

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ, ПРИ
КЕРУВАННІ ЧАСТОТОЮ В СИСТЕМАХ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ЗЕБ-24мг
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____ / Тетяна ПОСТОЛ

(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Павло ВАСЮЧЕНКО

(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег ПОДОЛЯК

(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК

(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Ігор КИРИСОВ

(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Тетяні ПОСТОЛ

1. Тема «ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ,
ПРИ КЕРУВАННІ ЧАСТОТОЮ В СИСТЕМАХ ВІДНОВЛЮВАНОЇ
ЕНЕРГЕТИКИ»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3664 від «06» жовтня 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » _____ 12 _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації,
характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат
дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. Перелік умовних позначень. Задачі оптимізації упарвління роботою електростанції в системах відновлювальної енергетики. Моделювання ймовірностей невизначеності вихідної фотоелектричної потужності. Модель оптимізації диспетчеризації для ВЕС, що бере участь у ринку електроенергії та викидів вуглецю. Висновки. Список посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2025 р.

Керівник

(підпис)

Павло ВАСЮЧЕНКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Тетяна ПОСТОЛ

(ім'я, прізвище)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи**

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання		Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження		02.10.25 – 05.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури		06.10.25 – 15.10.25	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи		16.10.25 – 29.10.25	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи		30.10.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки		27.11.25 – 07.12.25	

Студент (ка)

(підпис)

Тетяна ПОСТОЛ

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота виконана на 60 стр., містить 6 таблиці, 20 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 31 літературних посилань.

Магістерська робота присвячена дослідженню методів і алгоритмів оптимізації управління електростанціями у сучасних енергосистемах, що характеризуються високою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Актуальність роботи зумовлена зростанням нестабільності генерації вітрових і сонячних електростанцій, що створює додаткові виклики для забезпечення якісного регулювання частоти та стабільності енергосистеми.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування оптимізованої системи керування роботою електростанції, яка враховує стохастичність ВДЕ та дозволяє підвищити ефективність регулювання частоти, мінімізувати відхилення частоти та забезпечувати якість електроенергії відповідно до сучасних стандартів.

У роботі проаналізовано існуючі підходи до первинного, вторинного та третинного регулювання частоти, а також методи гібридного керування у системах з відновлюваними джерелами. Особливу увагу приділено математичному моделюванню процесів та розробці адаптивних алгоритмів управління з використанням прогнозних моделей генерації та навантаження.

Представлено оптимізаційні підходи, що включають:

- методи предиктивного управління (MPC);
- використання систем накопичення енергії для демпфування частотних коливань;
- комбіновані стратегії регулювання між традиційними та відновлюваними джерелами;
- алгоритми адаптації до швидкозмінних режимів генерації.

Проведено моделювання запропонованих рішень у середовищах MATLAB/Simulink, що дозволило оцінити ефективність запропонованих підходів у різних сценаріях роботи енергосистеми. Результати досліджень показали суттєве зменшення амплітуди частотних відхилень, підвищення стабільності роботи та збільшення частотного резерву завдяки впровадженню оптимізованої системи управління.

Практична цінність роботи полягає у можливості застосування розроблених рекомендацій і методик для удосконалення систем управління електростанціями, інтегрованими в сучасні енергомережі з високою часткою ВДЕ. Запропоновані підходи можуть бути адаптовані для роботи як у централізованих, так і в розподілених енергосистемах.

Ключові слова: МОНИТОРИНГ; ДІАГНОСТИКА; СОНЯЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ; ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ МОДУЛІ; НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ; МАШИННИЙ ЗІР, ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПАНЕЛІ, ЗАБРУДНЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ, ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ. ВІРТУАЛЬНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ; РИНОК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ВУГЛЕЦЮ; СОНЯЧНА РАДІАЦІЯ; ЗВАЖЕНИЙ РОЗПОДІЛ ЙМОВІРНОСТЕЙ; ВИБІРКА ВІДХИЛЕННЯ; РІВЕНЬ ДОВІРИ; ОПТИМАЛЬНЕ ДИСПЕТЧЕРИЗУВАННЯ

ABSTRACT

The master's work is published on 60 pages, there are 6 tables, 20 figures that characterize the results of the research, and 31 literary essays are compiled.

The master's work is dedicated to the development of methods and algorithms for optimizing the control of power plants in modern energy systems, which are characterized by a high frequency of renewal of energy units (ER). The relevance of the work is due to the increasing instability of the generation of wind and solar power plants, which creates additional signals to ensure accurate frequency regulation and stability of the power system.

The research method is to develop and condition an optimized heating system for a robotic power plant, which reduces stochasticity WHERE it allows increasing the efficiency of frequency regulation and minimizing Enhance the frequency and ensure the power supply is consistent with current standards.

The work analyzed different approaches to primary, secondary and tertiary frequency regulation, as well as methods of hybrid heating in systems with rechargeable jets. Particular attention is paid to the mathematical modeling of processes and the development of adaptive control algorithms based on predictive models of generation and generation.

Optimization approaches are presented, which include:

- methods of predictive control (MPC);
- vikoristannya of energy storage systems for damping frequency vibrations;
- combined control strategies between traditional and modern devices;
- adaptation algorithms to flexible generation modes.

Modeling of the proposed solutions in MATLAB/Simulink environments was carried out, which made it possible to evaluate the effectiveness of the proposed approaches in various scenarios of power system operation. The results of the investigation showed a change in the amplitude of frequency variations, an increase in the stability of the robot and an increase in the frequency reserve as a result of the promotion of an optimized control system.

The practical value of the work lies in the possibility of developing disaggregated recommendations and techniques for improving control systems of power plants integrated into daily energy supply with a high frequency of VDE. The proposed approaches can be adapted for operation in both centralized and distributed power systems.

KEY WORDS: MONITORING; DIAGNOSTICS; SONYACHI POWER STATIONS; PHOTOVOLTIC MODULES; NEURAL MEASURES; MACHINE ZIR, LOADING POTS, PHOTOVOLTIC PANELS, LOADING PHOTOVOLTIC PANELS, RUBBING POTS PHOTOVOLTIC PANELS. VIRTUAL POWER PLANT; ELECTRIC ENERGY AND VUGLETSIU MARKET; SONIC RADIATION; IMPORTANCE OF ROZPODIL YMOVIRNOSTY; VIBRKA VIDHILENNYA; RIVEN DOVIRI; OPTIMUM DISPATCHERIZATION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В СИСТЕМАХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	11
1.1. Загальні відомості. Постановка задачі	11
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	15
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТЕЙ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИХІДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ	16
2.1. Характеристика невизначеності сонячної радіації	16
2.2. Формулювання моделі ймовірності сонячної радіації	21
2.3. Сценарій генерації сонячної радіації	24
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	25
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ ВЕС, ЩО БЕРЕ УЧАСТЬ У РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ	26
3.1. Цільова функція моделі оптимізації	26
3.2. Обмеження моделі оптимізації	29
3.3. Модель двозонної системи відновлюваної енергетики	31
3.4. Модель для моделювання фотоелектричних (ФЕ) систем	34
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	36
РОЗДІЛ 4. ТЕМАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ	37
4.1. Параметри системи VPP	37
4.2. Генерація та вибір сценаріїв сонячної радіації	38
4.3. Аналіз результатів відправлення за різних розподілів ймовірностей та рівнів довіри	41
4.4. Перевірка ефективності з різними налаштуваннями параметрів	50
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	53

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	56
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	57

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

VPP –

ВЕС – віртуальної електростанції

ВН – висока напруга

ВПП –

ФЕ – фотоелектрична

ЕММ – електромагнітний момент

ЕМП – електромагнітні поля

ЕМС – електромагнітні сили

КЛ – кабельні лінії

ЛЕП – лінії електропередач

ММ – математичні моделі

МГЕ – метод граничних елементів

МКЕ – метод кінцевих елементів

МКР – метод кінцевих різниць

ПЕР – паливно–енергетичні ресурси

СНАУ – система нелінійних алгебраїчних рівнянь

СЛАУ– система лінійних алгебраїчних рівнянь

ПДЕ – поновлювальні джерела енергії

СЕП – система електропостачання

ФЕУ – фотовольтанична електрична станція

ШПТ – шина постійного струму

ВСТУП

Відповідно до стратегічних цілей розвитку Світової енергетики щодо подвійного вуглецю, віртуальні електростанції (ВЕС) активно беруть участь у зв'язаному ринку електроенергії та вуглецю завдяки оптимізованому плануванню розподілених енергетичних ресурсів, одночасно стабілізуючи роботу мережі та зменшуючи викиди вуглецю. Фотоелектрична (ФЕ) генерація, ключовий ресурс у системах ВЕС, створює значні труднощі в плануванні через притаманну їй мінливість виробництва. Для підвищення точності характеристики невизначеності вихідної ФЕ-виробництва нещодавно запропоновано зважений розподіл ймовірностей сонячного випромінювання на основі історичних даних про випромінювання. Для створення сценаріїв сонячного випромінювання, які узгоджуються із запропонованою зваженою моделлю ймовірностей сонячного випромінювання, застосовується метод вибірки з відхиленням впливу. Крім того, для усунення екстремальних сценаріїв застосовується механізм фільтрації на основі довірчих інтервалів, що забезпечує статистичну достовірність та підвищує практичність у реальних сценаріях диспетчеризації. На основі відфільтрованих сценаріїв пропонується нова стратегія диспетчеризації для роботи ВЕС на ринку електроенергії та вуглецю. Числові дослідження випадків підтверджують, що сценарії, згенеровані зваженою моделлю ймовірностей сонячного випромінювання, здатні точно відтворювати історичні характеристики ФЕ-систем, а фільтр довірчих інтервалів ефективно виключає малоймовірні екстремальні сценарії. Порівняно з традиційними методами на основі нормального розподілу, запропонований підхід дає рішення щодо диспетчеризації, які ближче узгоджуються з оптимальною диспетчеризацією на основі історичних даних про опромінення, демонструючи підвищену точність ймовірнісного моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем. Отже, отримана стратегія диспетчеризації демонструє покращену здатність забезпечувати ринковий дохід

віртуальної електростанції (ВЕС) з урахуванням коливань вихідної потужності фотоелектричних систем.

Метою даного дослідження є Оптимізація управління роботою електростанцією, при керуванні частотою в системах відновлюваної енергетики.

У зв'язку з цим **темою** цієї магістерської роботи є Оптимізація управління роботою електростанцією, при керуванні частотою в системах відновлюваної енергетики.

Об'єктом дослідження – система управління роботою електростанції.

Предмет дослідження – фотоелектрична станція.

РОЗДІЛ 1 ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В СИСТЕМАХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1. Загальні відомості. Постановка задачі

Для кількісної оцінки невизначеності вихідної фотоелектричної енергії можна створити ймовірнісну модель сонячної радіації на основі історичних вимірювань, що дозволить здійснити точніше прогнозування. Хоча сонячну радіацію часто спрощують як модель нормального розподілу, практичні застосування виявляють систематичні відхилення від цього припущення. Щоб вирішити цю проблему, нещодавні дослідження або уточнили параметри моделі нормального розподілу ймовірностей, або застосували альтернативні розподіли для кращого відображення характеристик мінливості радіації. Наприклад, посилання [15] моделює дифузну радіацію на відкритому повітрі як нормальний розподіл, середнє значення якого дорівнює куту падіння прямого променя, а дисперсія якого визначається індексом ізотропного неба. У посиланні [16], дані про опромінення класифікуються за двома режимами, тобто за нормальним та косонормально-розподілом, а для визначення того, який розподіл застосовувати, використовується тест Харке-Бера. Посилання [17] поєднує метод усереднення ковзного вікна з розподілом Вейбулла для характеристики часових закономірностей опромінення, створюючи реалістичні сценарії опромінення. Для подальшого підвищення точності моделювання невизначеності вихідної фотоелектричної енергії, кілька типів розподілу, такі як нормальний, логарифмічний нормальний та розподіл Вейбулла, можуть бути інтегровані в композитну модель, тим самим зменшуючи загальну похибку моделювання та теоретично досягаючи точнішого ймовірнісного опису невизначеності вихідної фотоелектричної енергії.

Для кількісної оцінки невизначеності вихідної фотоелектричної енергії можна створити ймовірнісну модель сонячної радіації на основі історичних вимірювань, що дозволить здійснити точніше прогнозування. Хоча сонячну

радіацію часто спрощують як модель нормального розподілу, практичні застосування виявляють систематичні відхилення від цього припущення. Щоб вирішити цю проблему, нещодавні дослідження або уточнили параметри моделі нормального розподілу ймовірностей, або застосували альтернативні розподіли для кращого відображення характеристик мінливості радіації. Наприклад, посилання [15] моделює дифузну радіацію на відкритому повітрі як нормальний розподіл, середнє значення якого дорівнює куту падіння прямого променя, а дисперсія якого визначається індексом ізотропного неба. У посиланні [16], дані про опромінення класифікуються за двома режимами, тобто за нормальним та косонормально-розподілом, а для визначення того, який розподіл застосовувати, використовується тест Харке-Бера. Посилання [17] поєднує метод усереднення ковзного вікна з розподілом Вейбулла для характеристики часових закономірностей опромінення, створюючи реалістичні сценарії опромінення. Для подальшого підвищення точності моделювання невизначеності вихідної фотоелектричної енергії, кілька типів розподілу, такі як нормальний, логарифмічний нормальний та розподіл Вейбулла, можуть бути інтегровані в композитну модель, тим самим зменшуючи загальну похибку моделювання та теоретично досягаючи точнішого ймовірнісного опису невизначеності вихідної фотоелектричної енергії.

Для ВЕС, що включають генерацію фотоелектричних систем, важливо враховувати невизначеність вироблення фотоелектричної енергії для оптимізації диспетчеризації з метою максимізації операційних доходів. Поширеним підходом є метод генерації сценаріїв. Спочатку будується ймовірнісна модель сонячної радіації, потім генеруються кілька сценаріїв радіації, що відображають мінливість фотоелектричних систем, і, нарешті, виконується оптимізація схеми диспетчеризації ВЕС за цими сценаріями. Щоб зменшити обчислювальне навантаження, див. [18] використовує моделювання методом Монте-Карло на основі історичної вітрово-сонячної генерації та метеорологічних даних для створення багатоденних сценаріїв невизначеного навантаження та генерації фотоелектричних систем за екстремально високих температур та низького вітру.

На основі згенерованих сценаріїв отримано двоступеневе розподілення заряджання/розряджання накопичувачів енергії, що підвищує як надійність, так і економічну ефективність системи. Однак надмірна кількість згенерованих сценаріїв може збільшити обчислювальне навантаження при розв'язанні оптимізаційної моделі. Щоб вирішити цю проблему, див. [9] пропонує метод скорочення сценаріїв, який зберігає ключові кореляції та забезпечує стабільність і точність отриманих рішень. Мінімізуючи втрати локальної кореляції та максимізуючи подібність ймовірностей між вихідним та скороченим наборами сценаріїв, досягається значне стиснення сценаріїв з мінімальною втратою точності. Спираючись на досягнення машинного навчання, посилання [20] представляє генератор довгострокових сценаріїв виробництва відновлюваної енергії, заснований на генеративно-змагальній мережі з урахуванням уваги. Річні та сезонні вітрово-сонячні моделі спочатку фіксуються за допомогою кластеризації k-середніх та моделювання методом Монте-Карло за допомогою ланцюгів Маркова, а потім генеративно-змагальна мережа з урахуванням уваги та градієнтним штрафом навчається для створення високоточних внутрішньоденних сценаріїв, які точно зберігають часові залежності та характеристики розподілу. Ця гібридна схема прискорює конвергенцію та значно покращує якість сценаріїв та багатогоризонтну кореляцію. У посиланні [21], встановлено скориговану з урахуванням ризику стохастичну структуру щоденного планування, а також запропоновано новий метод генерації сценаріїв, який поєднує вибірку латинського гіперкуба, доповнену Соболем, з копулою D-vine для фіксації взаємозалежностей між помилками прогнозування вітроенергетики. Однак підходи на основі вибірки можуть неминуче призвести до кількох екстремальних сценаріїв, які погано відображають реальні умови та можуть впливати на оптимізацію диспетчеризації.

