднання до енергосистеми. Малі ММ призначені для забезпечення надійного та безперебійного електропостачання, особливо у віддалених або критично важливих місцях.

2. ВЕС можуть мати або не мати систему захисту від перенапруги (в той час як ММ, як правило, вимагають наявності системи захисту від перенапруги). ВЕС - це хмарна програмна платформа, яка об'єднує розподілені РДЕ. Замість того, щоб фізично з'єднувати їх, ВЕС управляє ними, щоб забезпечити постачання електроенергії в мережу у відповідь на коливання попиту. На противагу цьому, ММ - це невелика електрична мережа, яка може працювати незалежно або паралельно з основною мережею. Зазвичай вони інтегрують різні РДЕ з накопичувачами електроенергії для забезпечення надійного та стійкого електропостачання. Тому, в той час як зберігання енергії є необов'язковим для ВЕС, воно є важливим компонентом ММ.

3. ВЕС не ізолюють себе від великої загальної мережі в якості надзвичайного заходу (в той час як ММ можуть це зробити). З точки зору ВЕС та ММ, ВЕС не функціонують в першу чергу як аварійне джерело резервного живлення. Замість цього, вони являють собою сукупність енергетичних ресурсів, які можна стратегічно планувати і направляти в енергосистему у відповідь на попит на енергію або раптові коливання електроенергії. З іншого боку, ММ призначені для роботи як автономні одиниці, що генерують і розподіляють електроенергію незалежно від основної електромережі у разі надзвичайних ситуацій або планових відключень.

4. ВЕС в першу чергу покладаються на «розумні» лічильники та інформаційні технології (в той час як ММ покладаються в основному на обладнання, таке як «розумні» інвертори та перемикачі). ВЕС покладаються на інтелектуальні лічильники та інформаційні технології для

управління попитом та пропозицією енергії в мережі РДЕ. ВЕС використовують алгоритми та програмне забезпечення для аналізу даних з інтелектуальних лічильників та інших датчиків, що дозволяє їм прогнозувати моделі використання енергії та оптимізувати диспетчеризацію енергоресурсів. З іншого боку, ММ покладаються в основному на апаратне забезпечення, таке як інтелектуальні інвертори та комутатори, для управління потоками енергії в межах локалізованої території.

5. ВЕС можуть об'єднувати та координувати різноманітні ресурси на більшій географічній території (в той час як ММ включають лише набір статичних ресурсів в обмеженому географічному місці). Це означає, що ВЕС можуть мати доступ до різних джерел РДЕ у ширшому регіоні і керувати ними. Потім ВЕС можуть диспетчеризувати ці ресурси на основі стану енергосистеми в режимі реального часу та запитів споживачів для надання мережових послуг, таких як зменшення пікових навантажень, балансування навантаження та регулювання частоти. Однак ВЕС важко підключити до великої географічної території зі слабким електропостачанням. ММ працюють у менших масштабах і, як правило, керують фіксованим набором РДЕ у певній місцевості. Хоча обидві концепції передбачають управління розподіленими ресурсами, ВЕС мають більшу здатність оптимізувати ширший спектр активів у режимі реального часу для підвищення стійкості та гнучкості енергосистеми.

6. ВЕС можуть встановлювати зв'язок з оптовими ринками електроенергії (в той час як ММ здійснюють лише роздрібні операції з електроенергією). Це означає, що ВЕС можуть продавати надлишок електроенергії, виробленої їхніми РДЕ, на оптові ринки електроенергії, що може забезпечити більш рентабельне та ефективне використання ВДЕ. Крім того, ВЕС можуть брати участь у програмах врегулювання аварійних ситуацій та надавати послуги енергопостачальній компанії, підвищуючи стабільність та надійність енергосистеми. На відміну від них, ММ

обмежується роздрібними операціями між власниками РДЕ та кінцевими споживачами.

Відмінності між ВЕС та ММ підсумовано в Таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні відмінності між ВЕС та ММ

Короткий опис	ВЕС	ММ
Існують лише у формі підключення до мережі.	√√	×× (Або поза мережею.)
Може мати або не мати системи накопичення енергії.	√√	×× (Потребують систем накопичення енергії)
Можуть ізолювати себе від більшої публічної мережі як надзвичайний захід.	××	√√
Покладаються на розумні лічильники та інформаційні технології.	√√	×× (Покладайтеся в основному на обладнання)
Об'єднує та координує різноманітні ресурси на більшій географічній території.	√√	×× (Включає лише набір статичних ресурсів в обмеженому географічному розташуванні)
Торгує електроенергією з роздрібними та оптовими продавцями.	√√	×× (Тільки торгує на рівні роздрібної торгівлі)

Моделі ММ взаємопов'язані та об'єднані в модель ВЕС з новими можливостями, як показано на Рисунку 1.6.

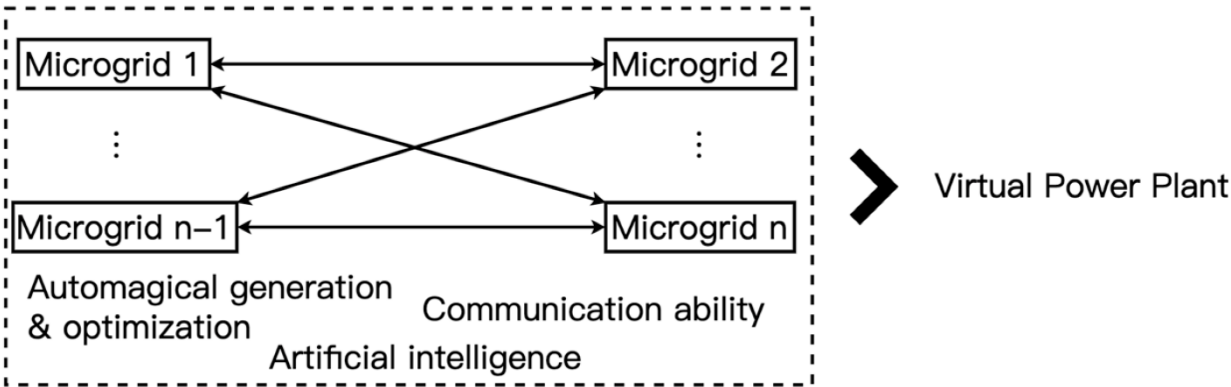


Рисунок 1.6 – Структура Мікромережі

1.5 Переваги створення ВЕС

Створення ВЕС приносить значні економічні, соціальні та екологічні вигоди.

1) Економічний вплив

ВЕС координують діяльність суб'єктів виробництва, зберігання та споживання енергії та беруть участь у ринку допоміжних послуг на стороні попиту, щоб зменшити споживання енергії та операційні витрати. Для користувачів ВЕС об'єднують користувачів різних типів та місцезнаходжень, щоб забезпечити більшу гнучкість ринку та вигоди для користувачів. ВЕС беруть участь у ринку електроенергії та надають допоміжні послуги, щоб зменшити втрати через помилки у прогнозуванні попиту. ВЕС призначені для комунальних підприємств для підтримки стабільності та економічного балансу, а також можуть допомогти урядам підтримувати економічну рівновагу за рахунок зниження вартості електроенергії. Крім того, ВЕС можуть брати участь в енергетичному ринку різними способами для досягнення збалансованого енергетичного ринку. Коли для генерації та зберігання використовується багато ресурсів, впровадження оптимізованих технологій управління енергоменеджментом може допомогти підвищити ефективність та результативність енергосистеми, одночасно задовольняючи потреби користувачів. На рисунку 1.7 показана детальна загальна схема системи ВЕС.

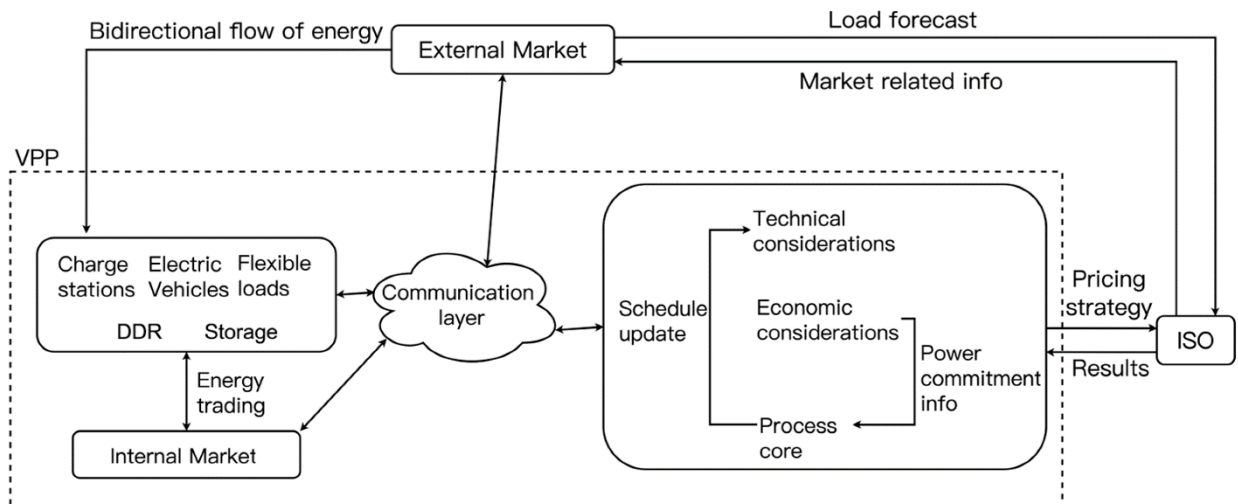


Рисунок 1.7 – Системна схема ВЕС

Комунікаційний рівень відповідає за обмін даними між різними рівнями ВЕС, тоді як інфраструктурний рівень складається з РДЕ, систем акумулювання енергії та навантажень. ВЕС надсилає заявки до рівня прийняття рішень, а потім здійснює транзакції на внутрішньому або зовнішньому ринку на основі сигналу потоку енергії, скоригованого рівнем прийняття рішень. Зовнішній ринок та рівень прийняття рішень надають незалежному системному оператору (НСО) прогнози навантаження та стратегії торгів відповідно. Крім того, ВЕС мають потенціал для забезпечення допоміжних послуг з регулювання частоти на основі попиту для підвищення стабільності системи. Допоміжні послуги на стороні попиту є формою реагування на попит (РП) та важливим засобом управління попитом, який може зменшити або збільшити споживання електроенергії кінцевими споживачами за допомогою стимулів або добровільних планів, заснованих на ціні. Ці послуги покликані забезпечити безпеку та надійність енергосистеми, допомогти споживачам брати участь у ринку електроенергії та підтримувати баланс між попитом та пропозицією. ВЕС можуть отримати вигоду від РП або планів динамічного ціноутворення, змінюючи або переплановуючи попит на енергію, мінімізуючи операційні витрати та покращуючи стабільність

енергосистеми. Загалом, ВЕС є критично важливим компонентом майбутньої енергетичної системи, допомагаючи підвищити ефективність, знизити витрати та інтегрувати відновлювані джерела енергії.

2) Соціальний вплив

ВЕС сприяють покращенню відносин між споживачами та комунальними підприємствами; збільшують участь комунальних підприємств та користувачів у ринку електроенергії; забезпечують безпечний, надійний, диверсифікований ринок; та приносять користь суспільству. Крім того, поява ВЕС має на меті зменшити невизначеність, спричинену ВДЕ в енергосистемі, вдосконалити технології, пов'язані з системою енергоменеджменту, забезпечити надійність та стабільність енергосистеми, а також трансформувати поведінку споживачів. Рисунок 1.8 ілюструє концепції споживачів і проз'юмерів.

