

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Тисячний Андрій Григорович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Оптимізація використання сонячних та вітрових установок у змішаних
енергосистемах
_(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Тисячний А. Г.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Савченко Л.Г.

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Тисячний А. Г. Оптимізація використання сонячних та вітрових установок у змішаних енергосистемах. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Оптимізація використання сонячних та вітрових установок у змішаних енергосистемах є необхідною умовою підвищення надійності електропостачання, зниження витрат і скорочення викидів. Оскільки генерація з відновлюваних джерел є змінною та залежною від погоди, ключове завдання роботи полягає в узгодженні її роботи з іншими видами потужності і споживчим попитом.

Ключові слова: сонячні та вітрові установки; прогнозування генерації на основі метеоданих; моделі машинного навчання; інтелектуальне керування енергомережами.

ABSTRACT

Tysiachnyi A. G. Optimization of the use of solar and wind installations in hybrid power systems. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

Optimizing the use of solar and wind installations in hybrid power systems is a necessary condition for increasing the reliability of power supply, reducing costs, and reducing emissions. Since renewable energy generation is variable and weather-dependent, the key objective of the work is to coordinate its operation with other types of power generation and consumer demand.

Keywords: solar and wind installations; generation forecasting based on meteorological data; machine learning models; smart grid management.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 МРРТ-МЕТОДИ ТА АРХІТЕКТУРИ HSWES ДЛЯ МЕРЕЖЕВИХ ІНТЕГРОВАНИХ PV–DFIG СИСТЕМ	6
1.1 Технології виробництва електроенергії: відновлювальні джерела та інтегровані системи PV-DFIG	6
1.2 Алгоритми відстеження точки максимальної потужності (MPPT) у сучасній енергетиці	7
Висновок по першому розділу	12
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ	14
2.1 Блок-схема електрично зв'язаної HSWES та її робота	14
2.2 Моделювання сонячної фотоелектричної системи	17
2.3 Підвищувальний перетворювач (Boost-конвертер)	19
2.4 Моделювання вітрової турбіни	20
2.5 Моделювання ДВІГ (Двояко живильного індукційного генератора)	21
Висновки по другому розділу	23
РОЗДІЛ 3 ОГЛЯД ТА ЗАСТОСУВАННЯ МРРТ	24
3.1 Сонячний МРРТ	24
3.2 Алгоритм збурень і спостережень (Perturb and Observe Algorithm)	25
3.3 МРРТ для вітрової турбіни	27
Висновки по третьому розділу	29
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ	30
Висновки по четвертому розділу	34
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

У контексті глобального енергетичного переходу та посилення вимог до екологічної безпеки, інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальну енергосистему стала пріоритетним завданням для енергетики всього світу. Сонячна та вітрова генерація є найбільш динамічними секторами ВДЕ завдяки їхній доступності та постійному зниженню вартості технологій. Однак стохастичний характер природних ресурсів — мінливість сонячного випромінювання та швидкості вітру — створює значні виклики для стабільності та надійності енергопостачання. Гібридні сонячно-вітрові енергетичні системи (ГСВЕС) дозволяють нівелювати ці недоліки шляхом взаємо доповнення ресурсів, що забезпечує більш збалансований графік генерації і це визначає актуальність теми.

Сучасні дослідження в галузі гібридних систем зосереджені на підвищенні коефіцієнта корисної дії кожного компонента. Особлива увага приділяється вітрогенераторам на основі асинхронної машини подвійного живлення (DFIG — Doubly Fed Induction Generator). DFIG є де-факто стандартом для потужних вітрових установок завдяки можливості регулювання активної та реактивної потужності через роторний перетворювач, що становить лише близько 30% від номінальної потужності системи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значну кількість робіт, присвячених окремим аспектам керування DFIG або фотоелектричними системами, питання комплексної оптимізації потоків енергії в гібридній системі за умов динамічної зміни зовнішніх факторів залишається актуальним. Існує потреба в удосконаленні стратегій керування, які б забезпечували не лише максимальне відстеження точки потужності (MPPT), а й стабільну роботу системи при різких змінах навантаження або мережевих порушеннях.

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка та дослідження ефективної стратегії керування гібридною сонячно-вітровою системою на основі DFIG для оптимізації виробництва електроенергії. Основна увага

приділяється координації роботи перетворювачів для забезпечення максимальної ефективності використання природних ресурсів та підвищення динамічної стійкості системи в цілому.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення та розподілу енергії в гібридних енергетичних системах, що поєднують сонячні фотоелектричні установки та вітрогенераторів на основі асинхронних машин подвійного живлення (DFIG), при їх взаємодії з електричною мережею.