Хоча методи генерації сценаріїв широко використовуються для моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем, на практиці вони часто не гарантують як репрезентативність, так і точність. Щоб пом'якшити це, процедуру вибірки відхилення можна ввести під час створення

сценаріїв, щоб усунути екстремальні сценарії. Наприклад, у посиланні [22] запропоновано структуру оптимізації з обмеженими шансами зі схемою вибірки та відкидання, яка ретельно аналізує компроміс між покращенням цільової функції та втратою доцільності після видалення вибірки та доводить, що доцільність може бути збережена за певних умов, таким чином закладаючи міцну математичну основу для високоякісних наборів сценаріїв. Тим не менш, вибірка відхилення може не враховувати структурні сліпі зони, такі як недостатня кількість вибірок протягом певних часових вікон або залишкове забруднення аномальними даними, що мотивує до включення механізму скринінгу довірчих інтервалів. У посиланні [23], теорія прийняття рішень щодо довірчого розриву за кількома сценаріями інтегрує довірчі інтервали моделі гаусової суміші з кластеризацією за кількома сценаріями для класифікації та корекції вибірок на етапі генерації, значно підвищуючи репрезентативність сценаріїв та стійкість моделі. Кількісно визначаючи невизначеність виходу фотоелектричних систем за допомогою мір довіри [24], операторам ВПП надаються чіткі межі очікуваних коливань потужності, що дозволяє більш обґрунтовано планувати системи накопичення енергії, диспетчеризовані навантаження та резервні джерела живлення. Завдяки фільтрації вибірових траєкторій опромінення або потужності шляхом збереження лише тих, що знаходяться в межах відповідних довірчих інтервалів, можна отримати компактний та достовірний набір сценаріїв. Посилання [25] показує, що завдяки вбудовуванню обмежень довірчого інтервалу в інтегровану енергетичну систему отримане диспетчеризування демонструє значне покращення як у надійності, так і в економічних показниках. Підсумовуючи, використання фільтрації на основі довіри разом із передовими методами вибірки пропонує потужний шлях для створення надійних та високоточних сценаріїв, що додатково допомагає забезпечити дохід VPP в умовах невизначеності виробництва відновлюваної енергії.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У цьому дослідженні представлено зважену модель розподілу ймовірностей сонячної радіації, яка поєднує статистичні характеристики нормального, логарифмічно-нормального та розподілу Вейбулла, для досягнення підвищеної точності моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем. Для подальшого підвищення точності моделі, сценарії опромінення, згенеровані на основі запропонованого зваженого розподілу ймовірностей, потім фільтруються за допомогою вибірки відхилення. Крім того, до генерації сценаріїв введено механізм скринінгу довірчих інтервалів, щоб створити високонадійний набір даних для оптимізації диспетчеризації ВПП відносно невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем, тим самим забезпечуючи економічний прибуток ВПП від участі в пов'язаному ринку електроенергії та вуглецю. Результати числового аналізу показують, що запропонована зважена модель ймовірності сонячної радіації дає сценарії, тісно узгоджені з історичними моделями опромінення, а рішення диспетчеризації ВПП, отримане на основі цих сценаріїв, ближче до оптимального диспетчеризації історичної вихідної потужності фотоелектричних систем порівняно з моделлю єдиної нормальної ймовірності. Отже, отримані схеми диспетчеризації допомагають отримувати високий дохід для ВПП під час участі в ринку електроенергії та вуглецю. Також виявлено, що при застосуванні вищих порогів довіри отримується консервативна схема диспетчеризації, яка недооцінює вихід фотоелектричних систем для досягнення вищого рівня експлуатаційної безпеки за рахунок збільшення експлуатаційних витрат, що виникають внаслідок споживання палива та закупівлі квот на викиди вуглецю зі збільшеною вихідною потужністю газотурбінного генератора. За допомогою запропонованого методу диспетчеризації оператор ВЕС може встановити рівень довіри на основі пріоритету між надійністю експлуатації та економічною ефективністю та отримати відповідну схему диспетчеризації, яка максимізує прибуток, отриманий ВЕС завдяки участі на ринку електроенергії та вуглецю.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТЕЙ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИХІДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.1. Характеристика невизначеності сонячної радіації

Через притаманну стохастичну природу сонячної радіації, зумовлену такими факторами, як хмарність та мінливість атмосфери, фотоелектричним електростанціям складно забезпечити стабільну вихідну потужність. Для характеристики невизначеності сонячної радіації використовується метод ймовірнісного моделювання.

Спочатку в якості бази даних отримуються набори історичних профілів сонячної радіації з днів з подібними метеорологічними умовами в цільовому регіоні. Визнаючи обмеження, пов'язані з використанням будь-якої окремої ймовірнісної моделі для моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем, розробляється зважена ймовірнісна модель сонячної радіації. Досліджуючи емпіричний розподіл бази даних радіації, визначаються вагові коефіцієнти для складеної моделі, що включає нормальний, логарифмічно-нормальний розподіл та розподіл Вейбулла.

Для кожного вибраного розподілу ймовірностей (нормального, логарифмічно-нормального та розподілу Вейбулла) встановлюється функція правдоподібності на основі історичної бази даних опромінення, а оцінка максимальної правдоподібності використовується для визначення параметрів розподілу ймовірностей. Ці параметризовані підмоделі потім поєднуються з отриманими ваговими коефіцієнтами для формування зваженої моделі ймовірності сонячного опромінення, яка краще відображає мінливість сонячного опромінення. Ця зважена модель ймовірності сонячного опромінення закладає основу для створення високодостовірних сценаріїв вироблення фотоелектричних систем та, зрештою, для підвищення надійності та економічних показників схеми диспетчеризації, призначеної для VPP за участі ринку електроенергії та вуглецю.

Оцінка параметрів нормального розподілу

Для моделі нормального розподілу сонячної радіації n наборів історичних даних про радіацію за аналогічні дні використовуються як вхідні дані для встановлення функції правдоподібності. $L_1(\mu_1, \sigma_1, G_1, j, G_2, j, \dots, G_n, j)$ у j -й момент часу, як зазначено в рівнянні (2.1):

$$L_1(\mu_1, \sigma_1 | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(G_{i,j}-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (2.1)$$

де $G_{i,j}$ – опроміненість у j -й момент часу i -ї доби, а μ_1 та σ_1 – відповідно середнє значення та стандартне відхилення нормального розподілу, що підлягає оцінці.

Логарифм функції правдоподібності $L_1(\mu_1, \sigma_1, G_1, j, G_2, j, \dots, G_n, j)$ задається

$$\ln L_1(\mu_1, \sigma_1 | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi\sigma_1^2) - \frac{1}{2\sigma_1^2} \sum_{i=1}^n (G_{i,j} - \mu_1)^2 \quad (2.2)$$

Часткові похідні логарифмічної функції правдоподібності відносно середнього значення та дисперсії нормального розподілу можна розрахувати на основі рівняння (2.2). Встановлення цих частинних

$$\frac{\delta}{\delta\mu_1} \ln L_1(\mu_1, \sigma_1 | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\delta}{\delta\sigma_1^2} \ln L_1(\mu_1, \sigma_1 | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = 0 \quad (2.4)$$

На основі рівнянь (1.3) та (1.4) отримано середнє значення μ_1 та стандартне відхилення σ_1 нормального розподілу, як показано в рівняннях (2.5) та (2.6) відповідно.

$$\mu_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{i,j} \quad (2.5)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_{i,j} - \mu_1)^2} \quad (2.6)$$

Функція щільності ймовірності $f_1(G_{i,j}, \mu_1, \sigma_1)$ сонячної радіації в j -му часовому інтервалі i -го дня моделюється нормальним розподілом, який визначається формулою

$$f_1(G_{i,j}|\mu_1, \sigma_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(G_{i,j}-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (2.7)$$

Оцінка параметрів логарифмічно-нормального розподілу

Для логарифмічно-нормальної моделі розподілу ймовірностей сонячної радіації n наборів історичних даних про радіацію за аналогічні дні використовуються як вхідні дані для встановлення функції правдоподібності $L_2(\mu_2, \sigma_2, G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j})$ у j -й момент часу, як зазначено в рівнянні (2.8):

$$L_2(\mu_2, \sigma_2|G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{G_{i,j}\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(G_{i,j})-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (2.8)$$

де μ_2 та σ_2 – це середнє значення та стандартне відхилення логарифмічно-нормального розподілу, що підлягає оцінці.

Логарифм функції правдоподібності $L_2(\mu_2, \sigma_2, G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j})$ задається

$$\ln L_2(\mu_2, \sigma_2 | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = -n \ln(\sigma_2) - \sum_{i=1}^n \ln(G_{i,j}) - \frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2\sigma_2^2} \sum_{i=1}^n (\ln(G_{i,j}) - \mu_2)^2 \quad (2.9)$$

Часткові похідні логарифмічної функції правдоподібності відносно середнього значення та дисперсії логарифмічно-нормального розподілу можна розрахувати на основі рівняння (1.9). Встановлення цих частинних похідних рівними нулю означає, що логарифмічна функція правдоподібності досягає свого максимального значення, як показано в рівняннях (2.10) та (2.11).

$$\frac{\delta}{\delta \mu_2} \ln L_2(\mu_2, \sigma_2 | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = \frac{1}{\sigma_2^2} \sum_{i=1}^n (\ln(G_{i,j}) - \mu_2) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\delta}{\delta \sigma_2} \ln L_2(\mu_2, \sigma_2 | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = -\frac{n}{\sigma_2} + \frac{1}{\sigma_2^3} \sum_{i=1}^n (\ln(G_{i,j}) - \mu_2)^2 = 0 \quad (2.11)$$

На основі рівнянь (1.10) та (1.11) виводяться середнє значення μ^2 та стандартне відхилення σ^2 логарифмічно-нормального розподілу, як показано в рівняннях (1.12) та (1.13) відповідно

$$\mu_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(G_{i,j}) \quad (2.12)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln(G_{i,j}) - \mu_2)^2} \quad (1.13)$$

Функція щільності ймовірності $f_2(G_{i,j}, \mu_2, \sigma_2)$ сонячної радіації в j -му часовому інтервалі i -го дня моделюється логарифмічно-нормальним розподілом ймовірностей, який визначається як

$$f_2(G_{i,j} | \mu_2, \sigma_2) = \frac{1}{G_{i,j} \sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln G_{i,j} - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (2.14)$$

Оцінка параметрів розподілу Вейбулла

Для моделі розподілу Вейбулла сонячної радіації n наборів історичних даних про радіацію за аналогічні дні використовуються як вхідні дані для встановлення функції правдоподібності. $L_3(\lambda, k, G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j})$ у j -й момент часу, як зазначено в рівнянні (2.15):

$$L_3(\lambda, k | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = \prod_{i=1}^n \frac{k}{\lambda} \left(\frac{G_{i,j}}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{G_{i,j}}{\lambda} \right)^k} \quad (2.15)$$

де λ та k – відповідно параметри масштабу та форми розподілу Вейбулла, які необхідно оцінити.

Логарифм функції правдоподібності $L_3(\lambda, k, G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j})$ задається

$$\ln L_3(\lambda, k | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = n \ln k - n \ln \lambda + (k-1) \sum_{i=1}^n \ln G_{i,j} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{G_{i,j}}{\lambda} \right)^k \quad (2.16)$$

Взявши частинні похідні функції правдоподібності відносно параметрів форми та масштабу розподілу Вейбулла та встановивши їх рівними нулю, отримуємо умови для максимізації логарифмічної функції правдоподібності, як показано в рівняннях (2.17) та (2.18).

$$\frac{\delta}{\delta \lambda} \ln L_3(\lambda, k | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = -\frac{n}{\lambda} + k \sum_{i=1}^n \left(\frac{G_{i,j}}{\lambda^2} \right)^k = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\delta}{\delta k} \ln L_3(\lambda, k | G_{1,j}, G_{2,j}, \dots, G_{n,j}) = \frac{n}{k} + \sum_{i=1}^n \ln G_{i,j} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{G_{i,j}}{\lambda} \right)^k \ln \left(\frac{G_{i,j}}{\lambda} \right) = 0 \quad (2.18)$$

Шляхом чисельного розв'язання рівнянь (17) та (18) за допомогою програмного забезпечення, такого як Python 3.8, можна отримати параметр

форми k та параметр масштабу λ розподілу Вейбулла. Отже, функція щільності ймовірності $f_3(G_{i,j}, \lambda, k)$ сонячної радіації в j -й момент часу i -го дня отримується за формулою

$$f_3(G_{i,j}|\lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{G_{i,j}}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{G_{i,j}}{\lambda}\right)^k} \quad (2.19)$$

2.2. Формулювання моделі ймовірності сонячної радіації

Вагові коефіцієнти A , B та C , що відповідають трьом розподілам ймовірностей, вводяться для формування зваженого розподілу ймовірностей $f_4(G_{i,j}, \mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2, \lambda, k)$, як показано в рівнянні (2.20).

$$f_4(G_{i,j}|\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2, \lambda, k) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(G_{i,j}-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + B \cdot \frac{1}{G_{i,j}\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln G_{i,j}-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} + C \cdot \frac{k}{\lambda} \left(\frac{G_{i,j}}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{G_{i,j}}{\lambda}\right)^k} \quad (2.20)$$

Серед n наборів історичних даних про сонячну радіацію є n_1 наборів даних, що показують характеристики, відносно близькі до нормального розподілу, тобто задовольняють критерій, заданий формулою

$$p_1 = \left| \frac{G_{i,j} - \mu_1}{\sigma_1} \right| \leq z_1 \quad (2.21)$$

де p_1 та z_1 – це стандартний бал, заснований на нормальному розподілі, та відповідний пороговий критерій для нормального розподілу ймовірностей відповідно.

Аналогічно, існує n_2 наборів даних, що показують характеристики, відносно близькі до логарифмічно-нормального розподілу, тобто задовольняють критерій, заданий формулою

$$p_2 = \left| \frac{G_{i,j} - e^{\mu_2 + \frac{\sigma_2^2}{2}}}{\sigma_2} \right| \leq z_2 \quad (2.22)$$

де p_2 та z_2 – це стандартний бал, заснований на логарифмічно-нормальному розподілі, та відповідний пороговий критерій для логарифмічно-нормального розподілу ймовірностей відповідно.

Аналогічно, існує n_3 наборів даних, що показують характеристики, відносно близькі до розподілу Вейбулла, тобто задовольняють критерій, заданий формулою

$$\left| \frac{G_{i,j} - \lambda \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{k})}{\lambda \cdot \sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{k}) - [\Gamma(1 + \frac{1}{k})]^2}} \right| \leq z_3 \quad (2.23)$$

де z_3 – це пороговий критерій для розподілу ймовірностей Вейбулла, а $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функція для обчислення середнього значення розподілу Вейбулла.