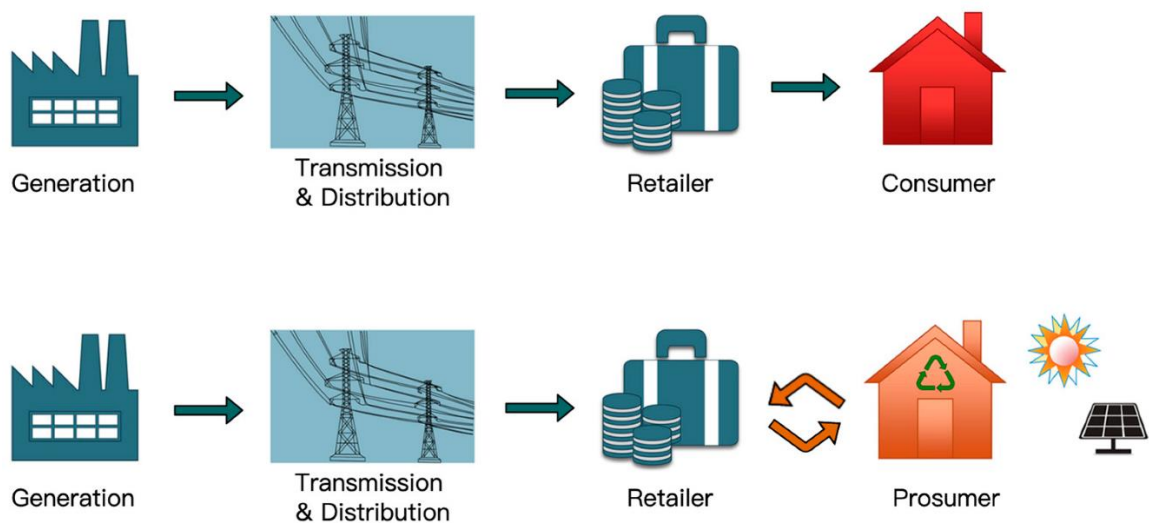


Рисунок 1.8 – Концепції споживача та проз'юмера у ВЕС

Основна мета - продемонструвати різницю між сучасними споживачами (так званими «проз'юмерами», які можуть або купувати електроенергію, або продавати її надлишок) і традиційними споживачами (які можуть лише купувати електроенергію). Для проз'юмерів стимулювання їх до активної

участі в торгівлі на ринку електроенергії на основі стратегій ціноутворення або стимулювання сприяє їх залученню до споживання, виробництва та торгівлі енергією. ВЕС також можуть принести користь вразливим верствам населення, наприклад, домогосподарствам з низьким рівнем доходу, надаючи доступ до доступних, надійних джерел чистої енергії та допомагаючи зменшити енергетичну бідність. Загалом, ВДЕ мають потенціал для трансформації енергетичного сектору, сприяючи створенню більш стійкої, справедливої та чутливої системи.

3) Вплив на навколишнє середовище

Інтеграція ВЕС також збільшує кількість ВДЕ, інтегрованих в енергосистему, зменшує вуглецевий слід та використання викопного палива, а також створює стійку енергосистему. ВЕС можуть об'єднувати різні типи генеруючих потужностей, зменшуючи екологічний дисбаланс. Крім того, ВЕС усувають географічні обмеження, дозволяючи споживачам брати участь у ринку електроенергії без урахування фактичної відстані, дотримуючись правил безпеки, встановлених незалежним системним оператором (НСО). Крім того, ВЕС можуть також сприяти інтеграції систем енергозбереження, що може допомогти вирішити проблему нестабільності ВДЕ. Зберігаючи надлишок енергії, виробленої цими джерелами в непікові години, енергія може подаватися в мережу в години пікового навантаження, зменшуючи навантаження на традиційні електростанції та сприяючи використанню екологічно чистої енергії. ВЕС також можуть сприяти реалізації програм відновлюваної енергетики, які заохочують споживачів знижувати споживання енергії під час пікових навантажень, що в кінцевому підсумку зменшує потребу у виробництві електроенергії на основі викопних видів палива. Загалом, інтеграція ВЕС в енергосистему може відігравати життєво важливу роль у просуванні сталої та екологічно чистої енергосистеми.

2 АНАЛІЗ ВЕС В ЕМ ТА НА РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Структура ринку електроенергії

Монополізовані електроенергетичні корпорації, що виникли в результаті другої промислової революції, були створені для підтримки надійної роботи великої електроенергетики. Однак ефективність роботи електроенергетики була скомпрометована через монопольне управління. З метою забезпечення прозорості та справедливості в усьому світі було запропоновано ринкову реформу. В Америці під наглядом Федеральної комісії з регулювання енергетики (FERC) було створено кілька регіональних ринків електроенергії, наприклад, PJM Interconnection та California ISO тощо. Оскільки ці регіональні оператори передачі (ОРП) зосередилися на управлінні регіональним ринком електроенергії, обов'язки з передачі та розподілу були передані місцевим операторам систем розподілу (ОСР). Виходячи з такого соціального поділу, оператори ринку електроенергії були вразливими до серйозних ринкових збоїв, таких як криза на ринку електроенергії в Каліфорнії у 2001 році та велике відключення електроенергії в Нью-Йорку у 2003 році. Хоча потенційний ризик лежав за межами недосконалої ринкової структури, висока ефективність і розумний механізм ціноутворення на електроенергію продемонстрували успішну трансформацію американського ринку електроенергії.

Крім Америки, структура пулу електроенергії була вперше створена в Англії, яка була модернізована до ринку подвійних аукціонів шляхом застосування Нової угоди про торгівлю електроенергією (NETA) у 2003 році, а пізніше застосована до всього ринку електроенергії Великої Британії шляхом оголошення про створення Британської угоди про торгівлю електроенергією (BETTA) у 2005 році. Нещодавно, у 2015 році, британський уряд запропонував новий проект «Реформа ринку електроенергії» (RPE), спрямований на покращення схеми ціноутворення та підвищення ефективності ринку.

Виходячи з товарної характеристики електроенергії, ринки електроенергії можна поділити на три основні субринки: РДН, РБРЧ та РДП. Хоча визначення та регулювання кожного з цих субринків можуть відрізнятися одне від одного в різних країнах, все ж таки існують спільні характеристики, відповідно. На РДН більшість зобов'язань щодо купівлі-продажу електроенергії планується для визначення базових цін для РБРЧ та РДП. Однак, з проникненням РДЕ на стороні споживача, більше уваги приділяється РБРЧ, де для нейтралізації відхилень потужності проводяться належні регулювання попитом та коригування потужності. Незважаючи на операції з електроенергією на РДН та РБРЧ, допоміжні послуги, такі як зняття пікових навантажень та перерозподіл навантаження, є однаково важливими для безпечної роботи електроенергетики. Концентруючи всі форми допоміжних послуг в РДП, класифікація субринків електроенергії стає зрозумілою та обґрунтованою. Таким чином, цей розділ зосереджується на участі ВЕС у цих трьох субринках, де також представлена комплексна стратегія участі ВЕС у торгах на спільному ринку.

2.2 Ринок на добу наперед

Процедура розрахунків на РДН, спрямована на планування генерації, має важливе значення для роботи енергосистеми. На сьогоднішній день процедуру розрахунків РДН можна поділити на три категорії на основі різних механізмів торгівлі. Участь ВЕС у різних процедурах РДН окремо проілюстрована наступним чином.

2.2.1 Центральна диспетчерська НСО

За цим сценарієм всі учасники ринку, включаючи ВЕС, зобов'язані подати інформацію про торги до НСО у встановлений термін. Для кожного учасника інформація про торги повинна одночасно містити готову пропозицію генерації та відповідну криву витрат. Після завершення збору інформації НСО здійснює

планування виробництва електроенергії з метою максимізації суспільної вигоди. На основі запропонованої тендерної інформації, планування електроенергії НСО може бути сформульоване як задача про цінові зобов'язання (ЗЦЗ), в якій вводяться технічні обмеження для виробників. Більше того, вищезгадана задача ЗЦЗ може трансформуватися у зобов'язання підрозділу, обмежені безпекою, якщо взяти до уваги обмеження на перетоки електроенергії в мережі.

На відміну від інших механізмів РДН, регулювання цін є найбільш характерною рисою центральної диспетчеризації НСО. Наразі схему ціноутворення на електроенергію в центральному диспетчерському управлінні НСО можна поділити на пікову ціну, фіксовану ціну, ціну за час використання тощо. Використовується схема ціноутворення за піковою ціною, де ВЕС демонструє свою здатність до зняття пікових навантажень та перерозподілу навантажень. Однак, ще застосовується фіксована схема ціноутворення, що демонструє важливість ВЕС для стабілізації цін на електроенергію, особливо в пікові періоди, коли розгортання резервних потужностей ВЕС допомагає зняти напругу, пов'язану з нестачею потужностей.

Незважаючи на заздалегідь визначені фіксовані тарифи в моделі центральної диспетчеризації, багато досліджень зосереджуються на цінній невизначеності в РДН. Ціна за час використання отримується за допомогою методів прогнозування. Приймаючи до уваги історичні ціни та попит на навантаження, точність прогнозу ціни очевидно покращується. Незважаючи на лінійне прогнозування, припускається, що ціна РДН слідує певному розподілу, а для врахування невизначеності застосовується метод точкової оцінки, щоб нейтралізувати ризик торгів ВЕС. Аналогічно функція розподілу ціни РДН моделюється на основі історичних даних, а метод імітаційного моделювання Монте-Карло застосовується для генерування сценаріїв ціни РДН, які можуть бути використані для оцінки застосовності та потенційного ризику стратегії ВЕС щодо участі в торгах.

Оскільки тариф РДН в односторонньому порядку попередньо визначається НСО, ВЕС виступає в ролі покупця в центральному диспетчерському управлінні НСО. Адаптуючи свою запропоновану стратегію торгів відповідно до змінної ціни на електроенергію РДН, ВЕС підтримує свій загальний дохід на ринку. Оптимізаційна задача між ВЕС та НСО формулюється як дворівнева оптимізаційна задача з обмеженнями планування потужності, що пов'язують обидва рівні. На верхньому рівні ВЕС має на меті максимізувати ринковий дохід, в той час як при оптимізації враховуються внутрішні обмеження диспетчеризації електроенергії. В той же час, метою НСО є мінімізація соціальних витрат та інші технічні обмеження, що складають нижній рівень. Як незалежний суб'єкт, ВЕС представляє інтегровані ВДЕ в нижньому рівні диспетчеризації НСО, що робить ВДЕ невидимими для планування потужності НСО. Завдяки зв'язку потужності та часовому зв'язку між двома рівнями, загальний вихід ВЕС стає ключовим фактором у вирішенні проблем. Незважаючи на евристичний алгоритм, умови і теорія двоїстості поступово стають мейнстрімом. Шляхом математичного перетворення оптимізаційної задачі нижнього рівня в обмеження верхнього рівня, процедура розв'язання дворівневої задачі стає лінійною та однорівневою, що прискорює ефективність обчислень.

Завдяки методу дворівневої оптимізації ВЕС може динамічно адаптувати свій профіль генерації відповідно до диспетчерського плану НСО. Пошук точки рівноваги дворівневої задачі дозволяє досягти цілей обох рівнів одночасно.

2.2.2 Конкурсні торги

На відміну від центральної диспетчеризації НСО, конкурентні торги повністю орієнтовані на ринок, де всі учасники подають до НСО індивідуальну тендерну інформацію, що містить бажану потужність та очікувану ціну. Після цього НСО проводить ринковий розрахунок, розраховуючи граничну ціну та визначаючи граничну одиницю. Після того, як

ринкова розрахункова ціна підтверджена, підтверджуються і зобов'язання кожного учасника щодо купівлі-продажу електроенергії. Що стосується різних схем оплати, то конкурентні торги можна розділити на сценарії ринкової розрахункової ціни та «оплата за заявкою».

За сценарієм ринкової розрахункової ціни транзакції з купівлі-продажу електроенергії встановлюють рахунки ринкової ціни протягом усього часу обміну. Таким чином, грошовий дохід кожного учасника може бути розрахований як добуток реального обсягу виробництва та ринкової ціни. Застосування ринкової ціни підвищує конкуренцію на ринку електроенергії, заохочуючи інтеграцію РДЕ за допомогою цінових стимулів. Однак, без цінового регулювання, ринкова ціна частково домінує над потенційною ринковою владою, що виявляє нерівномірність генеруючих потужностей між учасниками. Через прагнення до отримання прибутку, учасник з великими потужностями може необачно підвищити запропоновану ним ціну на торгах, що змушує НСО приймати його ціну на торгах заради дотримання вимог балансу потужності. В результаті, домінуючий учасник може досягти довільного прибутку, в той час як комунальні споживачі мають сплачувати додаткові рахунки за електроенергію через недобросовісну конкуренцію на ринку електроенергії.

Щоб уникнути маніпулювання ринковою владою, розгортається схема «оплата за заявкою» як ефективний метод підвищення справедливості ринкової конкуренції. За сценарієм «оплата за заявкою», ринковий дохід учасника дорівнює поданій вартості прийнятих ним зобов'язань з постачання електроенергії. Таким чином, навмисне підвищення ціни, запропоноване ринковою владою, не може маніпулювати ринковою ціною з метою зниження його конкурентоспроможності. Крім того, надлишкова вартість, отримана НСО за цим сценарієм, може бути спрямована на покриття необхідних витрат на РДП для підтримання безпечної роботи енергосистеми.