Виходячи з n_1 , n_2 та n_3 , вагові коефіцієнти A , B та C визначаються як

$$\begin{cases} A = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3} \\ B = \frac{n_2}{n_1 + n_2 + n_3} \\ C = \frac{n_3}{n_1 + n_2 + n_3} \end{cases} \quad (2.24)$$

Для системи генерації фотоелектричної енергії її вихідна потужність пов'язана з сонячною радіацією, ефективною площею фотоелектричного масиву та ефективністю фотоелектричного перетворення, як зазначено в рівнянні (2.25):

$$P = G \cdot S \cdot \eta \quad (2.25)$$

де P позначає вихідну потужність фотоелектричних систем, G – сонячна радіація, S – ефективна площа фотоелектричного масиву, а η – ефективність перетворення фотоелектричної енергії.

Для ілюстрації процесу створення та застосування запропонованої зваженої моделі ймовірності сонячної радіації, блок-схема показана на рисунку 2.1. Шляхом проведення статистичного аналізу історичних даних про опромінення та оцінки параметрів моделі можна покращити точність моделювання ймовірності сонячної радіації та відповідної вихідної потужності фотоелектричних систем.

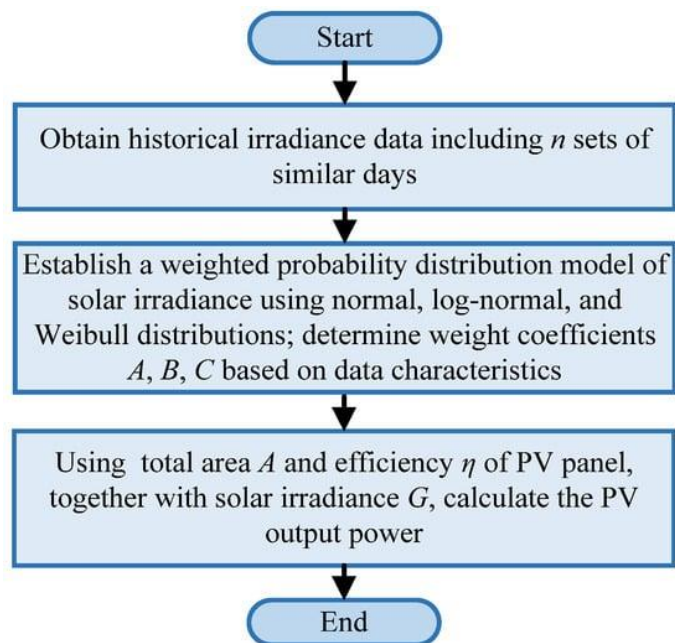


Рисунок 2.1 – Блок-схема для створення зваженої моделі ймовірності сонячної радіації

2.3. Сценарій генерації сонячної радіації

З огляду на попит на вихідну потужність фотоелектричних систем для подальшої оптимізації диспетчеризації, сценарії сонячної радіації генеруються на основі встановленої зваженої моделі ймовірності сонячної радіації з використанням методу вибірки відхилення. Для забезпечення як статистичної точності, так і фізичної правдоподібності застосовується фільтр довірчого інтервалу, який усуває будь-яку вибірку траєкторію, що виходить за межі заданих довірчих меж, залишаючи лише ті сценарії, які послідовно лежать у довірчому інтервалі для подальшої оптимізації диспетчеризації.

Повний робочий процес вибірки відхилення показано на рисунку 2.2.

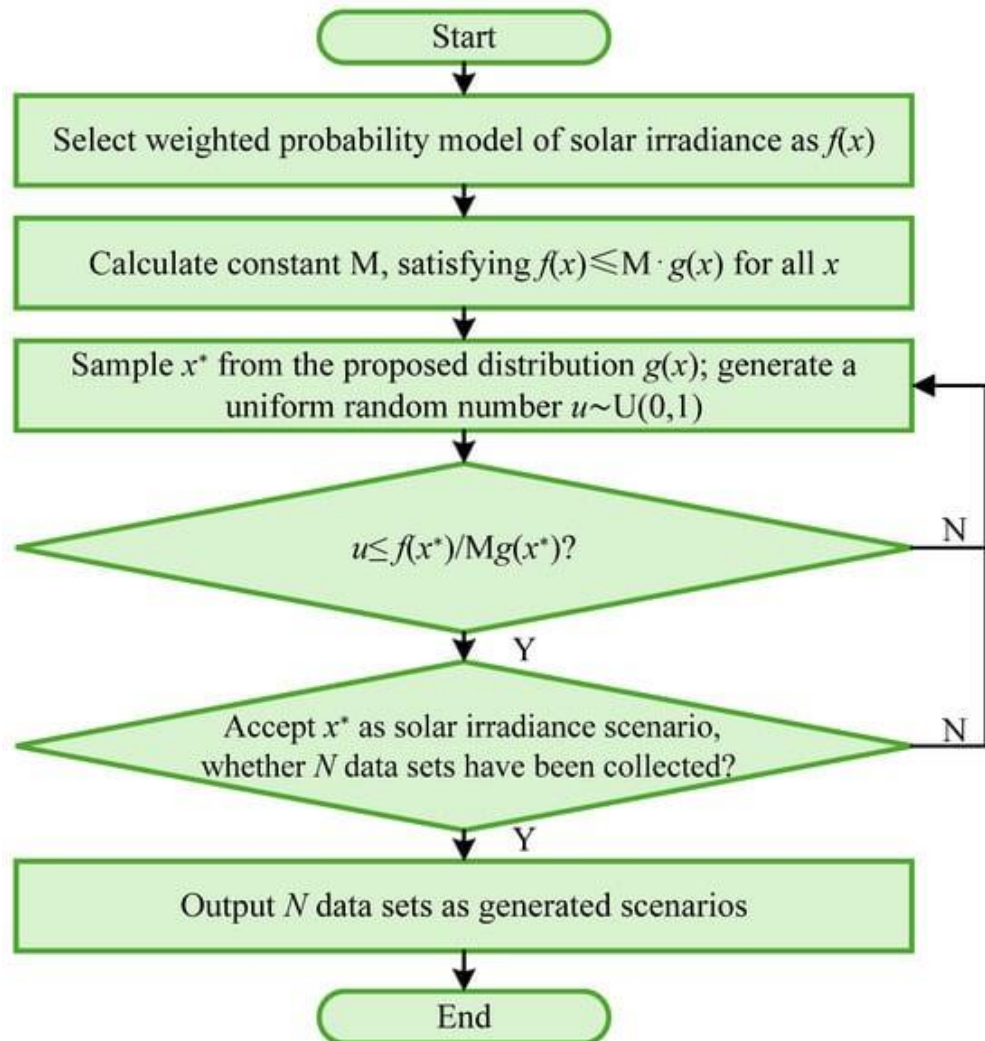


Рисунок 2.2. – Генерація сценаріїв сонячної радіації з використанням методу відхилення вибірки

Щоб забезпечити правдоподібність та репрезентативність згенерованих сценаріїв сонячної радіації, до всіх вибірових наборів даних про радіацію застосовується покроковий фільтр довірчих інтервалів у часі. 95% довірна межа розраховується на основі зваженої моделі ймовірності сонячної радіації, а вибірові набори даних про радіацію з їхніми виходами траєкторії, що відповідають довірчому інтервалу в будь-який момент часу, відкидаються. Решта траєкторій, кожна з яких обмежена заданим довірчим інтервалом протягом тривалості диспетчеризації, складають високорепрезентативну базу даних для подальшої оптимізації диспетчеризації.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Вибірка відхилення – це стандартний метод Монте-Карло, який використовується для генерації випадкових вибірок з цільового розподілу ймовірностей. Для відомої цільової функції густини $f(x)$ вибирається розподіл пропозицій $g(x)$, і існує додатна константа обвідної M , яка задовольняє умову $f(x) \leq M \cdot g(x)$ для всіх x . Зважений розподіл ймовірності сонячної радіації був прийнятий як цільова функція густини $f(x)$. Потім константа обвідної M була визначена чисельно, щоб задовольнити нерівність $f(x) \leq M \cdot g(x)$, де $g(x)$ позначає вибраний розподіл пропозицій. Варіанти-кандидати x^* були обрані з $g(x)$. Для кожного кандидата було згенеровано рівномірне випадкове число $u \sim U(0,1)$. Вибірка x^* була прийнята, якщо $u \leq f(x^*)/M \cdot g(x^*)$, в іншому випадку – відхилена. Ця процедура прийняття-відхилення повторювалася, доки не було зібрано N зразків радіації.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ ВЕС, ЩО БЕРЕ УЧАСТЬ У РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ

Як єдиний учасник ринку, VPP подає заявки та пропозиції на ринку електроенергії та вуглецю, щоб забезпечити як економічну ефективність, так і стабільність системи. Детальна структура диспетчеризації проілюстрована на рисунку 3.1.

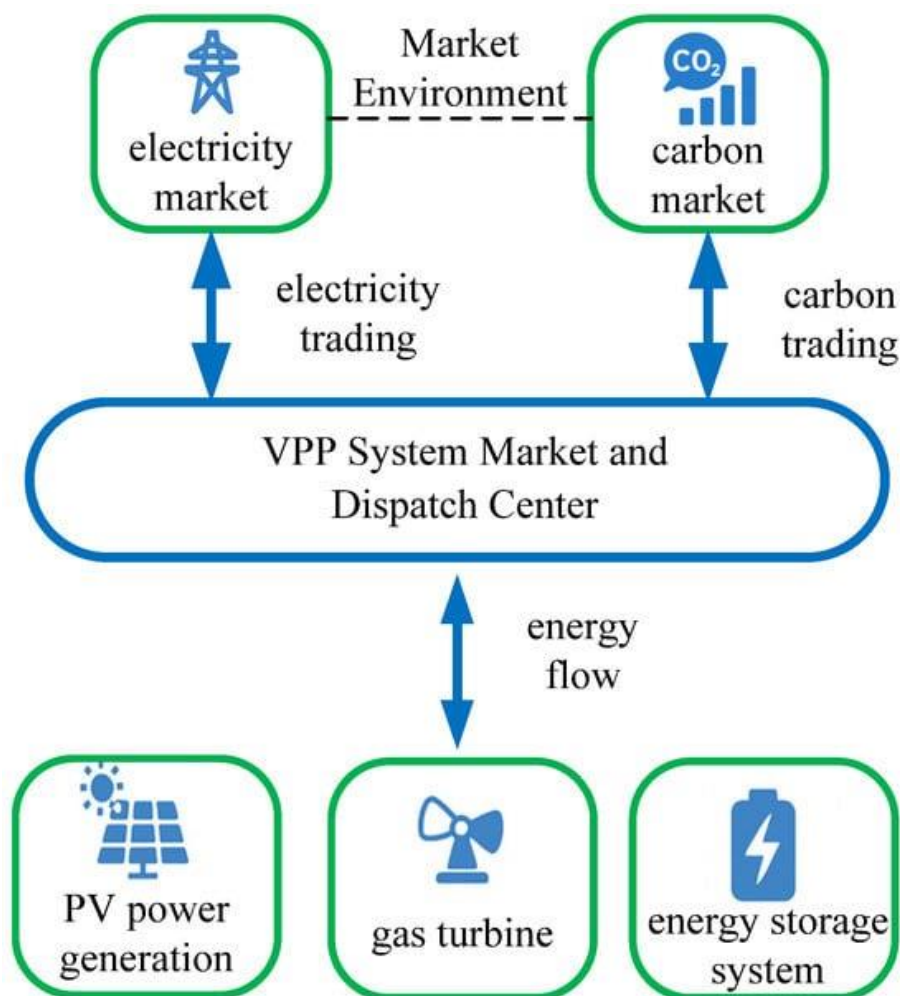


Рисунок 3.1 – Участь VPP на ринку електроенергії та вуглецю

3.1. Цільова функція моделі оптимізації

Для оптимізації диспетчеризації ВЕС для участі в ринку електроенергії та

вуглецю цільова функція встановлюється для максимізації загального прибутку ВЕС, яка визначається рівнянням (3.1):

$$W(t) = \begin{cases} -P_{\text{all}}(t) \cdot \lambda_t^{\text{buy}} - C_1(t) - C_2(t) - C_{\text{ess}}(t) - C_c(t), & P_{\text{all}}(t) < 0 \\ P_{\text{GT}}(t) \cdot \lambda_t^{\text{sell}} - C_1(t) - C_2(t) - C_{\text{ess}}(t) - C_c(t), & P_{\text{all}}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$P_{\text{all}}(t) = P_g(t) + P_{\text{GT}}(t) - P_{\text{ess}}(t) - P_d(t) \quad (3.2)$$

де $W(t)$ позначає загальний прибуток VPP за період часу t ; $C_1(t)$ — експлуатаційні витрати газових турбін за період часу t ; $C(t)$ — вартість придбання електроенергії за період часу t ; $C_{\text{ес}}(t)$ — експлуатаційні витрати системи накопичення енергії за період часу t ; $C_c(t)$ являє собою сукупну вартість викидів вуглецю газовими турбінами до періоду часу t ; $P_g(t)$ — вихід фотоелектричної енергії за період часу t ; $P_{\text{день}}(t)$ представляє потребу в потужності в період часу t ; $P_{\text{ГТ}}(t)$ — вихідна потужність газової турбіни за період часу t ; $P_{\text{есс}}(t)$ — вихідна потужність системи накопичення енергії за період часу t ; λ^b та λ^s — ціни купівлі та продажу електроенергії за період часу t відповідно; та $P_{\text{алл}}(t)$ позначає повну потужність VPP у період часу t . Додатне значення $P_{\text{алл}}(t)$ вказує на те, що надлишкова потужність доступна для продажу в мережу, тоді як від'ємне значення $P_{\text{алл}}(t)$ означає, що електроенергію потрібно купувати з мережі.

Експлуатаційні витрати газових турбін розраховуються на основі рівняння (3.3):

$$C_1(t) = \sum_{i=1}^n a_i P_{\text{ГТ},i}^2(t) + b_i P_{\text{ГТ},i}(t) + c_i \quad (3.3)$$

де n — кількість газових турбін; a_i , b_i , та c_i — коефіцієнти витрат на експлуатацію та технічне обслуговування i -ї газової турбіни; та $P_{\text{ГТ},i}(t)$ — вихідна потужність i -ї газової турбіни за період часу t

Вартість придбання електроенергії розраховується на основі рівняння (3.4):

$$C_2(t) = \lambda_t^{\text{buy}} P_t^{\text{buy}} + \lambda_t^{\text{sell}} P_t^{\text{sell}} \quad (3.4)$$

де P_t^{buy} – потужність, придбана ВЕС з мережі за період часу t , та P_t^{sell} – потужність, продана ВЕС до мережі за період часу t

Вартість, пов'язана з системою накопичення енергії, розраховується за рівнянням (3.5):

$$C_{\text{ess}}(t) = \sum_{t=1}^{24} c_{\text{ess}} [\mu_{\text{essc}}(t) P_{\text{essc}}(t) + \mu_{\text{essd}}(t) P_{\text{essd}}(t)] \Delta T \quad (3.5)$$

де C_{ess} – експлуатаційні витрати на одиницю потужності системи накопичення енергії, які встановлені на рівні 0,01 юаня/(кВт·год); $P_{\text{essc}}(t)$ і $P_{\text{essd}}(t)$ – потужність заряджання та розряджання системи накопичення енергії в період часу t ; μ_{essc} і $\mu_{\text{essd}}(t)$ – відповідні бінарні керуючі змінні в період часу t , що приймають значення 0 або 1, та ΔT – це тривалість кожного періоду часу

Викиди вуглекислого газу розраховуються на основі рівняння 3.6), а вартість викидів вуглецю визначається рівнянням (3.7):

$$E_{\text{CO}_2} = 3.6 P_{\text{GT}} \cdot EF / \eta_1 \quad (3.6)$$

$$C_c(t) = 0.068 \cdot E_{\text{CO}_2} \quad (3.7)$$

де E_{CO_2} позначає загальні викиди вуглекислого газу з газових турбін за період часу t (у кг/год); P_{GT} – загальна вихідна потужність газових турбін (у кВт); EF – коефіцієнт викидів вуглецю палива (у кг/МДж); ціна вуглецю встановлена на рівні 68 юанів/тонна; η_1 – коефіцієнт перетворення енергії.

Наразі початковий розподіл квот на викиди вуглецю здійснюється або

шляхом безкоштовного розподілу, або шляхом публічного аукціону, і для схеми безкоштовного розподілу можуть бути використані два підходи: метод бенчмаркінгу та метод історичних викидів [26]. Метод бенчмаркінгу є основним механізмом призначення вуглецевих квот виробникам електроенергії в Китаї. За такого підходу квота на викиди вуглецю для ВЕС встановлюється пропорційно її виробленню відповідно до принципу розподілу на основі бенчмарків [17 років], як задано

$$R_c(t) = \eta_2 P_{vpp}(t) \quad (3.8)$$

де $R_c(t)$ – кількість квот на викиди вуглецю, виділених для VPP у період часу t ; η_2 – коефіцієнт розподілу квот на викиди вуглецю, визначений на основі базових коефіцієнтів викидів регіональної мережі, виданих Національною комісією з розвитку та реформ; та $P_{vpp}(t)$ – загальна вихідна потужність ВЕС протягом періоду часу t .

3.2. Обмеження моделі оптимізації

Обмеження, пов'язані з фотоелектричною системою

Вихід фотоелектричних систем обмежений

$$0 \leq P_g \leq P_{g,max} \quad (3.9)$$

де $P_{g,max}$ – максимальна доступна фотоелектрична потужність у період часу t .

Обмеження, пов'язані з газовими турбінами

Вихідна потужність газових турбін залежить від таких експлуатаційних обмежень:

$$P_{GT}^{\min} \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT}^{\max} \quad (3.10)$$

$$-R_{GT}^{\text{down}} \leq P_{GT}(t) - P_{GT}(t-1) \leq R_{GT}^{\text{up}} \quad (3.11)$$

де $P_{GT}^{\max}$ та $P_{GT}^{\min}$ – максимальна та мінімальна межі потужності i - ї газової турбіни відповідно;

R_{GT}^{up} та R_{GT}^{down} – швидкості наростання та зниження швидкості нарощування i -ї газової турбіни.

Обмеження, пов'язані з системами накопичення енергії

Робота системи накопичення енергії обмежена межами заряджання/розряджання та динамікою стану заряду (SOC) наступним чином:

$$\mu_{\text{essc}}(t) + \mu_{\text{essd}}(t) \leq 1 \quad (3.12)$$

$$0 \leq P_{\text{essc}}(t) \leq \mu_{\text{essc}}(t) P_{\text{essc}}^{\max} \quad (3.13)$$

$$0 \leq P_{\text{essd}}(t) \leq \mu_{\text{essd}}(t) P_{\text{essd}}^{\max} \quad (3.14)$$

$$E(t) = E(t-1) + \eta_{\text{essc}} P_{\text{essc}}(t) - P_{\text{essd}}(t) / \eta_{\text{essd}} \quad (3.15)$$

$$E^{\min} \leq E(t) \leq E^{\max} \quad (3.16)$$

де $P_{\text{essc}}^{\max}$ і $P_{\text{essd}}^{\max}$ – максимально допустима потужність заряджання та розряджання; η_{essc} і η_{essd} – ефективність заряджання та розряджання; $E(t)$

– значення SCO у період часу t ; та $E^{\min}$ і $E^{\max}$ – мінімальні та максимальні допустимі значення SOC.

Обмеження, пов'язані з балансом потужностей

$$P_g(t) + \sum_{i=1}^n P_{GT,i}(t) - P_{ess}(t) + P_{all}(t) = P_d(t) \quad (3.17)$$

$$|P_{all}(t)| \leq P_{all,max}(t) \quad (3.18)$$

де $P_{all,max}(t)$ – максимально допустимий обмін потужністю з мережею за період часу t .

Обмеження, пов'язані з викидами вуглецю

Механізм торгівлі вуглецевими квотами гарантує, що загальний викид вуглецю VPP не перевищує доступну квоту, якщо це не компенсується шляхом торгівлі. Обмеження виражається наступним чином:

$$R_i^{bao} = R_c(t) - R_s(t) \quad (3.19)$$

де R_i^{bao} – це обсяг квот на викиди вуглецю, якою було продано, та $R_c(t)$ – загальний викид вуглецю ВПП.

3.3. Модель двозонної системи відновлюваної енергетики

Загальна структура моделювання представлена рисунку 3.1, де моделюється виробництво відновлюваної енергії та продуктивність за різних

навантажень [32]. В області 1 нерегенеративна пароелектростанція поєднана з фотоелектричною системою, тоді як в області 2 та ж теплоелектростанція поєднана з джерелом енергії вітру. Дві області з'єднані сполучною лінією, а керування стабільністю частоти виконується за допомогою ПІ-, ПІД- та 2DOF-PID-контролерів [33, 34].

ВА використовується для ефективного налаштування контролера, натхненного поведінкою бджіл під час пошуку їжі, для визначення оптимальних значень параметрів. Цей метод покращує здатність системи адаптуватися до коливань навантаження та підвищує точність AGC у динамічних умовах, як описано в рівняннях (3.20) – (3.22).

$$\Delta P_{\text{total}} = \frac{\sum P_{\text{Area-1}}}{\sum P_{\text{Area-2}}} \quad (3.20)$$

$$\sum P_{\text{Area-1}} = \Delta P_{G1} + \Delta P_{T1} + \Delta P_{PV} - \Delta P_{D1} - \Delta P_{\text{tie}} \quad (3.21)$$

$$\sum P_{\text{Area-2}} = \Delta P_{G2} + \Delta P_{T2} + \Delta P_{\text{WIND}} - \Delta P_{D2} + \Delta P_{\text{tie}} \quad (3.22)$$

де ΔP_{G1} , ΔP_{G2} – різниця у зміні керування генерацією електроенергії, ΔP_{T1} та ΔP_{T2} – різниця у зміні турбіни, а ΔP_{PV} – різниця у зміні PV, ΔP_{WIND} – різниця, спричинена зміною вітрової турбіни, ΔP_{D1} , ΔP_{D2} – різниця у номінальній потужності турбінної системи без повторного підігріву, ΔP_{tie} , $-\Delta P_{\text{tie}}$ – різниця у фактичній потужності при з'єднанні двох областей [25].

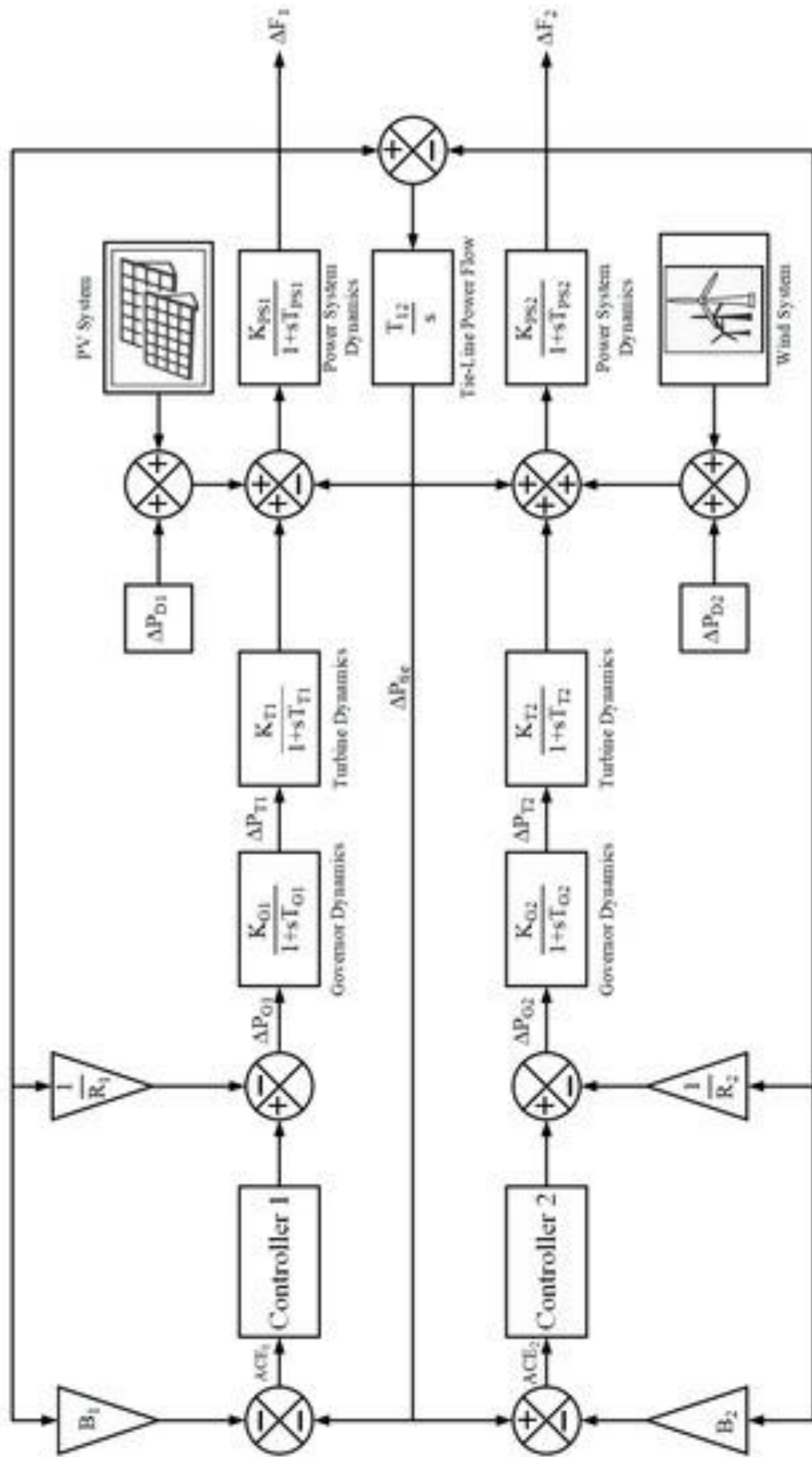


Рисунок 3.2. – Передавальна функція для системи відновлюваної енергетики

3.4. Модель для моделювання фотоелектричних (ФЕ) систем

Модель імітує зміни вихідної електричної потужності фотоелектричної системи, спричинені коливаннями сонячної радіації. Для представлення стохастичних збурень, масштабованих за стандартним відхиленням вихідної потужності сонячної електростанції, як описано в рівнянні (3.23), використовується сигнал білого шуму з обмеженою смугою.

$$\Delta P_{\text{Solar}} = 0.6 \times \sqrt{P_{\text{Solar}}} \quad (3.23)$$

де ΔP_{Solar} – номінальна вихідна потужність фотоелектричної панелі.

Діаграма на рисунку 3.2 показує структуру моделі, яка використовується для генерації випадково змінного сигналу потужності для імітації коливань виробництва сонячної енергії в реальних умовах [36].

На рисунку 3.3 показано результати моделювання, в яких фотоелектрична система постачає приблизно 32 МВт потужності на навантаження, або приблизно 1% від загальної генеруючої потужності [37]. Ця мінливість потужності важлива для аналізу динамічної поведінки ВДЕ та використовується в моделі LFC для відображення реалістичної експлуатаційної поведінки фотоелектричної підсистеми.

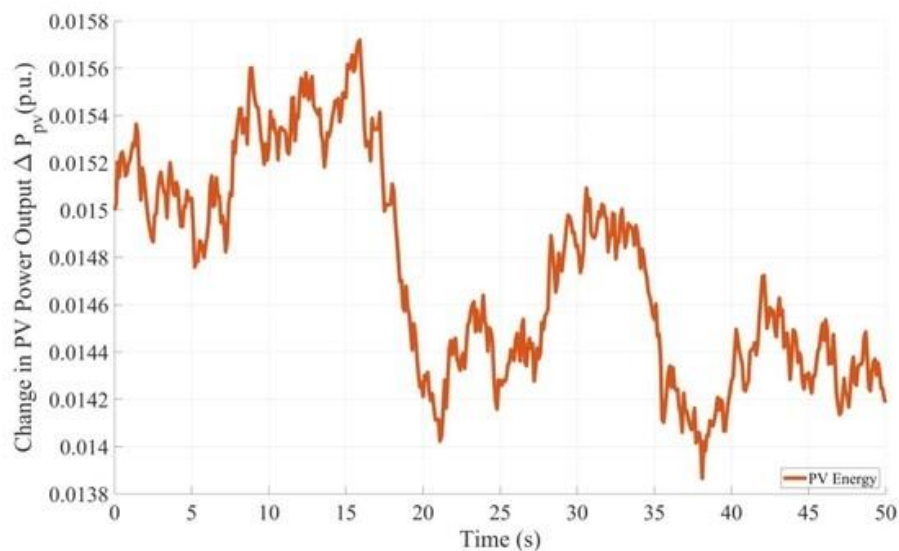


Рисунок 3.3. – Моделювання виробництва енергії сонячною енергією

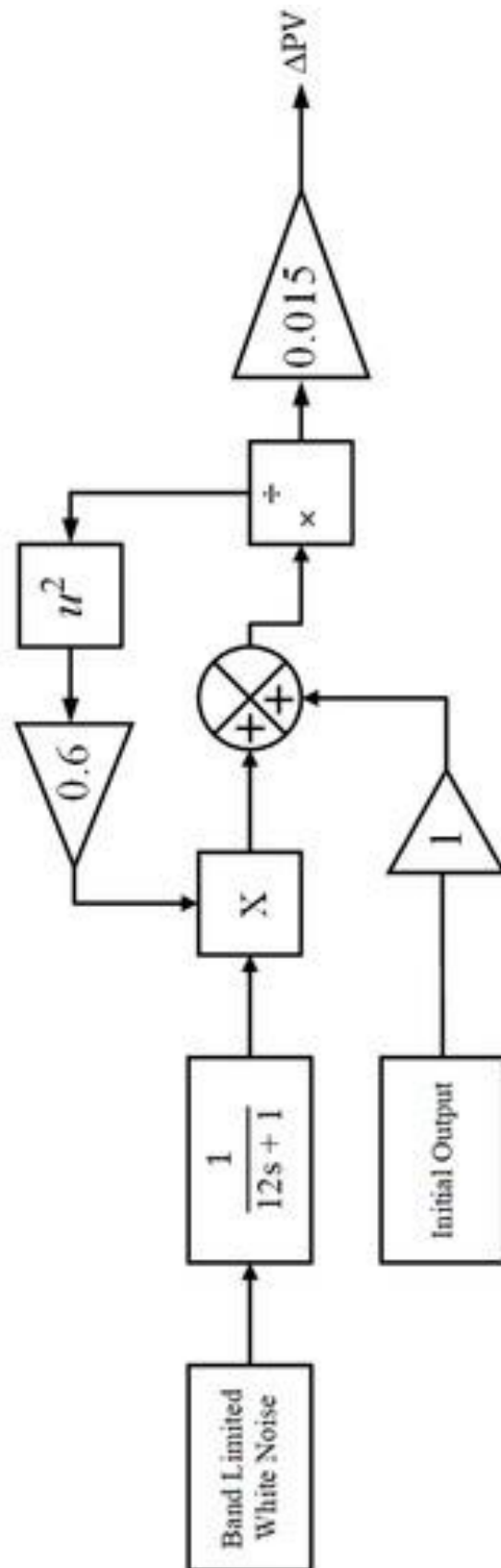


Рисунок 3.2. – Модель фотоелектричної енергії

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Що стосується запропонованої моделі диспетчеризації ринку електроенергії та вуглецю, VPP інтегрує газові турбіни, фотоелектричні панелі та системи накопичення енергії, а також бере участь як в операціях на ринку електроенергії, так і в торгівлі викидами вуглецю. У досліджуваній системі VPP газові турбіни та фотоелектричні установки в основному відповідають за забезпечення електропостачання, тоді як пристрої накопичення енергії контролюються для згладжування коливань вироблення фотоелектричних панелей. Механізм торгівлі викидами вуглецю додатково обмежує диспетчеризацію з екологічної точки зору, сприяючи низьковуглецевій роботі.