Незалежно від того, яка схема оплати буде застосована на ринку електроенергії, ВЕС може гнучко брати участь у торгах та коригувати свою

стратегію відповідно до ринкового регулювання. У сценарії ринкової ціни інтеграція дешевих ВДЕ дозволяє ВЕС брати участь у конкурентних торгах з перевагою у витратах. Оскільки всі енергетичні транзакції здійснюються на рахунках ринкової ціни, ринковий дохід ВЕС в основному визначається її акцептованими заявками на участь у торгах. Таким чином, перевага у витратах гарантує ВЕС повну інтеграцію наявних у неї енергоресурсів. Однак, за сценарієм «оплата за заявкою», ринковий дохід залежить від стратегії участі в торгах, що вимагає від ВЕС раціональної оцінки потенційної грошової вартості ВДЕ, якими вона володіє, та відповідної оптимізації стратегії участі в торгах. Через неповноту інформаційного середовища ВЕС змушена моделювати тендерну стратегію конкурентів на основі їхніх історичних даних. Визначивши функції ймовірності стратегій опонентів, можна застосувати програмування з обмеженням на випадковість, щоб оптимізувати свою стратегію торгів з певним рівнем довіри. Крім того, теорія кооперативних ігор є адекватною для розв'язання ринкових торгів за участю багатьох гравців.

Як висновок до цього підрозділу, роль ВЕС у конкурентних торгах полягає в тому, що вона є ціноутворювачем, який може суттєво впливати на процедуру врегулювання на ринку електроенергії. Однак, якщо ВЕС об'єднує надмірні РДК та РП, ринкова влада, якою володіє ВЕС, може поставити під загрозу справедливість ринкової конкуренції, чого слід уникати шляхом встановлення належного регулювання ринку електроенергії, включаючи обмеження ціни, обмеження потужності тощо.

2.2.3 Двосторонні переговори

Поряд з процесом реформування ринку, нові категорії торгівлі електроенергією були включені в торги на РДН. Двосторонні переговори дозволяють основним учасникам ринку добровільно укладати торгові контракти. Для великих виробників та споживачів електроенергії двосторонні переговори допомагають уникнути цінової невизначеності та підтримують економічний арбітраж для обох сторін.

Як зазначено, ВДЕ та РДЕ не можуть брати участь у звичайних двосторонніх переговорах через їх низьку потужність та високу нестабільність. Однак, завдяки інтеграції ВЕС, ВДЕ та РДЕ об'єднуються в скоординовану структуру, що забезпечує надійне та економічне енергопостачання. У порівнянні з тепловим споживанням, де домінує теплова енергія, включення ВДЕ до двосторонніх переговорів не лише підвищує економічну ефективність обох сторін, але й сприяє використанню ВДЕ в енергосистемі. Однак, невизначеність, пов'язана з нестабільністю ВДЕ, враховується у внутрішньому диспетчерському управлінні ВЕС за допомогою аналізу умовної вартості під ризиком.

Завдяки більшій кількості торгових категорій, що застосовуються в РДН, гнучка структура та диверсифікований профіль діяльності ВЕС гарантує собі конкурентну перевагу. У порівнянні з традиційними учасниками ринку, стратегія торгів ВЕС поєднує в собі переваги ВДЕ та регульованих блоків, які також доповнюють недостатність один одного.

2.3 Ринок балансування в реальному часі

Запровадження РБРЧ має на меті забезпечити регулювання потужності в режимі реального часу для компенсації відхилення потужності. З проникненням ВДЕ в енергосистему вугільні теплові електростанції поступово замінюються станціями на основі вітрових електростанцій та фотоелектричними панелями. У Китаї ВДЕ становлять 24% споживання електроенергії з потенціалом зростання. З розвитком технологій виробництва електроенергії на основі енергії вітру та фотоелектричних панелей, ВДЕ малої потужності широко впроваджуються серед комунальних споживачів, що зазвичай характеризується відсутністю управління та низькою ефективністю. Завдяки інтеграції ВЕС, ВДЕ на стороні користувача можуть належним чином управлятися та використовуватися енергосистемою в цілому. Однак, зростаюче проникнення ВДЕ на стороні користувача посилює складність

підтримки балансу потужності в режимі реального часу.

Через нестабільність ВДЕ, РБРЧ стає важливим елементом в роботі енергосистеми. В РБРЧ виробництво та розгортання послуг маневрених резервів є основною торговою категорією. Відповідно до типу послуг, «маневровий резерв» можна розділити на позитивні та негативні ресурси окремо. Незалежно від типу резерву електроенергії, він без винятку планується НСО на основі інформації про бажаючих взяти участь у торгах. Що стосується компенсації прямих відрахувань, то вони можуть продаватися за фіксованим заздалегідь визначеним тарифом або за стимулюючими цінами, встановленими НСО. На відміну від доходу на основі обсягу виробництва в РДН, компенсація за резерв електроенергії надається до тих пір, поки він є запланованим. Як тільки резервний фонд буде задіяний у виробництві, постачальнику послуг буде виплачена додаткова компенсація. Таким чином, належна участь в РБРЧ може покращити використання резервних потужностей генерації, що одночасно сприятиме безпечній роботі енергосистеми. Досліджується застосовність заснованого на теорії ігор багатозонного механізму торгівлі резервними потужностями, де концепція ВЕС розгортається для віртуальної інтеграції розподілених резервних потужностей. Крім того, участь ВЕС в інтеграції резервів потужностей знижує обчислювальне навантаження на НСО за рахунок зменшення розмірності обчислень. Водночас, домінуюча резервна потужність ВЕС може призвести до збільшення вартості торгівлі електроенергією, що суперечить запровадженню РБРЧ. Таким чином, резервна потужність ВЕС заслуговує на обмеження з метою уникнення зловживання ринковою владою.

Незважаючи на те, що ВЕС постачає маневровий резерв, в екстремальних ситуаціях вона також може стати споживачем маневрового резерву. Як тільки зарезервованої генеруючої потужності всередині ВЕС буде недостатньо для покриття нестабільності ВДЕ, ВЕС буде змушена купувати маневровий резерв на ринку РБРЧ у випадку покарання за небаланс електроенергії. Щоб уникнути вищезазначеної ситуації, ВЕС має раціонально оптимізувати розподіл своєї

потужності на РДН та РБРЧ у разі її виникнення. Крім того, стратегія торгів ВЕС на РДН має бути раціонально оптимізована для досягнення балансу між економічністю та ризиком.

2.4 Спільний ринок

Оскільки жоден субринок не може бути незалежним один від одного, притаманна кореляція між кожним субринком демонструє важливість оптимізації загальної стратегії на об'єднаному ринку електроенергії. Було сформульовано задачу торгів ВЕС на об'єднаному ринку електроенергії, де розглянуто детерміновану модель диспетчеризації ВЕС та процедуру розрахунків на ринку, а також детерміновану RBUC-модель диспетчеризації ВЕС. Розв'язані за допомогою генетичного алгоритму, результати моделювання показують, що збільшення прибутку може бути досягнуто шляхом одночасної спільної оптимізації стратегії торгів, що вимагає повторних ітераційних розрахунків між двома задачами. Крім того, загальна оптимізація тендерної стратегії ВЕС на РДН та РБРЧ сприяє перетворенню ВЕС з price-taker на price-maker. Як показано в роботі, арбітражна вартість послуг іноді є більшою, ніж дохід від торгів на РДН, особливо коли резервна потужність є вкрай необхідною. Результати моделювання також підтверджують грошову окупність та підвищення ефективності ВЕС на спільному ринку РДН та РДП. Таким чином, участь ВЕС у РДН є основним ринковим доходом ВЕС, тоді як доповнення РДП та РБРЧ покращує ефективність роботи ВЕС, забезпечуючи додатковий попит на електроенергію.

Незважаючи на економічний аналіз, оцінка ризику нестабільності ВЕС також є основною проблемою на спільному ринку електроенергії. Вплив невизначених параметрів аналізується шляхом введенням умовної вартості під ризиком. В той час як рівень несприйнятливості ВЕС до ризику оцінюється за допомогою вартості під ризиком і береться до уваги під час оптимізації

тендерної стратегії, де результати кейсу підтверджують співвідношення між чистим прибутком ВЕС та бажаним рівнем ризику. Щодо складності вимірювання ризику невизначеності ВЕС, запропоновано стохастичний підхід, де ефективність тендерної стратегії ВЕС оцінюється в сценаріях, які були уточнені шляхом застосування методу зворотної редукції. Для врахування потенційного ризику при прийнятті рішень ВЕС використовується метод програмування з обмеженими шансами, де рівень несхильності ВЕС до ризику забезпечується за рахунок обмеження довірчої ймовірності. Як доповнення до математичних розрахунків часто застосовується стохастична оптимізація. Тим не менш, робастна оптимізація також може бути застосована в оцінці ризику ВЕС, яка моделює найгірший сценарій нестабільності ВЕС.

Як висновок, належна інтеграція внутрішніх енергетичних ресурсів та розподіл наявних потужностей на різних субринках є проблемою участі ВЕС у спільному ринку електроенергії. Для вирішення цієї проблеми було застосовано численні методи розрахунків. Через наявність змішаних цілочисельних параметрів у моделі прийняття рішень ВЕС, більшість моделей вважаються моделями типу нелінійного програмування з мішаним числом, які можуть бути трансформовані в мішані цілочисельні лінійні програмування і розв'язані математичними методами. З іншого боку, нелінійні програмування з мішаним числом можна безпосередньо розв'язувати за допомогою евристичних алгоритмів, таких як генетичні алгоритми та оптимізації рою часток, але оптимальність розв'язку та швидкість обчислень при цьому очевидно знижуються.

2.5 Інвестиції в ВЕС

Технологія «віртуальних електростанцій» розвивається в Європі, США, Китаї, Кореї та інших технологічно розвинених країнах. Існує значна кількість пілотних проектів, в яких спільне використання розумних ліфтів, будинків та лічильників, використання вітрової та сонячної енергії в поєднанні з

розумними будинками надають значні переваги споживачам з точки зору оплати послуг енергопостачання. Організації також отримують вигоду від збалансування пікових навантажень та зменшення втрат. Розвиток віртуальних мереж характеризується інвестиціями в їх розвиток за регіонами по всьому світу (рис. 2.1).

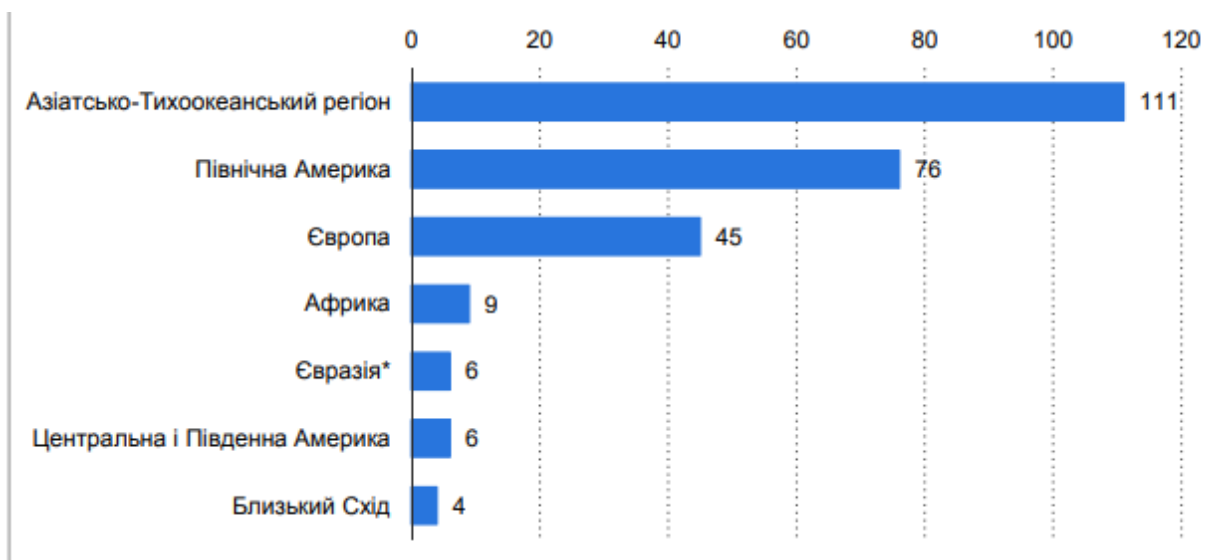


Рисунок 2.1 – Інвестиції у ВЕС в 2020 році, млрд дол. США

До 2020 року глобальні інвестиції в електромережі становили понад 250 мільярдів доларів США. Лише на Азійсько-Тихоокеанський регіон прийшлося понад 43% інвестицій у галузь. На другому місці - Північна Америка з 76 мільярдами доларів США капіталовкладень, а в Євразії та на Близькому Сході інвестиції склали приблизно 10 мільярдів доларів США.