РОЗДІЛ 4. ТЕМАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Параметри системи VPP

Для оцінки ефективності та практичності запропонованої стратегії диспетчеризації прийнято 24-годинний горизонт планування з кроком у 1 годину. ВЕС включає три газотурбінні агрегати (кожен номінальною потужністю 350 кВт), фотоелектричну установку загальною номінальною потужністю 1300 кВт та систему акумуляторного накопичення енергії номінальною потужністю 500 кВт/1200 кВт·год. Коефіцієнт корисної дії фотоелектричного перетворення η встановлено на рівні 20%, коефіцієнт корисної дії перетворення енергії на викиди вуглецю газової турбіни η_1 встановлено на рівні 0,43, а коефіцієнт викидів вуглецю палива EF становить 0,054 кг МДж⁻¹.

Для оптимізації схеми диспетчеризації ВЕС ціни купівлі та продажу електроенергії, прийняті в цьому випадку, наведено в Таблиці 4.1, тоді як технічні параметри газотурбінних установок та системи накопичення енергії в ВЕС наведено в Таблиці 4.2 та Таблиці 4.3 відповідно [28, 29]. Ціни купівлі та продажу електроенергії в Таблиці 1 взяті з Посилання [30]. Параметри газової турбіни в Таблиці 4.2 та параметри системи накопичення енергії в Таблиці 3 взяті з Посилання [21]. Результати моделювання в Розділі 4 отримані на основі налаштувань параметрів, наведених у Розділі 4.1, у поєднанні із запропонованою моделлю ймовірностей та алгоритмом оптимізації.

Таблиця 4.1. – Ціна купівлі-продажу електроенергії (у юанях/кВт·год)

Період часу	Години пік	Непікові години	Години роботи долини
	09:00–12:00 18:00–21:00	13:00–17:00 22:00–24:00	01:00–08:00
Ціна придбання VPP	1,038	0,718	0,399
Ціна продажу VPP	0,869	0,687	0,356

Таблиця 4.2. – Технічні параметри газової турбіни

Параметр	Значення		
	Блок 1	Блок 2	Блок 3
Коефіцієнт операційних витрат a_i	0,006	0,006	0,006
Коефіцієнт операційних витрат b_i	0,03	0,03	0,03
Коефіцієнт операційних витрат c_i	32	32	32
Мінімальна вихідна потужність (кВт)	40	40	40
Максимальна вихідна потужність (кВт)	350	350	350
Швидкість нарощування (кВт/год)	150	150	150
Швидкість зниження (кВт/год)	100	100	100

Таблиця 4.3. – Технічні параметри системи накопичення енергії

Параметр	Значення
Максимальна потужність (кВт-год)	1200
Максимальна потужність заряджання (кВт)	500
Максимальна потужність розряду (кВт)	500
Ефективність заряджання	0,92
Ефективність розрядки	0,95
Початкова накопичена енергія (кВт-год)	600

4.2. Генерація та вибір сценаріїв сонячної радіації

Для встановлення зваженої моделі ймовірності сонячної радіації використовуються профілі сонячної радіації з 50 історичних днів з подібними метеорологічними умовами для апроксимації моделей нормального, логарифмічно-нормального розподілу та розподілу Вейбулла, які показано на рисунку 4.4 , а критерії вибору розподілу z_1 , z_2 та z_3 встановлені на 1,3, e^5 та 0,082 відповідно. Використовуючи метод, описаний у розділі 2 , встановлюється зважена функція розподілу ймовірності сонячної радіації, а відповідні параметри в рівнянні (20) становлять $A = 0,342$, $B = 0,393$ та $C = 0,265$ відповідно.

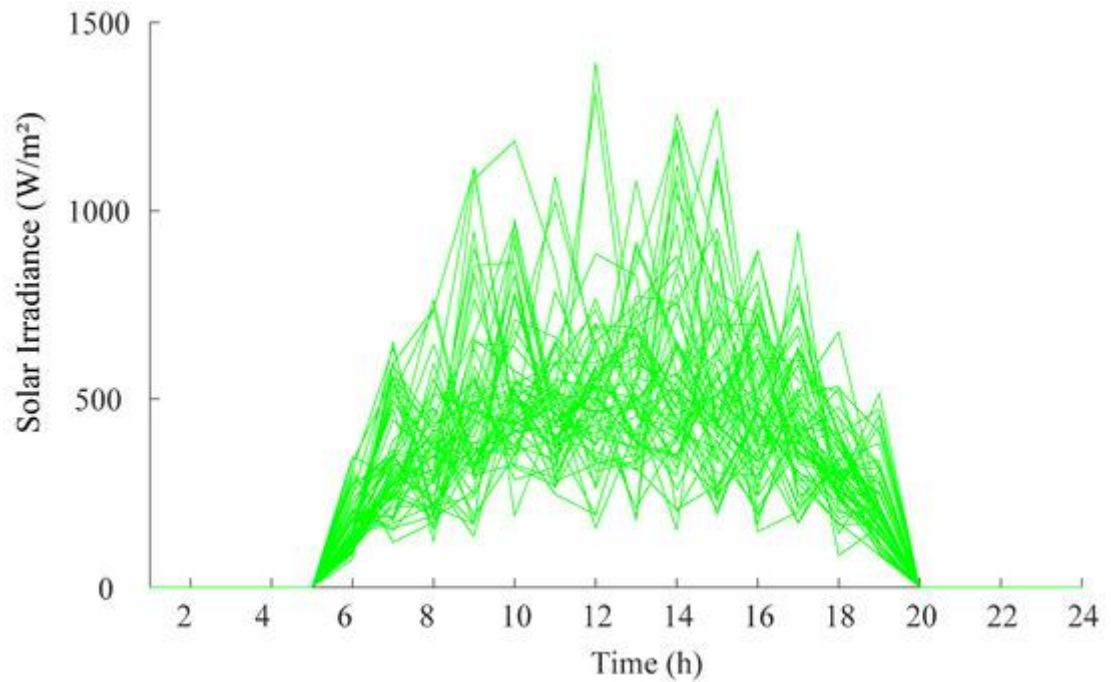


Рисунок 4.4. – Історичні профілі сонячної радіації за 50 подібних днів

На основі встановленої зваженої моделі ймовірності сонячної радіації, за допомогою вибірки відхилення генерується загалом 100 сценаріїв часових рядів сонячної радіації, як показано на рисунку 4.5 , які згодом піддаються фільтрації довірчих інтервалів.

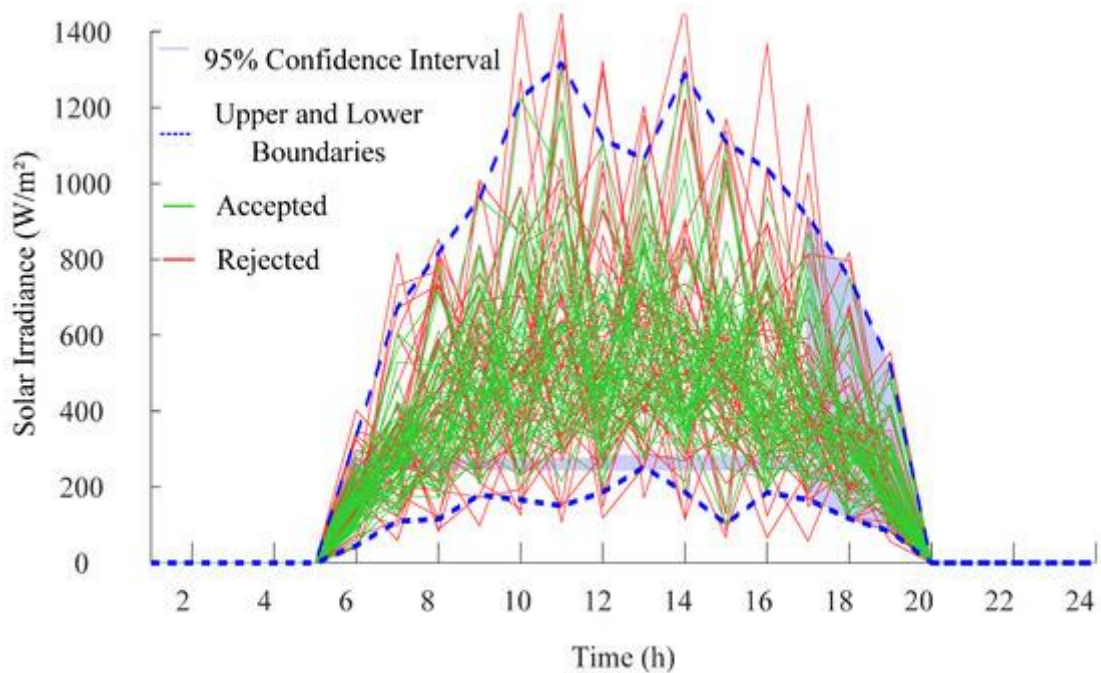


Рисунок 4.5. – Згенеровані сценарії на основі зваженої моделі ймовірності сонячної радіації

На рисунку 4.5 показано 100 згенерованих профілів сонячної радіації за цілий день. Будь-який профіль, радіація якого в будь-який момент часу виходить за межі 95% довірчого інтервалу (затінена сіра область, де пунктирні сині лінії позначають її верхню та нижню межі), відхиляється (червоні криві), тоді як ті, що повністю залишаються в межах довірчого інтервалу, приймаються (зелені криві).

На рисунку 4.6 показано 53 траєкторії сонячної радіації, які пройшли скринінг з 95% довірчим інтервалом, усі вони зображені зеленим кольором. Можна помітити, що після фільтрації розсіювання даних у кожній часовій точці суттєво зменшується, що призводить до сценаріїв, які точніше відповідають типовій мінливості радіації, тим самим уникаючи надмірного впливу екстремальних випадків на оптимізацію стратегії диспетчеризації для віртуальної електростанції (ВПП), що включає фотоелектричні системи.

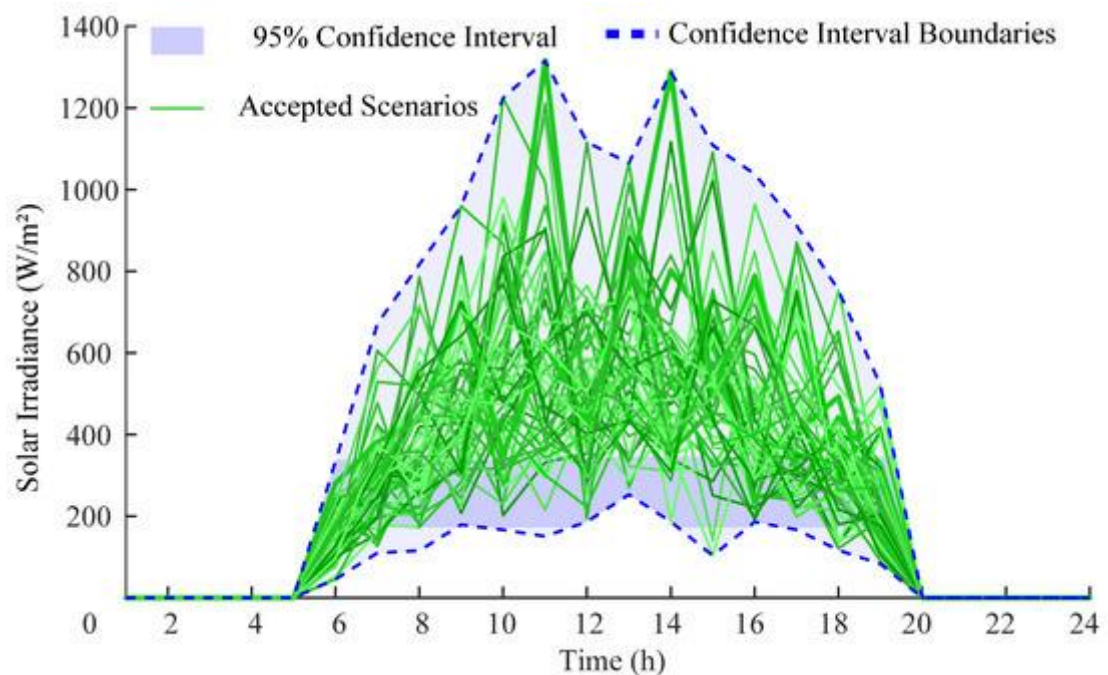


Рисунок 4.6. – Відфільтровані сценарії сонячної радіації на основі 95% довірчого інтервалу

4.3. Аналіз результатів відправлення за різних розподілів ймовірностей та рівнів довіри

Для перевірки підвищеної точності запропонованої зваженої моделі ймовірності сонячної радіації, традиційна нормальна ймовірність також застосовується виключно для моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем як контрастної групи. На [рисунку 4.7](#) ілюструються профілі вихідної потужності фотоелектричних систем, згенеровані за допомогою зваженого розподілу ймовірностей та традиційного нормального розподілу ймовірностей за різних рівнів довіри. Коробчасті діаграми підсумовують статистичні характеристики профілів вихідної потужності фотоелектричних систем, включаючи медіану, міжквартильний діапазон та викиди. Верхня та нижня межі кожної коробки відповідають 75-му та 25-му процентилям даних відповідно, а центральна горизонтальна лінія вказує на медіану. Зі збільшенням рівня довіри оцінені квантилі зменшуються, а міжквартильний діапазон звужується, що вказує на більш консервативну оцінку вихідної потужності фотоелектричної системи. Вищі рівні довіри дають більш надійні, але нижчі оцінки вихідної потужності фотоелектричних систем, що безпосередньо впливає на подальші рішення щодо диспетчеризації.