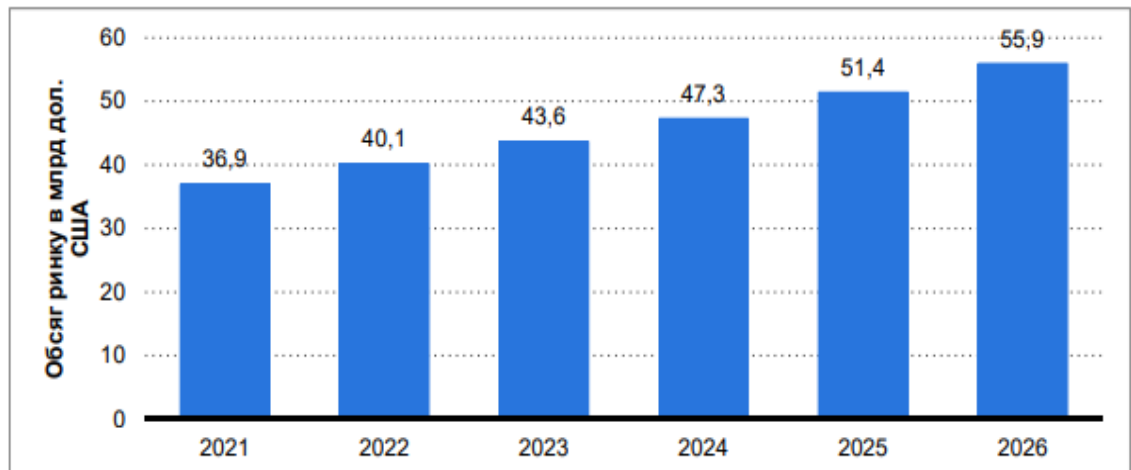


Рисунок 2.2 – Обсяг ВЕС на світовому ринку

Прогнозується, що світовий ринок віртуальних електростанцій зросте з 36,9 млрд доларів США до 55,9 млрд доларів США в період з 2021 по 2026 рік. Щорічні інвестиції у ВЕС у всьому світі з 2014 по 2019 рік показані на рисунку 2.3.

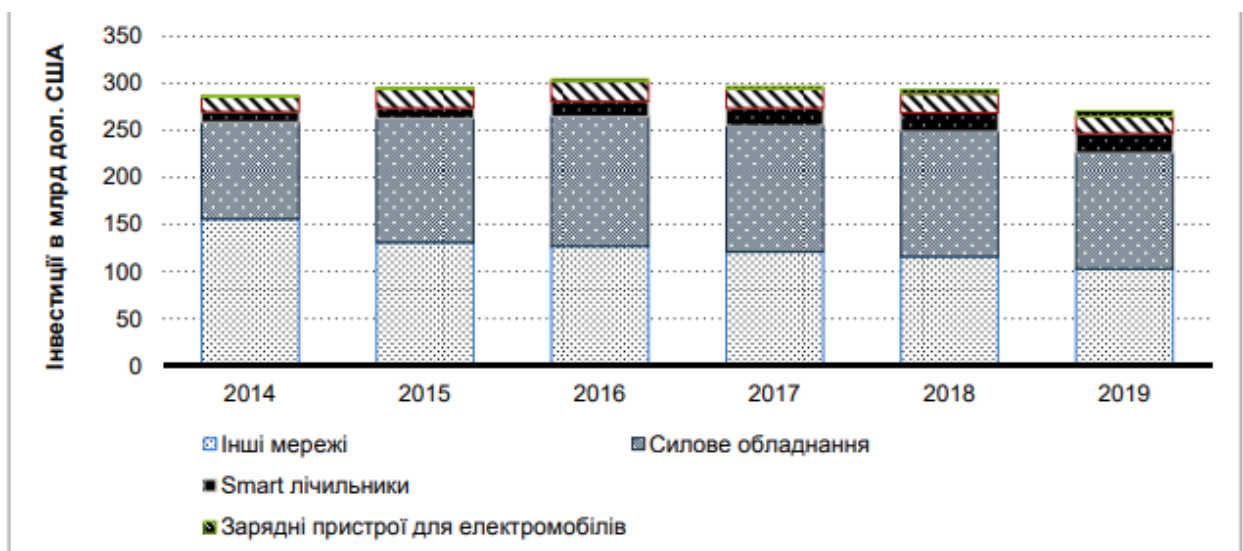


Рисунок 2.3 – Щорічні інвестиції в ВЕС

Очікується, що інвестиції у ВЕС зростатимуть і надалі як важлива частина заходів з протидії зміні клімату та підвищення стійкості й ефективності

енергетичного сектору.

Інвестиції у віртуальні електростанції - це інвестиції в новітні технології та сучасну інфраструктуру. Ці вкладення можуть містити такі елементи:

- встановлення «розумних» лічильників, які дозволяють споживачам бачити та керувати своїм споживанням електроенергії для зменшення витрат;
- вдосконалення систем моніторингу та управління електромережею для підтримки стабільної роботи мережі та запобігання відключенням;
- впровадження технологій зберігання електроенергії, таких як акумулятори, для забезпечення споживачів електроенергією в години, коли виробництво електроенергії є недостатнім для задоволення споживчого попиту.
- розвиток мережі зарядних станцій для електромобілів, що дозволить споживачам підзаряджати свої транспортні засоби та зробить перехід на електротранспорт більш доступним і зручним.

Збільшення інвестицій у ВЕС є важливим для забезпечення сталого та ефективного енергетичного сектору, який покращує якість життя, скорочує викиди та сприяє розвитку нових технологій та інновацій.

У 2020 році доходи в енергетичному секторі зросли завдяки збільшенню інвестицій та посиленню технологічного розвитку. Це відображає загальне зростання інтересу до технологій віртуальних електростанцій, які дозволяють енергокомпаніям краще управляти своїми енергетичними системами та забезпечувати стабільність енергопостачання.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ВЕС В ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

Метою допоміжних послуг в неієрархічних технологіях управління є підтримка балансу між виробництвом електроенергії та попитом на неї. Різновиди допоміжних послуг енергосистеми включають планування, реактивну потужність, регулювання напруги, відстеження навантаження, компенсацію втрат та захист системи. ВЕС можуть брати участь в енергоринку, надаючи допоміжні послуги шляхом агрегації РП та навантажень. Таке об'єднання забезпечує гнучкий і динамічний ресурс, який може реагувати на стан мережі в режимі реального часу, що дозволяє підвищити стабільність і надійність системи. Використовуючи ВЕС для зменшення втрат в розподільчій мережі, в роботі запропоновано алгоритм локального пошуку для оптимізації ВЕС, який використовується для управління енергією в розподільчій мережі, включаючи оптимальний вибір та розміщення РДЕ. Стратегічно розміщуючи РДЕ, комунальні компанії можуть зменшити втрати електроенергії під час передачі та розподілу електроенергії. У роботі для розв'язання задачі планування роботи ВЕС було використано новий метод, що поєднує інтервальну оптимізацію та детерміновану оптимізацію. Запропонована комбінаторна оптимізація підвищує визначеність профілів генерації та напруги РП, зменшує втрати електроенергії та збільшує прибуток. Зі збільшенням залучення ВЕС це може сприяти економічному процвітанню ринку електроенергії. Використання ВЕС може призвести до створення більш стійкої, ефективної та сталої енергетичної системи.

3.1 Однорангова торгівля енергією як допоміжна послуга для розподіленої оптимізації

Однорангова торгівля електроенергією є перспективним рішенням для сприяння ефективній та безпечній роботі систем розподілу електроенергії, що складаються з декількох споживачів. Це також нова концепція в розподільчих

мережах. Ця технологія дозволяє приватним особам і підприємствам торгувати надлишком виробленої ними енергії з іншими споживачами у своїй громаді. Створюючи місцевий енергетичний ринок, однорангова торгівля енергією може зменшити потребу у великих централізованих електростанціях і лініях електропередач, які є вразливими до перебоїв в електропостачанні та стихійних лих. однорангова торгівля енергією також може призвести до створення більш стійкої енергетичної системи, стимулюючи використання відновлюваних джерел енергії. Крім того, вона сприяє енергоефективності та енергозбереженню, створюючи фінансові стимули для споживачів виробляти та споживати енергію у більш сталий спосіб.

Було запропоновано обмежену безпекою децентралізовану систему торгівлі енергією для однорангових-транзакцій і метод розподіленої оптимізації, заснований на методі множника змінного напрямку, як рішення, що зберігає конфіденційність.

Ця система дозволяє здійснювати прямі енергетичні транзакції між сусідніми споживачами в системі розподілу, підвищуючи ефективність і безпеку системи без необхідності залучення традиційних посередників. Цей метод дозволяє декільком сторонам спільно вирішувати проблему оптимізації, не обмінюючись своїми приватними даними один з одним. Ще пропонується багаторівнева торгівля енергією, а для розподілу енергії використовується метод розподілу кредитів надійності. Користувачам пропонується гнучко використовувати енергію, вироблену місцевими РДЕ, щоб зменшити нестабільність, пов'язану з ВДЕ, і максимізувати соціальний добробут. Це рішення має на меті сприяти впровадженню відновлюваних джерел енергії та підвищити надійність і ефективність торгівлі енергією в одноранговій мережі. Для оцінки надійності кожного учасника мережі використовується метод розподілу кредитів. Кредитний рейтинг базується на кількох факторах: виробництві, споживанні енергії та історії торгівлі. Учасники з вищим кредитним рейтингом мають пріоритет і отримують більше енергії, ніж учасники з нижчим рейтингом. Також було запропоновано дворівневий ринок

торгівлі енергією та розроблено метод розподіленого ринкового клірингу на основі консенсусу та подвійної декомпозиції. Перший рівень ринку торгівлі енергією складається з локальних енергетичних спільнот, які складаються з проз'юмерів. Проз'юмери виробляють надлишок енергії, який вони можуть продати іншим членам спільноти. У той же час, споживачі можуть купувати енергію у місцевої громади за нижчою ціною, ніж в енергосистемі. Другий рівень ринку складається з всеохоплюючого ринку, який об'єднує місцеві енергетичні спільноти. На цьому рівні надлишок енергії від однієї громади може бути проданий іншій громаді з більшим попитом на енергію. Цей рівень також дозволяє інтегрувати систему накопичення енергії в ринок. Для очищення ринку використовується алгоритм розподіленого консенсусу, який гарантує, що всі учасники ринку погоджуються з цінами та кількістю енергії, що торгується. Він використовується для обміну енергією між споживачами з різних регіонів і захищає конфіденційність споживачів. Ще було запропоновано цілісний підхід до торгівлі енергією, що складається з розподіленої системи прогнозованого управління. Система прогнозованого управління використовує методи аналізу даних і машинного навчання для аналізу попиту і пропозиції на енергію окремих споживачів і виробників, а потім оптимізує розподіл енергії для досягнення стабільності та ефективності на рівні системи. Розроблено нову структуру для управління фізичною взаємодією енергетичних пристроїв та визначення цінової політики для енергетичних транзакцій. Децентралізована ринкова структура, що підтримується енергетичними транзакціями. Ринкова рівновага досягається за допомогою ітерацій методу змінного напрямку на основі алгоритму мультиплікатора. Це гарантує, що ринок досягає точки рівноваги, в якій попит і пропозиція енергії однорангового ринку збалансовані, і знаходиться ринкова клірингова ціна. Цей алгоритм гарантує, що витрати та винагороди за допоміжні послуги справедливо розподіляються між учасниками мережі торгівлі енергією однорангового ринку. У ще одному дослідженні запропоновано дворівневу мережеву торгівлю енергією для декількох ММ з

обмеженнями для мережі. На верхньому рівні системний оператор реконструює розподільчу мережу на основі результатів однорангової торгівлі енергією. Алгоритм гарантує, що системний оператор знає про потоки енергії та може вжити коригувальних заходів, якщо мережа перевантажена або якщо є порушення напруги. На нижньому рівні кілька ГП використовують однорангову-торгівлю енергією для торгівлі енергією один з одним і використовують метод гри Стакельберга з кількома лідерами та кількома послідовниками для моделювання процесу торгівлі енергією між ГП. Завдяки використанню моделі однорангової торгівлі енергією, запропонований підхід усуває потребу в центральному органі влади, таким чином зменшуючи адміністративні збори та підвищуючи ефективність процесу торгівлі енергією. Крім того, запропонований підхід забезпечує більшу гнучкість у прийнятті торговельних рішень окремими ММ, що дозволяє їм реагувати на мінливі ринкові умови та вимоги споживачів. Ще дослідники запропонували керовану даними розподілену робастну модель спільної оптимізації для однорангової торгівлі енергією та мережевої експлуатації взаємопов'язаних ММ. Управління енергією на ММ використовує розподілену робастну оптимізацію та метод множника змінного напрямку як стратегію ціноутворення, що є розподіленим алгоритмом, який дозволяє децентралізувати рішення. Запропонована модель враховує індивідуальні локальні інтереси ММ та забезпечує справедливий механізм торгівлі енергією між ними.

Хоча однорангова торгівля принесла багато переваг системі розподілу електроенергії, розвиток торгівлі електроенергією все ще перебуває на ранніх стадіях і потребує вирішення низки технічних та регуляторних проблем, таких як системи обліку та розрахунків, конфіденційність та безпека даних, а також інтеграція відновлюваної енергетики в мережу. Загалом, пірингова торгівля енергією може трансформувати те, як ми виробляємо, споживаємо та торгуємо енергією, створюючи більш стійку та надійну енергетичну систему в майбутньому.

3.2 ВЕС як джерело допоміжних послуг з регулювання частоти на стороні споживання

ВЕС можуть слугувати джерелом для допоміжних послуг з регулювання частоти на основі попиту, використовуючи свої сукупні можливості для управління та диспетчеризації РДЕ. За допомогою РДЕ можна контролювати та координувати ВЕС, реагуючи на зміни частоти в енергосистемі. Це дозволяє ефективно управляти споживанням та виробництвом електроенергії з боку попиту, допомагаючи збалансувати попит та пропозицію електроенергії в режимі реального часу. ВЕС можуть брати участь у торгах на ринках допоміжних послуг, пропонуючи операторам мережі послуги з регулювання частоти, забезпечуючи додатковий потік доходів для власників РДЕ, які є частиною ВЕС. Це стимулює участь у програмах ВЕС та може призвести до збільшення використання ВДЕ в енергосистемі. Крім того, використання ВЕС для регулювання частоти на стороні попиту може також зменшити потребу традиційних електростанцій у регулюванні частоти, зменшуючи викиди та загальний вуглецевий слід. Це робить ВЕС цінним інструментом для переходу до більш сталої та справедливої енергетичної системи. ВЕС можуть брати участь в енергетичному ринку, купуючи енергію за низькими цінами, зберігаючи її в накопичувачах та продаючи надлишок енергії, регулюючи попит та вивільняючи енергію з накопичувачів, коли ціни на неї високі. На балансуєчому ринку ВЕС можуть пропонувати потужність електростанціям, які не можуть виконати свої початкові зобов'язання. На ринку допоміжних послуг ВЕС можуть надавати послуги майже в режимі реального часу.

Контроль над ринком електроенергії та допоміжними послугами поступово переходить від РДЕ до сторони попиту, що призводить до покращення загальної економіки ринку електроенергії. ВЕС об'єднують РП, ВДЕ та гнучкі навантаження в єдиний віртуальний об'єкт, який може брати участь в енергетичних ринках. Таке об'єднання РДЕ може надавати ряд допоміжних послуг, включаючи підтримку напруги, регулювання частоти та

маневровий резерв. Таким чином, впровадження допоміжних послуг в епоху розподільчих мереж стає все більш привабливим з постійним розвитком ВЕС. Це може допомогти в ефективному управлінні електромережею, сприяти зростанню ВДЕ та забезпечити переваги для споживачів у вигляді зниження витрат на електроенергію та торгівлі за принципом «рівний-рівному».

3.3 ВЕС, що складаються з взаємопов'язаних мікромереж для допоміжних послуг з регулювання частоти на основі попиту

Більшість дослідників проводять відповідні дослідження ВЕС, що складаються з РДЕ та керованих навантажень. У попередньому дослідженні ми запропонували двоетапну двошарову оптимізаційну модель ВЕС, що складається з взаємопов'язаних мікромереж з ВДЕ та системами накопичення енергії для забезпечення допоміжних послуг з регулювання частоти, а також розглянули внутрішній розподіл енергії в межах ВЕС. Загальний потік моделі показано на Рисунку 3.1

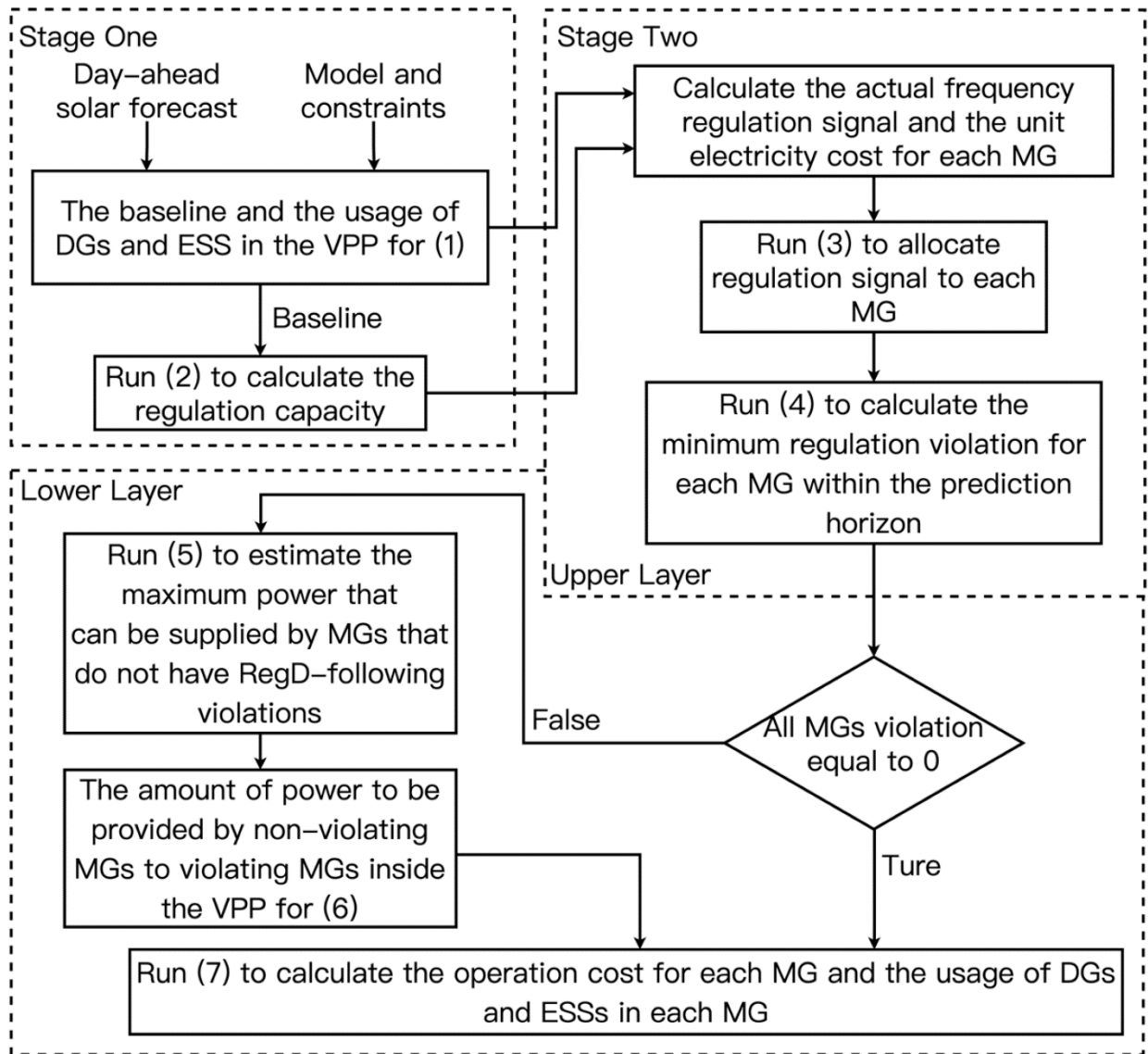


Рисунок 3.1 – Блок-схема моделі ВЕС

Перший етап передбачає прогнозування погодинної базової потужності на наступну добу та регульованої потужності, яка може бути винагороджена, відоме як планування на добу наперед. Другий етап розділений на два шари, з регулюванням потужності в реальному часі на основі сигналів динамічного регулювання. Верхній рівень розподіляє динамічні сигнали з основної мережі відповідно до ціни одиниці електроенергії кожного ММ. Потім він обмінюється електроенергією між ММ за допомогою нового механізму розподілу енергії, щоб зменшити витрати на порушення. Нижній рівень

контролює потужність кожного ММ в режимі реального часу, мінімізуючи операційні витрати. Загальна мета полягає в тому, щоб максимізувати винагороду на етапі «на добу наперед» і мінімізувати порушення на етапі реального часу, тим самим зменшуючи загальні операційні витрати ВЕС.

3.3.1 Планування на день наперед

Тут на прикладі розрахунків інженерів з Мельбурну можна спрогнозувати погодинну базову та регулюючу потужність на наступну добу, а також розрахувати потужність, яку можна зарезервувати. Верифікаційний експеримент розглядає чотири з'єднані між собою ММ.

Метою цього етапу є мінімізація загальної вартості ВЕС за формулою:

$$\min \sum_{t=1}^{24} \left[\alpha_s(t) \beta(t) + \sum_{\text{РГ}_k}^k C_k^{\text{РГ}}(t) \right] + \sum_{\text{ESS}_i}^i \gamma_{\text{ESS}} D_i^{\text{ESS}} \quad (3.1)$$

де $\alpha_s(t)$ - погодинна ціна електроенергії в основній мережі, а γ_{ESS} - додатне дійсне число та коефіцієнт витрат систем накопичення енергії.

$\beta(t)$ - представляє базову та регулюючу потужність в момент часу t ,

$C_k^{\text{РГ}}$ - вартість k -го РГ, а D_i^{ESS} - використання i -ї ESS протягом 24 годин.

Результати розрахунку показані на Рисунку 3.2:

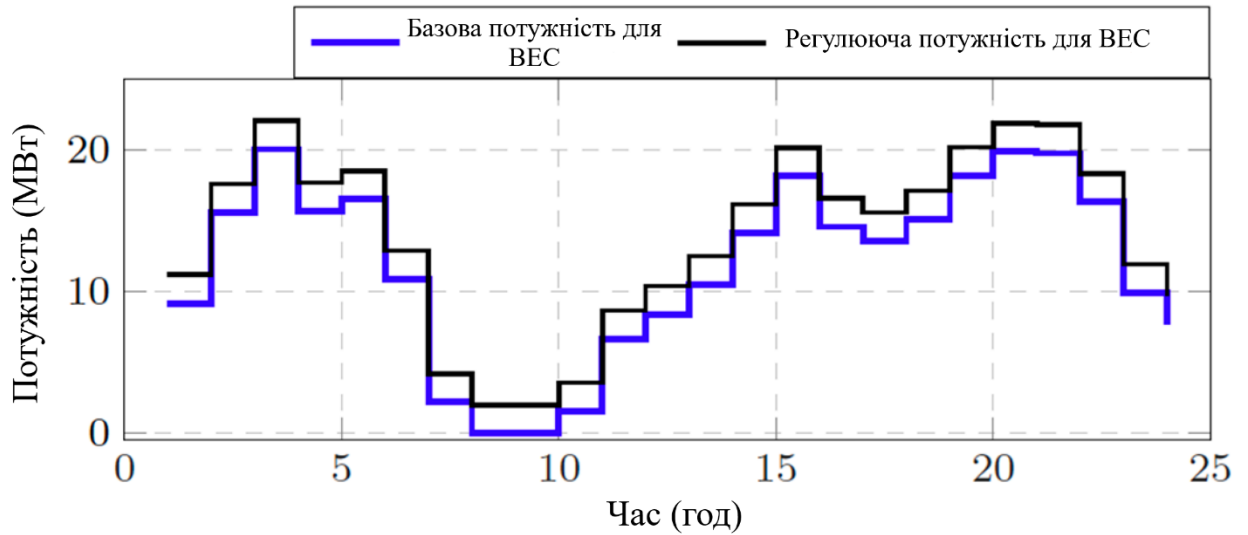


Рисунок 3.2 – Погодинна базова та регулююча потужність для ВЕС

Регулююча потужність розраховується за формулою:

$$\mathcal{R}(t) = \min\{A - \beta(t), \beta(t)\} + \sum_{ESS_i}^i P_i^{ESS,max}(t) \quad (3.2)$$

де A - максимальне енергоспоживання всіх керованих навантажень, а

$P_i^{ESS,max}$ - максимальна швидкість заряджання i -ї ESS.