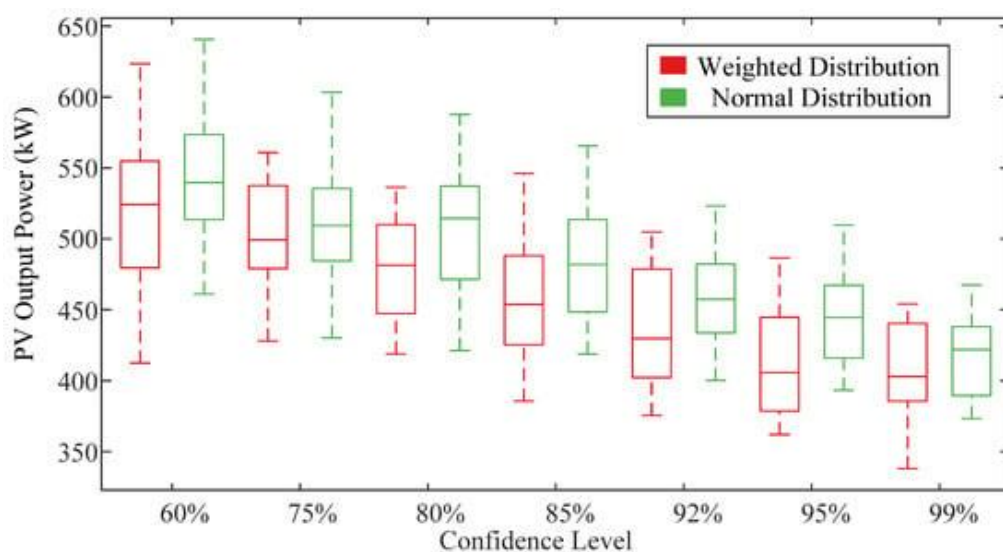


Рисунок 4.7. – Вихідна потужність фотоелектричних систем, отримана за допомогою зваженого та нормального розподілу ймовірностей

➤ Результати оптимізації диспетчеризації траєкторії вихідного сигналу газової турбіни

При застосуванні 60% рівня довіри для фільтрації сценаріїв згенерованої сонячної радіації та подальшій оптимізації схеми диспетчеризації ВЕС для максимізації прибутку, траєкторії потужності газової турбіни порівнюються на рисунку 4.8, де червона та зелена лінії представляють сценарії, згенеровані запропонованим зваженим розподілом ймовірностей та традиційним нормальним розподілом ймовірностей, тоді як синя лінія представляє фактичні сценарії, які спочатку використовуються для отримання розподілу ймовірності сонячної радіації. Як видно з траєкторій потужності газової турбіни, з 20:00 до 05:00 блок працює на максимальній потужності (350 кВт), щоб задовольнити потреби в потужності. Оскільки сонячна радіація зростає після 05:00, потужність турбіни різко падає, встановлюючись на своєму мінімальному значенні (40 кВт) між 08:00 та 18:00, що вказує на те, що генерація фотоелектричних систем достатньо покриває навантаження в денні години. Після 18:00 потужність турбіни швидко зростає, повертаючись до повної потужності приблизно до 19:00. Примітно, що траєкторія вихідної потужності газової турбіни, отримана шляхом генерації сценаріїв на основі зваженого розподілу ймовірностей, ближче до оптимізованої кривої з фактичними історичними сценаріями, порівняно з випадком, коли сценарії генеруються на основі нормального розподілу ймовірностей. Той факт, що включення запропонованої зваженої моделі ймовірностей призводить до схем диспетчеризації, які ближчі до оптимальної диспетчеризації за фактичних історичних сценаріїв, підтвердив підвищену точність моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем за допомогою запропонованого зваженого розподілу.

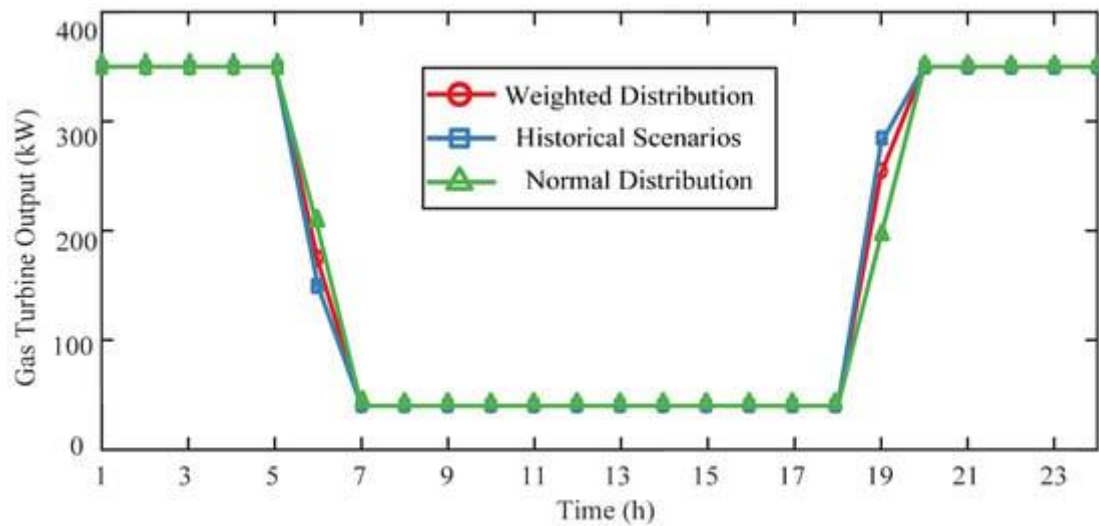


Рисунок 4.8. – Траєкторія вихідної потужності газової турбіни з рівнем довіри 60%

На рисунку 4.9 показано, що при рівні довіри 80% траєкторія вихідної потужності газової турбіни точно відображає її поведінку при рівні довіри 60%. З 20:00 до 05:00 вона працює на повну потужність, тоді як під час годин пікової генерації фотоелектричних систем (08:00–18:00) вона утримується на мінімальній потужності. Аналогічно, при моделюванні зваженого розподілу ймовірностей вихідної потужності фотоелектричних систем траєкторія вихідної потужності газової турбіни ближча до своєї оптимальної кривої за фактичних історичних сценаріїв протягом ключових інтервалів переходу навантаження, з похибками, значно нижчими, ніж у моделюванні ймовірностей на основі нормального розподілу.

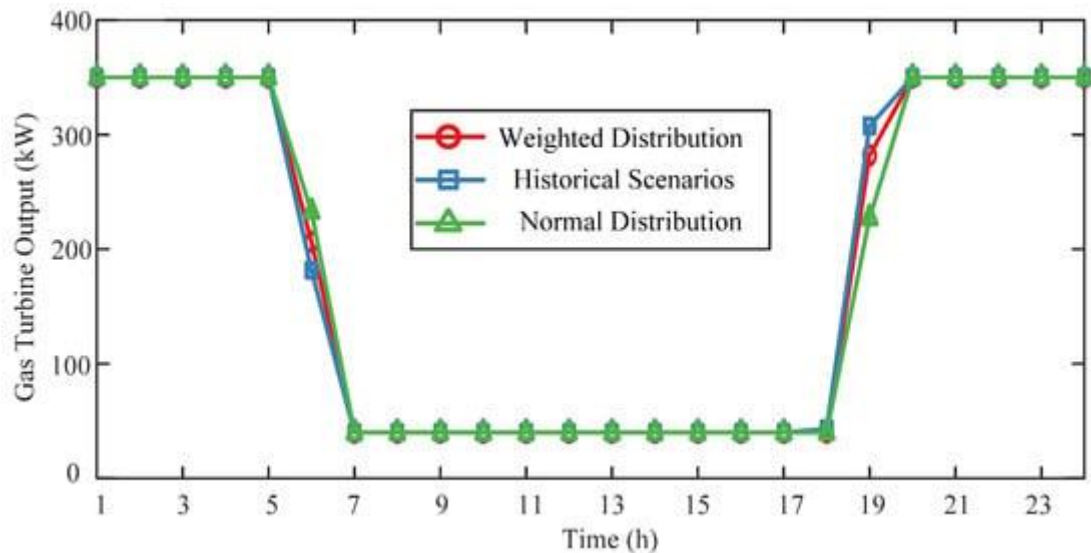


Рисунок 4.9. – Траєкторія вихідної потужності газової турбіни з рівнем довіри 80%

На рисунку 4.10 показано траєкторію вихідної потужності газової турбіни з рівнем достовірності 99%. Загальна картина залишається узгодженою з випадками з рівнем достовірності 60% та 80%, тобто максимальна диспетчерська потужність досягається з ночі до ранніх ранкових годин, тоді як мінімальна потужність утримується протягом періодів пікової генерації фотоелектричних систем (з 08:00 до 18:00). Однак, при цьому підвищеному порозі достовірності, різниця між двома методами моделювання ймовірностей стає більш помітною, тобто, завдяки застосуванню зваженого розподілу ймовірностей, оптимізовані схеми диспетчеризації газової турбіни ще ближчі до оптимальної кривої за фактичних історичних сценаріїв порівняно з традиційною моделлю нормального розподілу. Цей результат додатково підтверджує, що за вимог вищого рівня достовірності використання зваженого розподілу ймовірностей допомагає підвищити точність моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем і, таким чином, краще спрямовує оптимальну стратегію диспетчеризації віртуальної електростанції.

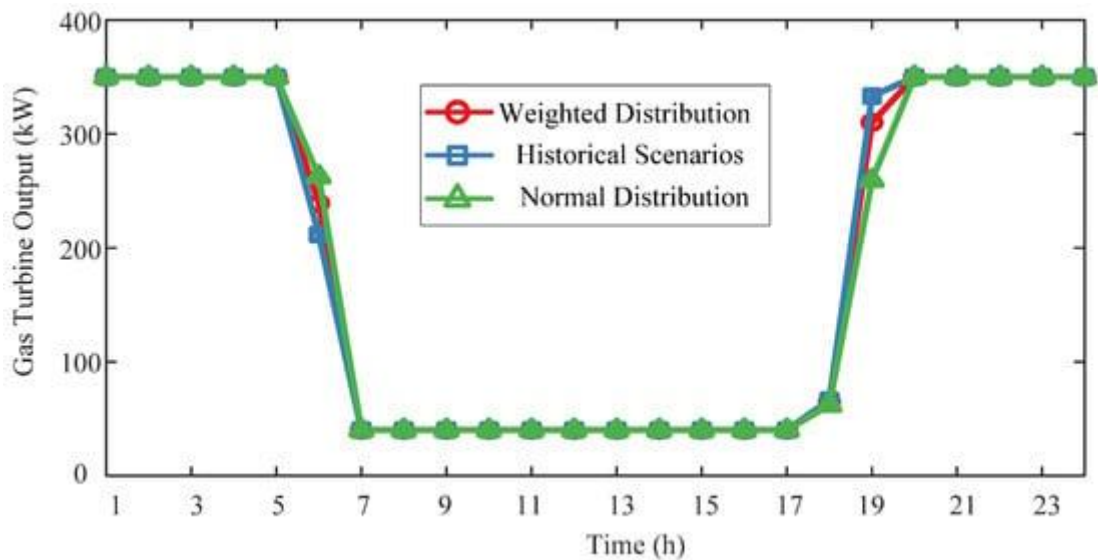


Рисунок 4.10. – Траєкторія вихідної потужності газової турбіни з рівнем довіри 99%

На рисунку 4.11 показано відносну похибку траєкторій вихідної потужності газової турбіни, отриманих методами зваженого розподілу ймовірностей та нормального розподілу, за трьох рівнів довіри (60%, 80% та 99%), у порівнянні з оптимальною траєкторією за фактичних історичних сценаріїв. Помітні піки похибок виникають близько 06:00 ранку та між 18:00 та 19:00 вечора. Зі збільшенням рівня довіри від 60% до 99% загальна величина цих похибок поступово зменшується, що свідчить про те, що вищі рівні довіри допомагають покращити точність моделювання як для запропонованого зваженого розподілу ймовірностей, так і для нормального розподілу. На кожному заданому рівні довіри піки похибок, пов'язані зі зваженим розподілом ймовірностей, послідовно менші, ніж піки похибок з нормальним розподілом ймовірностей, що підтверджує підвищену точність моделювання невизначеності.

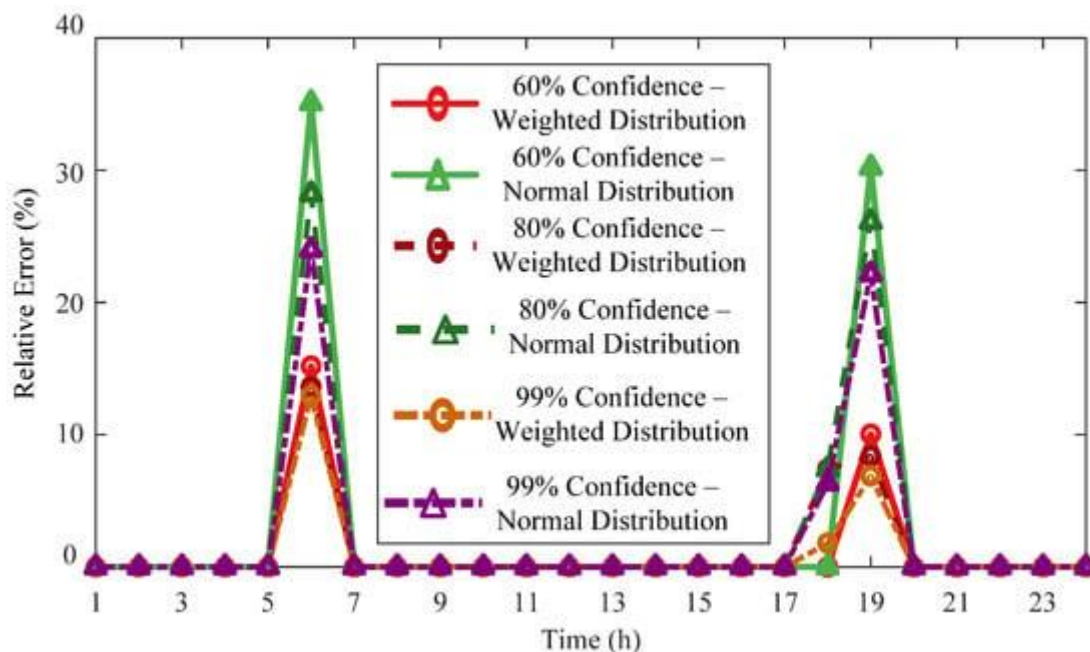


Рисунок 4.11. – Порівняння помилок траєкторії з різними розподілами ймовірностей на різних рівнях довіри

➤ Результати оптимізації диспетчеризації викидів вуглецю

Як показано на рисунках 4.8 , 4.9 та 4.10 , оптимальна траєкторія вихідної потужності газової турбіни з урахуванням фактичних історичних сценаріїв сонячної радіації демонструє мінімальну вихідну потужність протягом перехідних інтервалів, що вказує на те, що ключем до зниження експлуатаційних витрат ВЕС є зменшення споживання палива та викидів вуглецю в результаті роботи газової турбіни. Викиди вуглецю з різними схемами диспетчеризації та різними рівнями достовірності порівнюються на рисунках 4.12, 4.13 та 4.14.

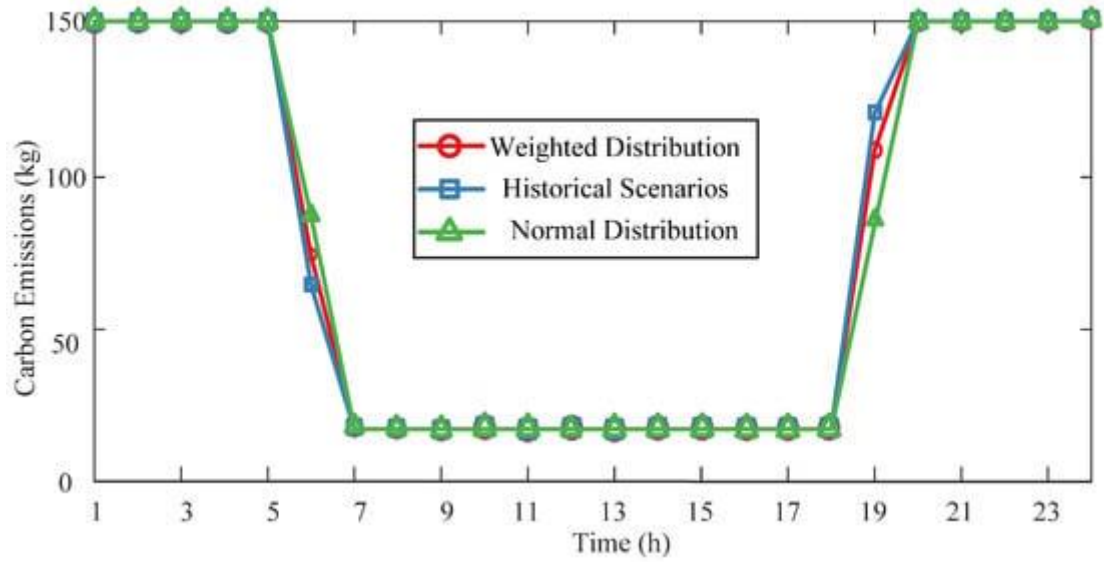


Рисунок 4.12. – Викиди вуглецю з рівнем довіри 60%

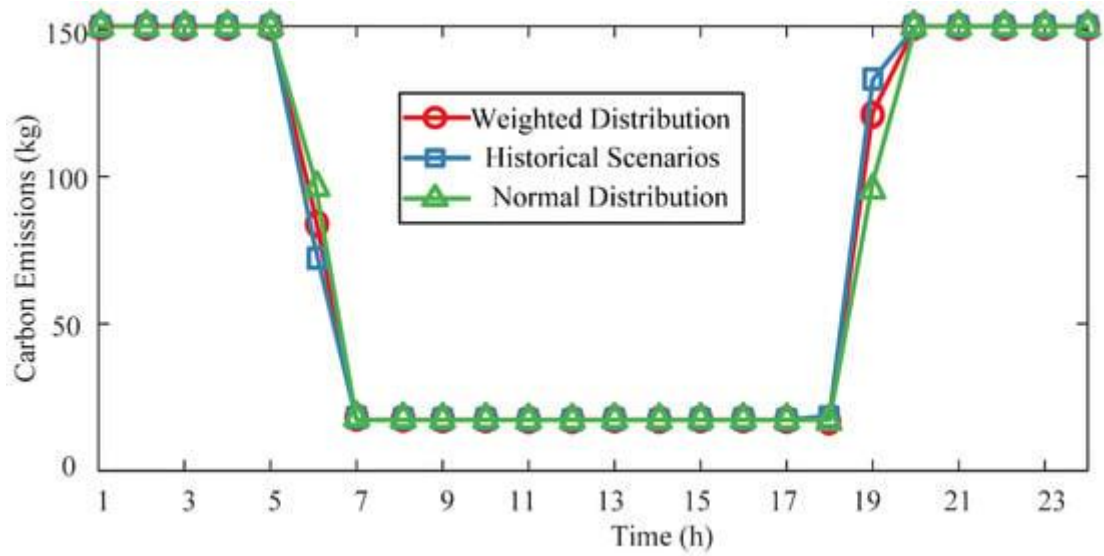


Рисунок 4.13. – Викиди вуглецю з рівнем довіри 80%

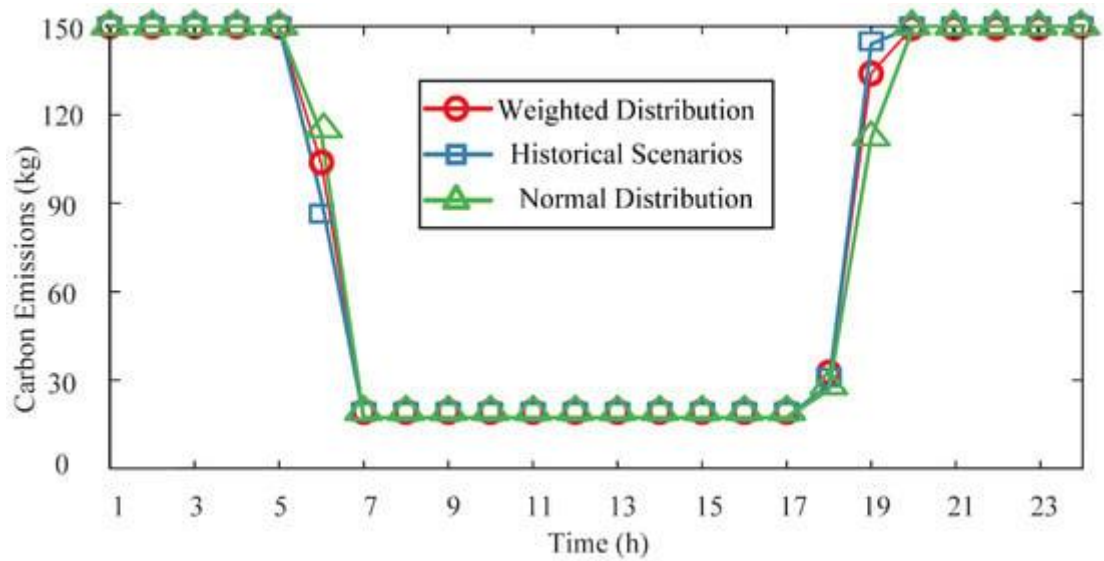


Рисунок 4.14. – Викиди вуглецю з рівнем достовірності 99%

На рисунку 4.12 представлено профілі викидів вуглецю газової турбіни за рівня довіри 60%, порівнюючи запропонований зважений розподіл ймовірностей та нормальний розподіл ймовірностей. З 20:00 до 05:00 викиди вуглецю залишаються на піку (150 кг), перш ніж знизитися до мінімуму (20 кг) з 08:00 до 18:00. Примітно, що диспетчеризація, отримана на основі зваженого розподілу ймовірностей, дає викиди вуглецю, які ближчі до оптимального значення, демонструючи кращі показники порівняно з нормальним розподілом.

На рисунках 4.13 та 4.14 показано профілі викидів вуглецю газової турбіни на рівнях довіри 80% та 99% відповідно. Подібно до сценарію з довірою 60%, викиди вуглецю досягають своїх найвищих рівнів у нічний та ранній ранок, зберігаючи при цьому найнижчі рівні протягом денних періодів з високою виробленою потужністю фотоелектричних систем. Викиди вуглецю, отримані за допомогою зваженого розподілу ймовірностей, демонструють ближчу відповідність фактичному історичному сценарію порівняно з нормальним розподілом зі зростанням рівня довіри, особливо в періоди значних коливань потужності газової турбіни, що призводить до ефективного скорочення викидів вуглецю.

Комплексний аналіз на рівнях довіри 60%, 80% та 99% показує, що зважений розподіл ймовірностей послідовно перевершує нормальний розподіл ймовірностей, демонструючи менші похибки та вищий ступінь відповідності фактичним історичним сценаріям. Ця перевага стає особливо значною на вищих рівнях довіри (наприклад, 99%), демонструючи практичну цінність підходу зваженого розподілу ймовірностей, застосованого до оптимізації диспетчеризації ВЕС, у зменшенні викидів вуглецю та експлуатаційних витрат.

➤ Результати оптимізації відправлення прибутків, отриманих VPP

На рисунку 4.15 порівнюються результати прибутку схем диспетчеризації, отримані зі сценаріїв, згенерованих запропонованим зваженим розподілом

ймовірностей та нормальним розподілом, з різними рівнями довіри (75%, 85%, 92%, 95% та 99%), застосованими до скринінгу сценаріїв. Горизонтальна вісь позначає рівень довіри, а вертикальна вісь представляє прибуток. Червоні стовпчики вказують середній прибуток, отриманий зваженим розподілом ймовірностей за різних рівнів довіри, а зелені стовпчики представляють результати з нормальним розподілом ймовірностей за різних рівнів довіри.

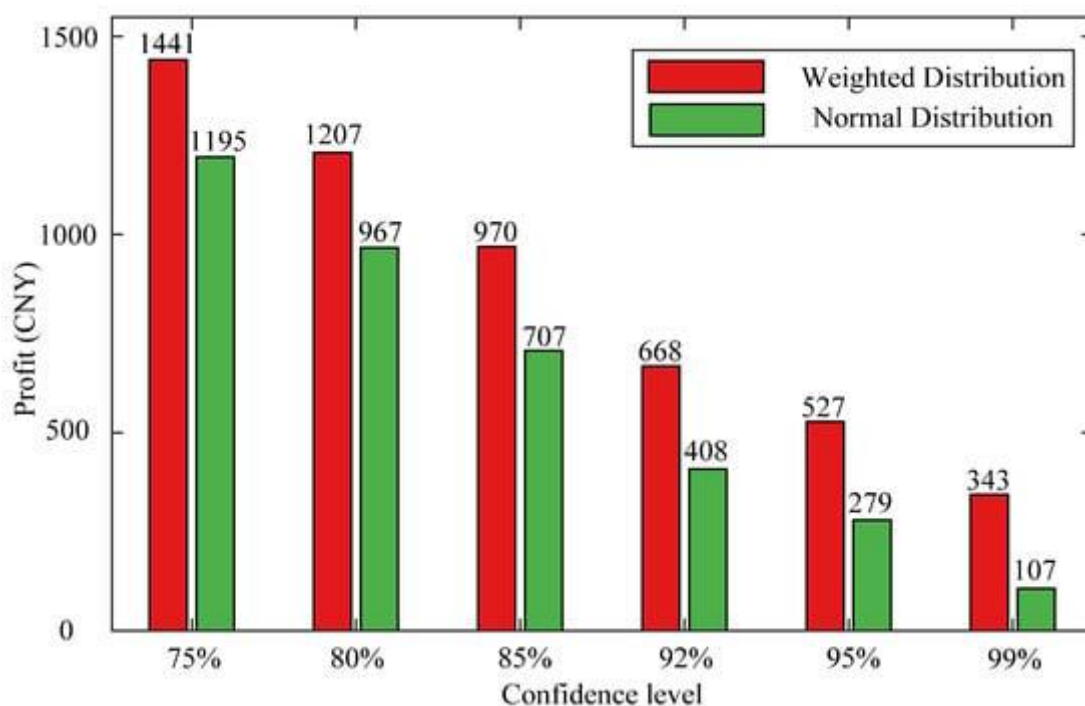


Рисунок 4.15. – Прибутки VPP з різними розподілами ймовірностей та рівнями довіри

Як показано на рисунку 4.15, загальний прибуток, отриманий ВЕС, зменшується зі збільшенням рівня довіри, прийнятого для скринінгу сценаріїв генерованого сонячного випромінювання. Цю тенденцію можна пояснити необхідністю більш консервативних стратегій диспетчеризації та більшої резервної потужності для подолання підвищеної невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем з вищими вимогами до довіри. На всіх проаналізованих рівнях довіри прибуток від сценаріїв, згенерованих нормальним розподілом, залишається нижчим, ніж від сценаріїв, згенерованих зваженим розподілом ймовірностей. Це можна пояснити швидшими коливаннями

сонячного випромінювання, при цьому нормальний розподіл застосовується виключно для моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем. Зі зростанням рівня довіри система ВЕС все більше залежить від потужності газової турбіни, що призводить до зменшення прибутку ВЕС. Це демонструє компроміс між надійністю та економічною ефективністю; тобто вища надійність та доцільність схеми диспетчеризації досягаються ціною зменшення прибутку. Відповідний рівень довіри може бути призначений операторами ВЕС, враховуючи прийнятний операційний ризик для ВЕС, щоб максимізувати свій прибуток, отриманий від участі на ринку електроенергії та вуглецю.

4.4. Перевірка ефективності з різними налаштуваннями параметрів

З урахуванням сценаріїв моделювання, прийнятих у розділах 4.1 , 4.2 та 4.3, встановлених як базовий випадок, на рисунку 16 показано порівняння прибутків VPP за різних розподілів ймовірностей та рівнів довіри зі зниженою ціною на вуглець порівняно з базовим випадком. У цьому випадку ціна на вуглець знижується з 68 юанів/тонну до 42,5 юанів/тонну, тоді як усі інші параметри VPP залишаються незмінними. Порівняно з рисунком 15 , загальний прибуток зростає за всіма рівнями довіри як для зваженого, так і для нормального розподілу ймовірностей. Ці результати свідчать про те, що зниження ціни на вуглець покращує економічні показники VPP, а зважений розподіл продовжує забезпечувати стабільно вищі прибутки, ніж нормальний розподіл за всіх рівнів довіри.

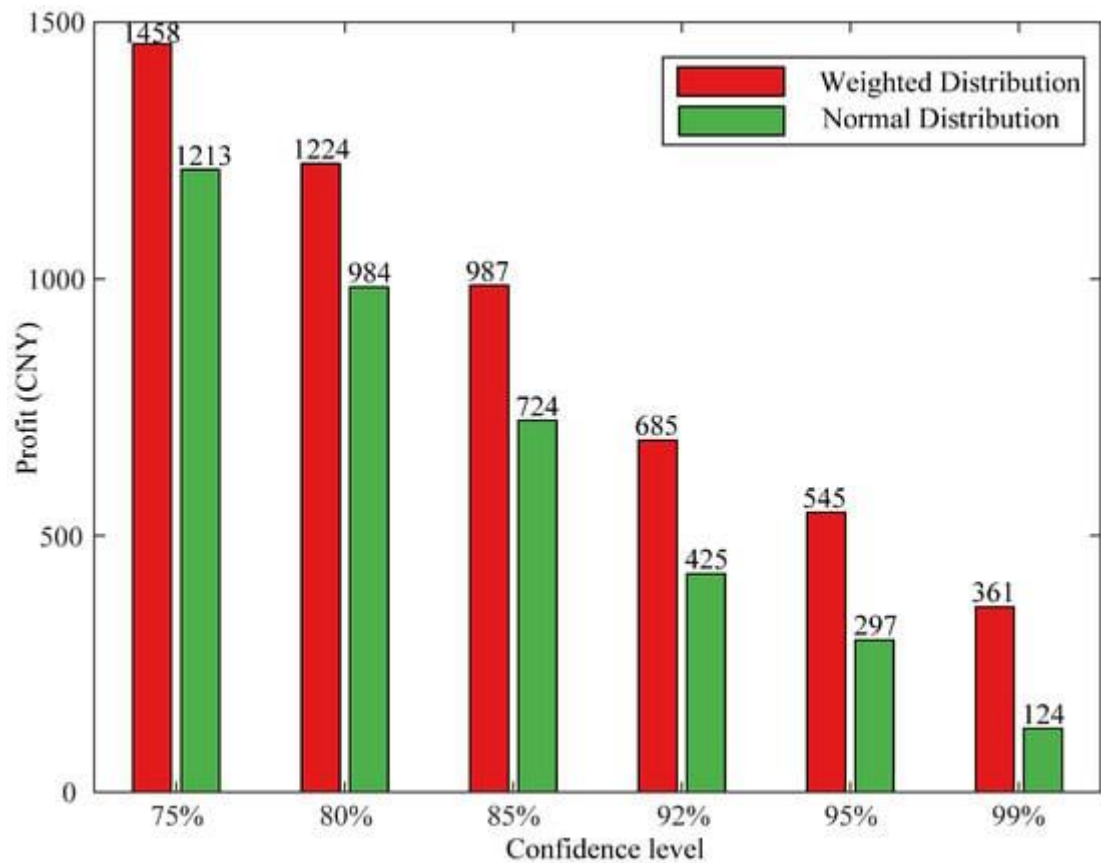


Рисунок 16. Порівняння прибутків VPP зі зниженою ціною на вуглець.