3.3.2 Регулювання потужності в реальному часі

Верхній рівень: сигнал регулювання, отриманий від основної мережі, оптимально розподіляється на кожну ММ відповідно до наступного рівняння за формулою:

$$\min \sum_{j=1}^L \sum_{MM_n}^n f_n^{MM} (Reg_n^{MM}(t + j\delta)) \quad (3.3)$$

де Reg_n^{MM} - сигнал регулювання для кожного ММ, а f_n^{MM} - загальна вартість кожного ММ. Крок j - це часовий крок, а δ - час дискретизації.

Результат можна побачити на Рисунку 3.3:

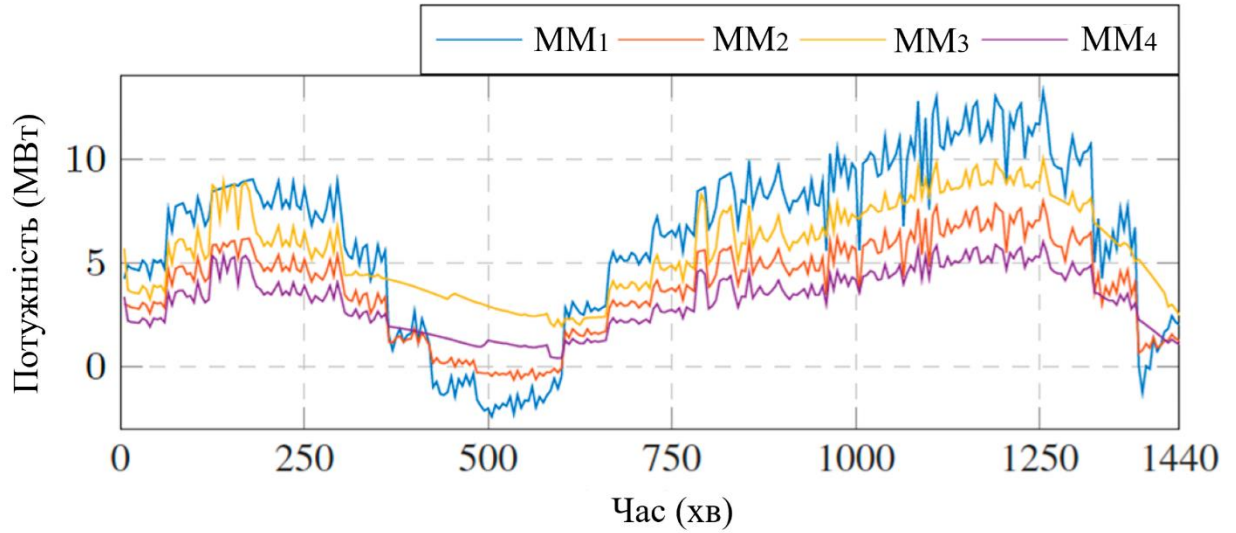


Рисунок 3.3 – Призначені Reg_n^{MM} для кожного ММ всередині ВЕС

Далі електроенергія обмінюється між ММ за допомогою нового механізму розподілу енергії, щоб зменшити втрати від припинення роботи, використовують формулу:

$$\min P_n^{vio}(t + j\delta) = \left| \sum_{PG_k}^k P_{n,k}^{PG}(t + j\delta) + \sum_{ESS_i}^i P_{n,i}^{ESS}(t + j\delta) + P_n^{solar}(t + j\delta) + Reg_n^{MM} - P_n^{load}(t + j\delta) \right| \quad (3.4)$$

де $P_{n,k}^{PG}$ - вихідна потужність k -го РГ в n -ній ММ, а $P_{n,i}^{ESS}$ - потужність заряджання або розряджання i -го ESS в n -му ММ. Терм P_n^{load} - це споживання навантаження в n -му ММ, а $P_n^{solar}(t + j\delta)$ - короткостроковий прогноз сонячної енергії

Результат можна побачити на Рисунку 3.4:

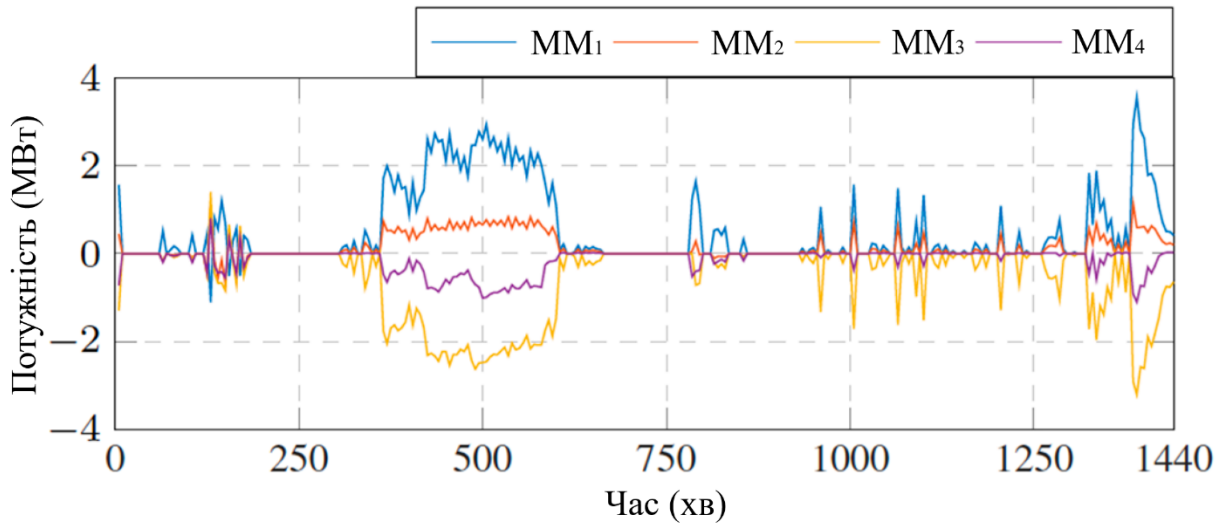


Рисунок 3.4 – Результати розподілу енергії у ВЕС

Далі ми використовуємо m та q для позначення кількості ММ з $P_n^{vio}(t + j\delta) = 0$ та $P_n^{vio}(t + j\delta) \neq 0$, відповідно. m -та ММ може надати надлишкову енергію для енергообміну:

$$\begin{aligned} \min P_m^{MM}(t + j\delta) = & \sum_{\Gamma_k}^k P_{m,k}^{\Gamma}(t + j\delta) + \sum_{ESS_i}^i P_{m,i}^{ESS}(t + j\delta) + P_m^{solar}(t + j\delta) + \\ & + Reg_m^{MM} - P_m^{load}(t + j\delta) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Розподілити надлишкову енергію для обміну наступним чином:

$$P_m^{ex}(t + j\delta) = P_m^{MM}(t + j\delta) \cdot \frac{\sum_q P_n^{vio}(t + j\delta)}{\sum_m P_m^{MM}(t + j\delta)} \quad (3.6)$$

У нижньому шарі мінімізуємо витрати на експлуатацію кожного ММ згідно цієї формули:

$$\min \sum_{j=1}^L \left[\gamma_v P_n^v(t + j\delta) + \sum_{\Gamma_k}^k C_{n,k}^{\Gamma} (t + j\delta) \right] + \sum_{ESS_i}^i \gamma_{ESS} D_{n,i}^{ESS} \quad (3.7)$$

де P_n^v - потужність відхилення n -го ММ після розподілу енергії, а γ_v - коефіцієнт вартості компенсації за порушення регулювання

Рисунок 3.5 показує криві регулювання розподілу та споживання навантаження на фоні кривої регулювання:

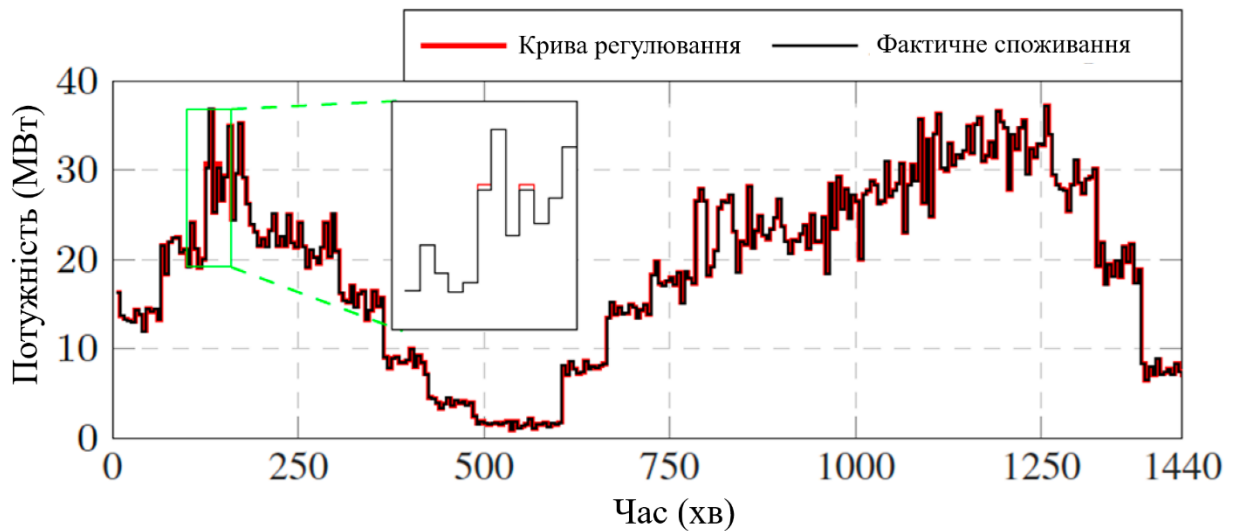


Рисунок 3.5 – Регулювання та фактичне енергоспоживання

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У розділі бакалаврської роботи розглядаються заходи з охорони праці в процесі обслуговування обладнання віртуальної електростанції, яка об'єднує в єдину мережу користувачів, мережі які генерують сонячну електроенергію, і мережі накопичувачів. На оперативно-ремонтний персонал, який здійснює заходи з підвищення енергоефективності системи електропостачання, впливають такі шкідливі виробничі фактори [1, 2]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації обладнання

4.1.1 Вимоги з безпечної організації робочих місць

Для убезпечення робіт, що їх проводить оперативно-ремонтний персонал в колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту, всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги слід постійно заземлювати [3]. За необхідності розриву кола струму вимірювальних

приладів і реле кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах.

Розривати кола, підключені до вторинної обмотки трансформатора струму, забороняється. За необхідності розриву цих кіл вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (рахуючи від трансформатора струму). Під час встановлення перемички слід застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, підключених до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки: зажими вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що до них підключаються, мають бути замкнені накоротко. Після приєднання змонтованих кіл до трансформатора струму закоротку слід переносити на найближчу збірку затискачів і знімати тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл; під час перевірки полярності до подавання імпульсів струму в первинну обмотку прилади слід приєднувати до затискачів вторинної обмотки. Забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмопровідні під час монтажних та зварювальних робіт.

Робота в колах пристроїв релейного захисту, електроавтоматики і телемеханіки (РЗАіТ) проводиться за виконавчими схемами. Під час робіт в пристроях РЗАіТ слід користуватися слюсарно-монтажним інструментом з ізолювальними рукоятками.

Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування і захисту за необхідності в приміщенні електроустановок напругою понад 1000 В дозволяється залишатися одному члену бригади за умовами роботи (наприклад, регулювання вимикачів, перевірка ізоляції); працівник, який перебуває окремо від керівника робіт, повинен мати групу III. Під час робіт в колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також відключаються автомати від вторинних обмоток.

За необхідності проведення будь-яких робіт в колах чи на апаратурі

РЗАіТ за умови ввімкненого основного обладнання слід вжити додаткових заходів щодо запобігання його випадковому відключенню. Забороняється на панелях або поблизу місця розміщення релейної апаратури провадити роботи, які викликають сильний струс релейної апаратури, що може спричинити до помилкових дій реле.

Перемикання, вмикання і вимикання вимикачів, роз'єднувачів та іншої комутаційної апаратури, пускання і зупинення агрегатів, регулювання режиму їх роботи, необхідні під час налагодження або перевірки пристроїв РЗАіТ, провадять тільки оперативні працівники.

Записувати покази електролічильників та інших вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ, дозволяється: одноособово працівникам з групою II за наявності місцевих оперативних працівників (з чергуванням двох осіб) і з групою III – без місцевих оперативних працівників; працівникам інших організацій з групою III у супроводі місцевого оперативного працівника.

Встановлення і зняття електролічильників та інших вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні провадити за нарядом зі зняттям напруги два працівники, один з яких повинен мати групу IV, а другий – групу III. За наявності в колах електролічильників контактів (блоків), що дозволяють працювати без розмикання кіл, підключених до вторинних обмоток трансформатора струму, ці роботи можна виконувати за розпорядженням, не знімаючи напруги зі схеми електролічильника. За відсутності вказаних контактів напругу і струм в колах електролічильника слід відключити.

Приєднання вимірювальних приладів, встановлення і зняття електролічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, що дають змогу безпечно закорочувати кола струму, виконуються без зняття навантаження і напруги. Встановлення і зняття електролічильників безпосереднього ввімкнення допускається провадити за розпорядженням одному працівнику з

групою III. Встановлення і зняття електролічильників, а також приєднання вимірювальних приладів виконуються зі зняттям напруги.

Роботи з електролічильниками на різних приєднаннях, розміщених в одному приміщенні, можна виконувати за одним нарядом (розпорядженням). Оформлення в наряді переходу з одного робочого місця на інше не вимагається.

4.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огороджувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;
- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;
- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки.

Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [3], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

За безпечність конструкції, правильність вибору матеріалів, якість виготовлення, а також за відповідність засобів захисту чинним в Україні нормативним документам повинні нести відповідальність керівники підприємств, установ, організацій (незалежно від форми власності), що виготовляють ці засоби захисту, орган, який видав сертифікат на виробництво та на реалізацію захисних засобів, в тому числі і засобів захисту зарубіжного виробництва.

Керівники підприємств, установ, організацій та інші посадові особи несуть персональну відповідальність за виконання вимог цих Правил у межах покладених на них завдань та функціональних обов'язків згідно з чинним законодавством. Працівників, які обслуговують електроустановки, необхідно забезпечити усіма необхідними засобами захисту, навчити правилам користування цими засобами і зобов'язати застосовувати їх для створення безпечних умов праці.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Пб	15-29	70 при 25°C	0,2-0,5
Холодний	Пб	13-23	не більш 75	не більш 0,4

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці оперативного персоналу передбачається:

- в холодну пору року – використання калорифера;
- в літню пору – застосування кондиціонерів та вентиляторів обдуву.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглецю оксид (CO)	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для підтримки допустимих значень шкідливих речовин потрібно передбачати установки або прилади зволоження та/або штучної іонізації, кондиціонування повітря.

4.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018, будівельно-монтажні роботи потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи ІІІ, підрозряд «в».

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою

світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 5.4.

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

Таблиця 5.4 – Вимоги до освітлення приміщень, що будуються

Характеристики роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Високої точності	Від 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	світлий середній темний	600	200	-	3,0

4.2.4 Виробничий шум

Шум вище гранично допустимих рівнів несприятливо діє на людину. Шум у приміщеннях широкосмуговий. Нормуємо шум на робочому місці. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях, де використовується будівельна техніка, мають відповідати вимогам СН 3223, ГОСТ 12.1.003 і наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньо геометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Виконання усіх видів робіт на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих рівнів шуму на робочих місцях потрібно застосовувати засоби звукопоглинання, вибір яких має обґрунтовуватись спеціальними інженерно-акустичними розрахунками: ширми, екрани зі звукопоглинаючих матеріалів, використання сертифікованого будівельного інструменту та індивідуальних засобів захисту.

4.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [11, 12]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [14].

Приміщення СЕС, де розташоване обладнання, за вибухонебезпечною та пожежонебезпечною відносяться до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані

(за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-ІІІ (місця, де зберігаються тверді горючі речовини). Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується ІІ ступенем вогнестійкості.

До ІІ ступеня вогнестійкості відносяться будівлі з несучими і огорожувальними конструкціями з природних та штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону із застосуванням листових та плиткових негорючих матеріалів. В покриттях будівель допускається застосовувати незахищені сталеві конструкції. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2018 наведено в таблиці 5.6.

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 5.7.

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 5.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 5.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських споруд слід приймати за таблицею 5.8 (знаменник).

Таблиця 5.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горищ і та над підвалами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (пере-городки)				плити, настини, прогони	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Таблиця 5.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбуршлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Таблиця 5.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
II	6/9	8/9	10/12

На території СЕС встановлено 25 вогнегасників ВП-5.

ВИСНОВКИ

Дослідження особливостей функціонування віртуальних електростанцій (ВЕС) в електричних мережах висвітлило їх трансформаційний потенціал у сучасному енергетичному менеджменті. Оскільки глобальний енергетичний ландшафт зміщується в бік більш стійких і децентралізованих систем, ВЕС стають ключовою технологією, яка інтегрує різноманітні розподілені джерела енергії (РДЕ) для оптимізації продуктивності мережі, підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат.

Завдяки всебічному аналізу архітектури ВДЕ, операційних стратегій та тематичних досліджень, цей диплом продемонстрував, як ВДЕ використовують передові цифрові технології, такі як IoT, ШІ та блокчейн, для організації гармонійного балансу між попитом та пропозицією енергії. ВЕС не лише сприяють ефективному використанню відновлюваних джерел енергії, але й забезпечують надійні рішення для згладжування пікових навантажень, стабілізації мережі та реагування на попит.

Дослідження підкреслило вирішальну роль нормативно-правової бази та ринкових механізмів у сприянні зростанню та масштабуванню ВЕС. Воно підкреслило, що політика підтримки, стандартизація та стимули є важливими для подолання бар'єрів, пов'язаних з інтеоперабельністю, кібербезпекою та інвестиційними ризиками.

Крім того, в цьому дипломі досліджено соціально-економічні наслідки ВЕС, проілюстровано їхній внесок у демократизацію енергетики шляхом розширення прав і можливостей споживачів та підтримки енергетичних ініціатив на рівні громад. Сприяючи місцевому виробництву та споживанню енергії, ВЕС можуть призвести до створення більш стійких та самодостатніх громад.

Отже, успішна інтеграція ВЕС в електромережі являє собою зміну парадигми в бік більш розумної, екологічної та гнучкої енергетичної системи. Оскільки технологічний прогрес продовжує розвиватися, ВЕС відіграватимуть

все більш важливу роль у досягненні глобальних цілей сталого розвитку та забезпеченні надійного постачання чистої енергії для майбутніх поколінь. Висновки, отримані в результаті цього дослідження, створюють міцну основу для подальших досліджень та інновацій у сфері віртуальних електростанцій, прокладаючи шлях до більш ефективного та стійкого енергетичного майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liu, J.; Yu, S.S.; Hu, H.; Zhao, J.; Trinh, H. Demand-side regulation provision of virtual power plants consisting of interconnected microgrids through double-stage double-layer optimization. *IEEE Trans. Smart Grid* 2022, *14*, 1946–1957
[Електронний ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9873993>
2. Wang, Z.; Chen, B.; Wang, J.; Chen, C. Networked microgrids for self-healing power systems. *IEEE Trans. Smart Grid* 2016, *7*, 310–319.3
[Електронний ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7127033>
4. The National Solar Radiation Database (NSRDB)
[Електронний ресурс]. URL: <https://nsrdb.nrel.gov/>
5. Baños, R.; Manzano-Agugliaro, F.; Montoya, F.G.; Gil, C.; Alcayde, A.; Gómez, J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, *15*, 1753–1766
[Електронний ресурс]. URL:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032110004430>.
6. Martinez-Frias, J.; Aceves, S.M.; Ray Smith, J.; Brandt, H. A Coal-Fired Power Plant with Zero-Atmospheric Emissions. *ASME J. Eng. Gas Turbines Power* 2008, *130*, 023005
[Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2771255>.
7. Zhao, J.; Patwary, A.K.; Qayyum, A.; Alharthi, M.; Bashir, F.; Mohsin, M.; Hanif, I.; Abbas, Q. The determinants of renewable energy sources for the fueling of green and sustainable economy. *Energy* **2022**, *238*, 122029
[Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122029>
8. Glasnovic, Z., Margeta, K., Premec, K.: ‘Could key engine, as a new open-source for res technology development, start the third industrial revolution?’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, *57*, pp. 1194–1209
[Електронний ресурс].
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501535X>

9. Ritchie, H.; Roser, M.; Rosado, P. Energy. Published Online at Our World in Data. 2022

[Електронний ресурс]

URL: <https://ourworldindata.org/renewable-energy#citation>.

10. Zhang, G.; Jiang, C.; Wang, X. Comprehensive review on structure and operation of virtual power plant in electrical system. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2019, 13, 145–156

[Електронний ресурс]

URL: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5880>.

11. Guney, M.S.; Tepe, Y. Classification and assessment of energy storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 75, 1187–1197

[Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102>

12. Zhang, G.; Yuan, J.; Li, Z.; Yu, S.S.; Chen, S.; Trinh, H.; Zhang, Y. Forming a Reliable Hybrid Microgrid Using Electric Spring Coupled With Non-Sensitive Loads and ESS. *IEEE Trans. Smart Grid* 2020, 11, 2867–2879

[Електронний ресурс]

URL: <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2970486>

13. Пасло Нікіта, Сікорська Олена «Особливості функціонування віртуальних електростанцій в електричних мережах». Матеріали конференції «Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2024)». Секція «Електричних станцій та систем», Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

[Електронний ресурс]. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/20731/17433>

14. Пасло Нікіта, Малогулко Юлія, Ластівка Вікторія «Дослідження функціонування віртуальних електростанцій». Матеріали конференції «Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2023)». Секція «Електричних станцій та систем», Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

[Електронний ресурс]. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/18509/15330>

15. Asmus, P. Microgrids, Virtual Power Plants and Our Distributed Energy Future. *Electr. J.* 2010, 23, 72–82

[Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2010.11.001>

16. Cheng, H., Gao, Y., Zhang, J., *et al.*: ‘The power system multi-objective optimization dispatching containing virtual power plant’. Int. Conf. on Power System Technology, Chengdu, China, 2014, pp. 3316–3321

[Електронний ресурс].

URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6993875>

17. Peik-Herfeh, M., Seifi, H., Sheikh-El-Eslami, M.K.: ‘Decision making of a virtual power plant under uncertainties for bidding in a day-ahead market using point estimate method’, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2013, 44, (1), pp. 88–98

[Електронний ресурс].

URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061512003766>

18. Bao, Z., Zhou, Q., Yang, Z., *et al.*: ‘A multi time-scale and multi energy-type coordinated microgrid scheduling solution – part II: optimization algorithm and case studies’, *IEEE Trans. Power Syst.*, 2015, 30, (5), pp. 2267–2277

[Електронний ресурс].

URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6967873>

19. Aabrandt, A., Andersen, P.B., Pedersen, A.B., *et al.*: ‘Prediction and optimization methods for electric vehicle charging schedules in the EDISON project’. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Washington, DC, USA, 2012, pp. 1–7

[Електронний ресурс].

URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6175718>

20. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості

трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

21. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

22. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

23. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

24. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

25. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

26. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

27. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

28. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

29. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

30. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

31. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

32. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
33. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
34. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
35. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>

Додаток А

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА
НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬНазва роботи: Особливості функціонування віртуальних електростанцій в електричних мережахТип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки
(кафедра, факультет)

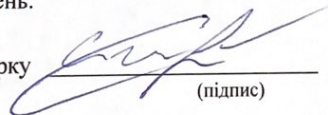
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 96,6 % Схожість 3,4 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

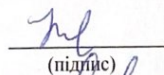
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Вишневецький С.Я.
(прізвище, ініціали)

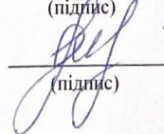
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Пасло Н.О.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Сікорська О.В.
(прізвище, ініціали)

Додаток Б
Ілюстративна частина

Бакалаврська дипломна робота

Особливості функціонування віртуальних електростанцій в електричних мережах

Виконав: ст. групи 2ЕЕ-20Б Пасло Н.О.