На рисунку 4.17 показано порівняння прибутків ВПП за різних розподілів ймовірностей та рівнів довіри, зі збільшеним коефіцієнтом витрат ГТ порівняно з базовим випадком. У цьому випадку коефіцієнт витрат на технічне обслуговування а і і-ї ГТ збільшується з 0,006 до 0,00675, при цьому всі інші параметри ВПП залишаються незмінними. Порівняно з рисунком 15, загальний прибуток зменшується за всіма рівнями довіри як для зваженого, так і для нормального розподілу ймовірностей. Ці результати вказують на те, що вищі експлуатаційні витрати та витрати на технічне обслуговування знижують економічну ефективність ВПП, тоді як зважений розподіл все ще забезпечує стабільно вищі прибутки, ніж нормальний розподіл за всіма рівнями довіри.

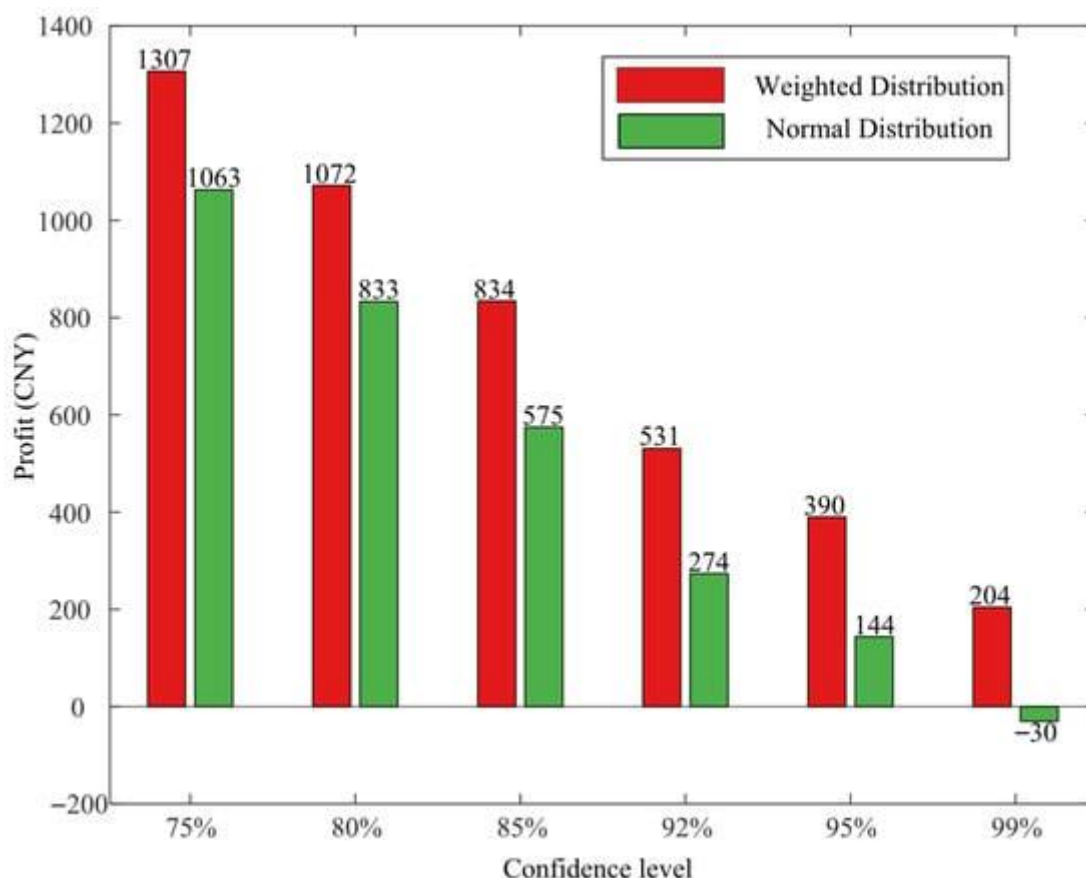


Рисунок 4.17. – Порівняння прибутків ВПП зі збільшенням коефіцієнта витрат на експлуатацію та технічне обслуговування ГТ

Підсумовуючи, на рисунках 4.15, 4.16 та 4.17 показано вплив зниження ціни на вуглець та збільшення витрат на експлуатацію та технічне обслуговування на прибутковість віртуальної електростанції (ВЕС). Зниження ціни на вуглець з 68 юанів/тонну до 42,5 юанів/тонну (рисунок 4.16) збільшує прибутки порівняно з базовим варіантом (рисунок 4.15), тоді як підвищення коефіцієнта витрат на технічне обслуговування газотурбінної турбіни з 0,006 до 0,00675 (рисунок 4.17) зменшує прибутки. За всіма сценаріями зважений розподіл ймовірностей дає вищі прибутки, ніж нормальний розподіл, що підтверджує його перевагу у врахуванні невизначеностей та покращенні економічних результатів роботи ВЕС.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У цьому дослідженні пропонується оптимізована стратегія диспетчеризації для ВЕС, що бере участь у ринку електроенергії та вуглецю, з використанням зваженого ймовірнісного моделювання невизначеності сонячної радіації. На основі результатів дослідження можна зробити такі висновки:

Завдяки поєднанню кількох відповідних моделей розподілу ймовірностей для створення зваженої моделі розподілу ймовірностей на основі історичних даних про сонячну радіацію, запропонована модель ефективно фіксує характеристики мінливості радіації, що закладає основу для алгоритму оптимізації диспетчеризації на основі довіри, чому сприяє підвищена точність моделювання невизначеності вихідної потужності фотоелектричних систем.

На основі встановленої моделі розподілу ймовірностей метод вибірки відхилення генерує великі обсяги статистично репрезентативних даних часових рядів сонячної радіації, що допомагає підвищити надійність і точність алгоритму оптимізації диспетчеризації. Механізм фільтрації довірчих інтервалів додатково уточнює вибіркові дані, видаляючи викиди за межами встановлених довірчих меж, що забезпечує надійний набір даних для подальшої оптимізації диспетчеризації.

Завдяки інтеграції VPP у ринок електроенергії та вуглецю, запропонована зважена ймовірнісна модель може генерувати сценарії сонячної радіації, характеристики яких ближчі до історичних сценаріїв, а отримана схема диспетчеризації здатна як зменшити викиди вуглецю, так і збільшити прибуток порівняно з традиційною нормальною ймовірнісною моделлю. Таким чином, баланс між економічною ефективністю та захистом навколишнього середовища досягається завдяки оптимізованій схемі диспетчеризації, запропонованій для VPP.

Завдяки різним рівням достовірності, що використовуються для перевірки згенерованих сценаріїв, оптимізована схема диспетчеризації, що застосовується до ВЕС, збалансовує невід'ємний компроміс між економічною вигодою та

уникненням ризику. Вищі рівні достовірності підвищують експлуатаційну надійність, але одночасно збільшують експлуатаційні витрати через консервативні схеми диспетчеризації, що призводить до зниження використання фотоелектричних систем та вищих витрат, пов'язаних з викидами вуглецю. Рівень достовірності може бути призначений операторами ВЕС, враховуючи прийнятний операційний ризик для максимізації прибутку, отриманого ВЕС від участі на ринку електроенергії та вуглецю.

Хоча запропонований підхід демонструє переваги в покращенні моделювання виробництва фотоелектричних батарей, зниженні експлуатаційних витрат та підвищенні загальної прибутковості ВЕС, все ще можна внести покращення в наступні аспекти, які є основними перспективами майбутніх досліджень.

Хоча це дослідження зосереджено на нормальному, логарифмічно-нормальному розподілі та розподілі Вейбулла, у майбутніх дослідженнях для подальшого підвищення точності та застосовності можуть бути розглянуті альтернативні моделі, такі як бета-розподіл для нормалізованої сонячної радіації, гамма-розподіл для сильно мінливої сонячної радіації та спільний розподіл ймовірностей вітру та сонця для багатоенергетичного планування. Хоча вибірка відхилення виявляється ефективною, для створення великомасштабних наборів даних про радіацію з вищою точністю можна застосувати більш просунуті статистичні методи. Такі екологічні аспекти, як викиди вуглецю, ефективність використання енергії та показники сталого розвитку, можуть бути додатково включені для створення більш комплексної системи оптимізації планування VPP.

Загалом, майбутні напрямки досліджень включають розширення множини розподілу ймовірностей, удосконалення методів генерації даних та розробку багатоцільових оптимізаційних структур.

Запропонований у дослідженні алгоритм може надати особам, які приймають рішення щодо ВЕС, кількісні інструменти для оцінки впливу невизначеності сонячної радіації на експлуатаційний дохід ВЕС та оптимізовану

схему планування відповідно до рівня достовірності, що уподобається особою, яка приймає рішення. Генеруючи більш реалістичні сценарії моделювання фотоелектричних систем, запропонована структура підвищує гнучкість та надійність планування ВЕС, сприяє участі та підвищує конкурентоспроможність на ринках електроенергії та вуглецю в режимі реального часу. Крім того, вона підтримує ефективне використання фотоелектричних систем та економічне планування, а також зм'якшує невизначеності щодо виробництва енергії з відновлюваних джерел, тим самим сприяючи дотриманню квот на відновлювану енергетику та просуванню переходу на стале енергопостачання.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

Внесок дослідження та вдосконалення порівняно з існуючими роботами головним чином проявляється в таких трьох аспектах:

- Зважену модель розподілу ймовірностей було створено шляхом інтегрування нормального, логарифмічно-нормального та розподілу Вейбулла, що забезпечує точніше статистичне представлення сонячної радіації.
- Для генерації часових рядів даних про сонячну радіацію, що відповідають зваженому розподілу ймовірностей, було використано метод відхилення вибірки, що дозволило отримати більш реалістичні вхідні дані для запланованої оптимізації VPP.
- Було запропоновано механізм фільтрації довірчих інтервалів для фільтрації згенерованих даних, що дозволяє отримувати оптимальні плани планування, які максимізують експлуатаційний дохід VPP з різними заданими рівнями довіри.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України: Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96–ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665–III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803–р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540–VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019–VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908–р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80> .

9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021–2030 роки : Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно–енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
11. Feng, Y.; Jia, H.; Wang, X.; Ning, B.; Liu, Z.; Liu, D. Review of Operations for Multi-energy Coupled Virtual Power Plants Participating in Electricity Market. *Energy Rep.* 2023, 9, 992–999.
12. Hassan, M.A.; Bailek, N.; Bouchouicha, K.; Ibrahim, A.; Jamil, B.; Kuriqi, A.; Nwokolo, S.C.; El-kenawy, E.M. Evaluation of Energy Extraction of PV Systems Affected by Environmental Factors under Real Outdoor Conditions. *Theor. Appl. Climatol.* 2022, 150, 715–729.
13. Zhang, Z.; Zhao, Y.; Bo, W.; Zhang, D.; Shi, J. Optimal Scheduling of Virtual Power Plant Considering Revenue Risk with High-Proportion Renewable Energy Penetration. *Electronics* 2023, 12, 4387.
14. Li, J.; Mo, H.; Sun, Q.; Wei, W.; Yin, K. Distributed Optimal Scheduling for Virtual Power Plant with High Penetration of Renewable Energy. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2024, 160, 110103.
15. Liu, Y.; Chen, Y. A Normal Distribution Model for Diffuse Radiation versus Incidence Angle. *Sol. Energy* 2019, 186, 60–71.
16. Kim, S.Y.; Sapotta, B.; Jang, G.; Kang, Y.; Kim, H. Prefeasibility Study of Photovoltaic Power Potential Based on a Skew-normal Distribution. *Energies* 2020, 13, 676.
17. Afzaal, M.U.; Sajjad, I.A.; Awan, A.B.; Paracha, K.N.; Khan, M.F.N.; Bhatti, A.R.; Zubair, M.; Rehman, W.U.; Amin, S.; Haroon, S.S.; et al. Probabilistic Generation Model of Solar Irradiance for Grid Connected Photovoltaic Systems Using Weibull Distribution. *Sustainability* 2020, 12, 2241.
18. Yao, L.; Wang, X.; Ding, T.; Wang, Y.; Wu, X.; Liu, J. Stochastic Day-ahead Scheduling of Integrated Energy Distribution Network with Identifying

- Redundant Gas Network Constraints. *IEEE Trans. Smart Grid* 2018, 10, 4309–4322.
19. Hu, J.; Li, H.; Liu, Z. Scenario Reduction Based on Correlation Sensitivity and its Application in Microgrid Optimization. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2021, 31, e12747.
 20. Li, H.; Yu, H.; Liu, Z.; Li, F.; Wu, X.; Cao, B.; Zhang, C.; Liu, D. Long-term Scenario Generation of Renewable Energy Generation Using Attention-based Conditional Generative Adversarial Networks. *Energy Convers. Econ.* 2024, 5, 15–27.
 21. Ma, Z.; Gao, J.; Hu, W.; Dinavahi, V. Risk-adjustable Stochastic Schedule Based on Sobol Augmented Latin Hypercube Sampling Considering Correlation of Wind Power Uncertainties. *IET Renew. Power Gener.* 2021, 15, 2356–2367.
 22. Campi, M.C.; Garatti, S. A Sampling-and-Discarding Approach to Chance-Constrained Optimization: Feasibility and Optimality. *J. Optim. Theory Appl.* 2011, 148, 257–280.
 23. Peng, C.; Fan, G.; Xiong, Z.; Zeng, X.; Sun, H.; Xu, X. Integrated Energy System Planning Considering Renewable Energy Uncertainties Based on Multi-scenario Confidence Gap Decision. *Renew. Energy* 2023, 216, 119100.
 24. Gu, B.; Shen, H.; Lei, X.; Hu, H.; Liu, X. Forecasting and Uncertainty Analysis of Day-ahead Photovoltaic Power Using a Novel Forecasting Method. *Appl. Energy* 2021, 299, 117291.
 25. Shi, Y.; Li, W.; Fan, G.; Zhang, L.; Yang, F. Low-Carbon Dispatch of an Integrated Energy System Considering Confidence Intervals for Renewable Energy Generation. *Energy Eng.* 2024, 121, 461–482.
 26. Wang, T.; Wang, X.; Gong, Y.; Jiang, C.; Xiong, F.; Li, L.; Zhao, Y. Initial Allocation of Carbon Emission Permits in Power Systems. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2017, 5, 239–247.
 27. Zhang, L.; Liu, D.; Cai, G.; Lyu, L.; Koh, L.H.; Wang, T. An Optimal Dispatch Model for Virtual Power Plant that Incorporates Carbon Trading and Green Certificate Trading. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2023, 144, 108558.

28. Song, C.; Jing, X. Bidding Strategy for Virtual Power Plants with the Day-ahead and Balancing Markets Using Distributionally Robust Optimization Approach. *Energy Rep.* 2023, 9, 637–644.
29. Sikorski, T.; Jasiński, M.; Ropuszyńska-Surma, E.; Węglarz, M.; Kaczorowska, D.; Kostyła, P.; Leonowicz, Z.; Lis, R.; Rezmer, J.; Rojewski, W.; et al. A Case Study on Distributed Energy Resources and Energy-storage Systems in a Virtual Power Plant Concept: Economic Aspects. *Energies* 2019, 12, 4447.
30. Wei, Z.; Sun, Z.; Liang, Z. Virtual Power Plant Optimal Dispatching Based on Multi-Objective and Two-Stage Programming. *South. Power Syst. Technol.* 2023, 17, 109–118.
31. Chen, J.; Wang, F.; Xu, T.; Zuo, C. Optimal Scheduling of Virtual Power Plant Considering Wind Power and PV Uncertainty in Electric-Carbon Market. *Distrib. Energy* 2024, 9, 60–68.