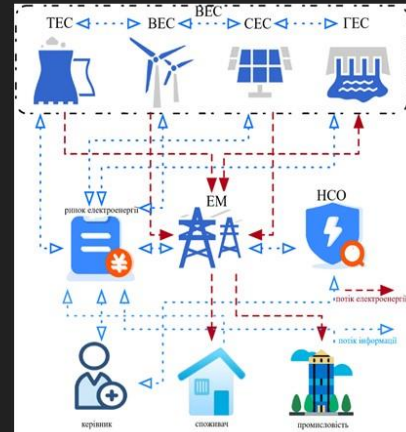
Керівник: к.т.н, старший викладач Сікорська О.В

Вступ

- Стрімка еволюція енергетичних систем в останні роки призвела до появи інноваційних концепцій, покликаних підвищити ефективність, надійність і стійкість електромереж. Однією з таких трансформаційних концепцій є віртуальна електростанція (ВЕС). Віртуальна електростанція об'єднує потужності різних децентралізованих енергоресурсів, таких як сонячні панелі, вітрогенератори та акумуляторні системи, для роботи в якості єдиної електростанції. Така інтеграція дозволяє оптимізувати виробництво, розподіл і споживання енергії, відіграючи таким чином вирішальну роль у сучасному управлінні енергією.

Поняття ВЕС

- Концепція віртуальних електростанцій (ВЕС) виникла на основі концепції віртуальної комунальної послуги, запропонованої Авербухом та Престоном у 1997 році. Визначена як гнучка співпраця між комунальними підприємствами, вона дозволяє окремим учасникам надавати високоефективні енергетичні послуги споживачам шляхом віртуального спільного використання їхньої приватної власності, що не тільки підвищує індивідуальну ефективність використання, але й дозволяє уникнути надлишкового виробництва. Розширюючи початкове визначення віртуальної корисності, концепція ВЕС фокусується на віртуальній агрегації розподілених джерел енергії (РДЕ), які в основному залежать від математичної комбінації різних кривих вартості енергоресурсів

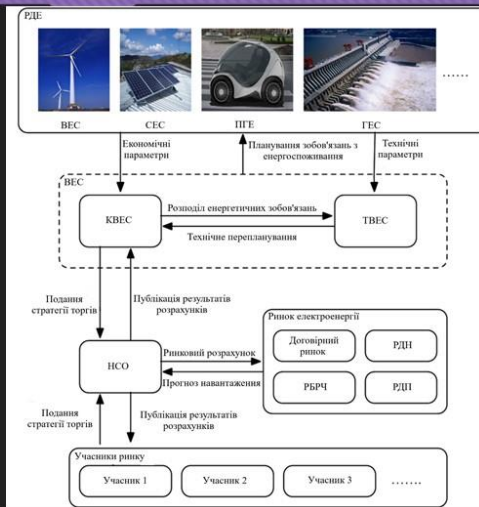


Структура ВЕС

Внутрішній контроль ВЕС

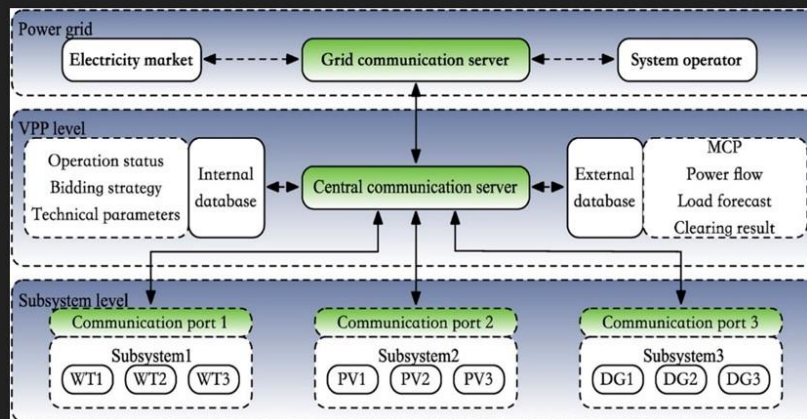
- На основі концепції ВЕС, належний метод внутрішнього енергетичного управління формує основу економічної діяльності ВЕС. Для того, щоб бути репрезентативним учасником ринку електроенергії, інтеграція РДЕ та відповідні методи управління привертають увагу численних наукових досліджень.
- З точки зору моделей контролю ВЕС, методи внутрішнього управління можна розділити на три групи:
 - централізоване управління - надає ВЕС абсолютну владу над управлінням. ВЕС створює центр координації управління, який гарантує собі абсолютні повноваження щодо диспетчеризації всіх інтегрованих РДЕ.
 - розподілене управління - на відміну від централізованого методу управління, структура розподіленого методу управління досягається шляхом поділу ВЕС на два незалежні рівні. Перший рівень - це центральний рівень зв'язку, яким керує ВЕС, а другий - рівень незалежної підсистеми, яким керують зацікавлені учасники генерації.
 - комплексне - цей метод поєднує в собі характеристики централізованого та розподіленого контролю. Комплексний метод управління можна розділити на два підрівні управління, при цьому всі підрівні тісно пов'язані між собою центром управління ВЕС.

Централізоване управління

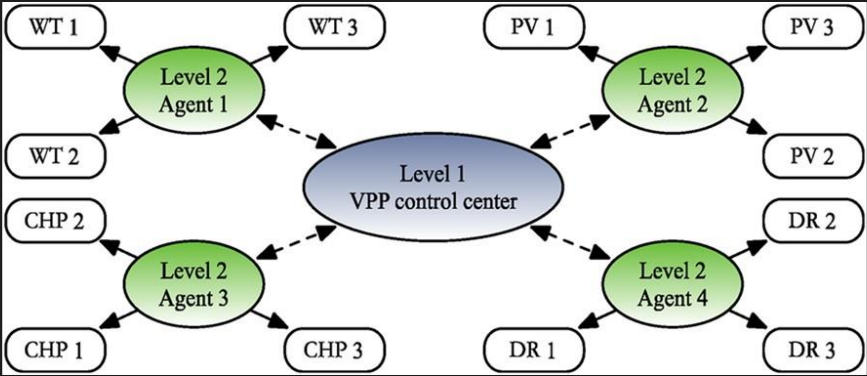


- 1.РДЕ – розподілені джерела енергії;
- 2.ВЕС – вітрові електростанції;
- 3.СЕС – сонячні електростанції;
- 4.ПГЕ - гібридний електромобіль з підзарядкою;
- 5.ГЕС - гідроелектростанція;
- 6.КВЕС – комерційна віртуальна електростанція;
- 7.ТВЕС – технічна віртуальна електростанція;
- 8.НСО – незалежний системний оператор;
- 9.РДН - Ринок на добу наперед;
- 10.РБРЧ - Ринок балансування в реальному часі;
- 11.РДП – ринок допоміжних послуг;

Розподілене управління



Комплексне управління



Порівняння методів управління

Тип управління	Повноваження ВЕС	Позиція на ринку	Обчислювальне навантаження	Функція центру управління ВЕС	Сумісність з РДЕ	Конкурентоспроможність на ринку
Централізований метод	повний контроль	ціноутворювач	великі та концентровані	централізований зв'язок та обчислення	складні та необхідні оновлення алгоритмів	дуже конкурентоспроможний
Комплексний метод	частковий контроль	переважно ціноутворювач	нормальний і частково розподілений	централізований зв'язок і часткові обчислення	звичайні з деякими необхідними модифікаціями	конкурентоспроможний
Розподілений метод	самоконтроль	переважно ціноутворювач	повністю розподілений	тільки комунікація	гнучкі та відкриті для доступу	менш конкурентоспроможний

Відмінності ВЕС від ММ

Короткий опис	ВЕС	ММ
Існують лише у формі підключення до мережі.	✓✓	×× (Або поза мережею.)
Може мати або не мати системи накопичення енергії.	✓✓	×× (Потребують систем накопичення енергії)
Можуть ізолювати себе від більшої публічної мережі як надзвичайний захід.	××	✓✓
Покладаються на розумні лічильники та інформаційні технології.	✓✓	×× (Покладайтеся в основному на обладнання)
Об'єднує та координує різноманітні ресурси на більшій географічній території.	✓✓	×× (Включає лише набір статичних ресурсів в обмеженому географічному розташуванні)
Торгує електроенергією з роздрібними та оптовими продавцями.	✓✓	×× (Тільки торгує на рівні роздрібної торгівлі)

Субринки електроенергії

- Виходячи з товарної характеристики електроенергії, ринки електроенергії можна поділити на три основні субринки:

РДН - процедура розрахунків на РДН, спрямована на планування генерації, що має важливе значення для роботи енергосистеми

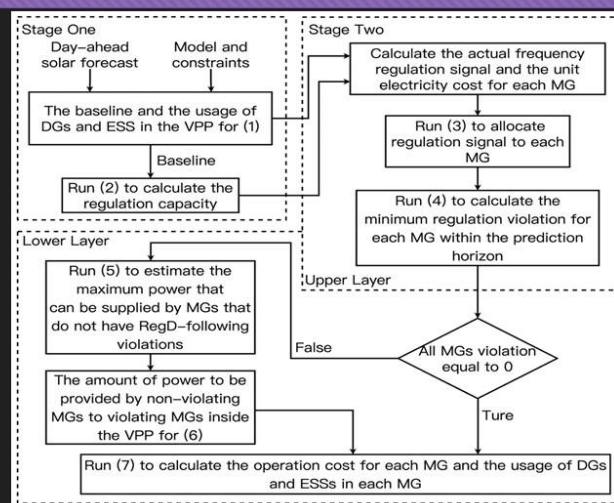
РБРЧ - забезпечення регулювання потужності в режимі реального часу для компенсації відхилення потужності

РДП – ринок всіх форм допоміжних послуг таких як зняття пікових навантажень та перерозподіл навантаження

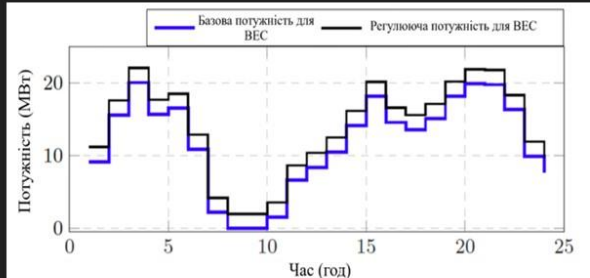
ВЕС як джерело допоміжних послуг з регулювання частоти на стороні споживання

- ВЕС можуть слугувати джерелом для допоміжних послуг з регулювання частоти на основі попиту, використовуючи свої сукупні можливості для управління та диспетчеризації РДЕ. За допомогою РДЕ можна контролювати та координувати ВЕС, реагуючи на зміни частоти в енергосистемі. Це дозволяє ефективно управляти споживанням та виробництвом електроенергії з боку попиту, допомагаючи збалансувати попит та пропозицію електроенергії в режимі реального часу.

Блок-схема моделі ВЕС



Результати розрахунків



Погодинна базова та регулююча потужність для ВЕС

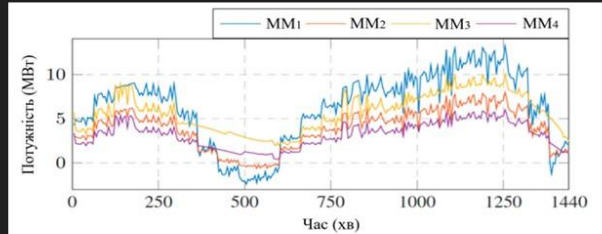
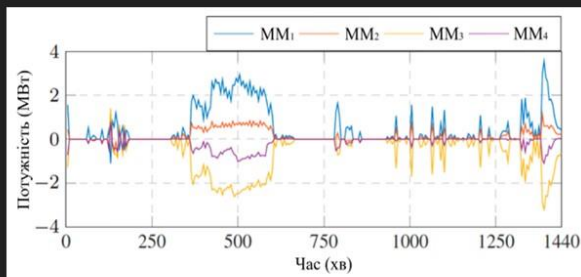


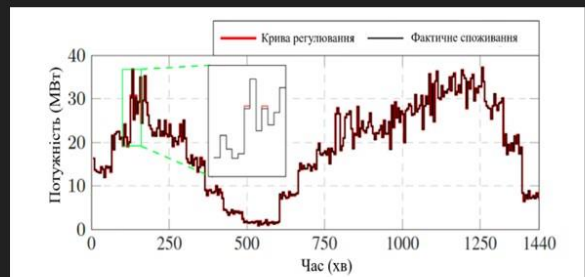
Рисунок 3.3 – Призначені Reg_n^{MM} для кожного MM всередині ВЕС

Призначені сигнали регулювання для кожного MM всередині ВЕС

Результати розрахунків



Результати розподілу енергії ВЕС



Регулювання та фактичне енергоспоживання