Предметом дослідження є стратегії, алгоритми та математичні моделі керування перетворювачами потужності в гібридній системі, спрямовані на оптимізацію режимів генерації, підвищення енергоефективності та забезпечення стабільності вихідних параметрів електроенергії.

Методи дослідження: математичне моделювання, теорія автоматичного керування, методи МРРТ.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Тисячний А. Г.

ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ.

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

2. Слівінська Д. В., Тисячний А. Г.

ВПЛИВ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ НА АВТОМАТИЧНІ ВИМИКАЧІ ТА ЗАПОБІЖНИКИ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

РОЗДІЛ 1

MPPT-МЕТОДИ ТА АРХІТЕКТУРИ HSWES ДЛЯ МЕРЕЖЕВИХ ІНТЕГРОВАНИХ PV–DFIG СИСТЕМ

1.1 Технології виробництва електроенергії: відновлювальні джерела та інтегровані системи PV-DFIG

Технології виробництва електроенергії розвивалися, щоб задовольнити зростаючий попит на електроенергію у 21 столітті. Глобальний дефіцит електроенергії є наслідком швидкого зростання населення та урбанізації. Системи виробництва електроенергії поділяються на дві основні категорії: системи відновлюваної та невідновлюваної енергії, залежно від ступеня їх вичерпності. Природні ресурси, такі як сонячне світло, біоенергія, вітер, водні потоки, геотермальне тепло та припливи, можуть використовуватися для виробництва відновлюваної енергії. На відміну від цього, невідновлювана енергія отримується з обмежених ресурсів, таких як ядерна енергія та нафтопродукти, такі як природний газ, вугілля та сира нафта[1]. Комунальні та споживчі витрати на енергію зростають через високі витрати на технічне обслуговування та низький контроль якості. Крім того, нафта серйозно забруднює повітря[2,3]. На додаток до негативних екологічних наслідків, токсичних відходів і дорогих операцій та обслуговування, викопне паливо має обмежені запаси і зрештою закінчиться[4]. Зростаючий глобальний попит на енергію та нагальна необхідність зменшення викидів парникових газів стимулюють тенденцію до використання відновлюваних джерел енергії. Завдяки їх зростаючій доступності та швидкому технологічному прогресу, сонячна та вітрова енергія стимулюють ці зміни. Вміле поєднання різних чистих джерел енергії в електричну систему забезпечує стабільне та екологічно чисте джерело енергії[5]. DFIG (генератор двостороннього живлення) є популярним варіантом для WECS (вітроенергетичних перетворювачів) завдяки його ефективності в широкому діапазоні швидкостей вітру та здатності незалежно контролювати активну та реактивну потужність. Два VSC (перетворювачі напруги), з'єднані загальною ланкою постійного

струму, утворюють перетворювач $\beta t\beta$, дозволяючи незалежне керування сторонами мережі та генератора та двонаправлених потік потужності[6]. Інтегрована енергетична система утворюється, коли сонячні фотоелектричні панелі інтегровані у вітрову енергетичну систему на основі DC-з'єднання перетворювача $\beta t\beta$ DFIG. Крім того, завдяки безпосередній інтеграції сонячних фотоелектричних систем у ланку постійного струму, додаткові інвертори не потрібні, що зменшує складність і вартість системи[7]. Виробництво сонячної та вітрової енергії значною мірою залежить від навколишнього середовища, що робить виробництво електроенергії нестійким та переривчастим.

1.2 Алгоритми відстеження точки максимальної потужності (MPPT) у сучасній енергетиці

MPPT (стеження за точкою максимальної потужності) необхідний для обох джерел енергії для оптимальної роботи [8,9]. Для сонячних фотоелектричних систем необхідний незалежний механізм MPPT для максимізації видобутку енергії за різних умов освітлення[10,11]. Гібридні методи MPPT необхідні для вітроенергетичних систем для оптимізації захоплення енергії вітру. Використання цих методів MPPT у гібридній системі DFIG, підключеній до мережі, сонячній фотоелектричній системі, підключеній до ланки постійного струму, та перетворювачі $\beta t\beta$ створює кілька технічних проблем і можливостей[12,13]. Як показано на рис. 1.1, MPPT поділяється на наступні категорії: MPPT для сонячної енергії реалізується за допомогою звичайного та мета евристичного MPPT. Потім максимізована незалежна сонячна енергія інтегрується з перетворювачем DFIG. Потім розробляється гібридний MPPT[14] для вітрової турбіни з використанням HSWES (гібридної системи зберігання енергії вітру). Надійність гібридної енергетичної системи, прив'язаної до мережі, вища, ніж у звичайної системи відновлюваної енергії. Джерела відновлюваної енергії замінюються HSWES через їх вищу надійність. Системи електромережі, що включають різні джерела енергії, ефективніші за традиційні комунальні мережі[15]. На рис.1. 2 зображена схема HSWES.

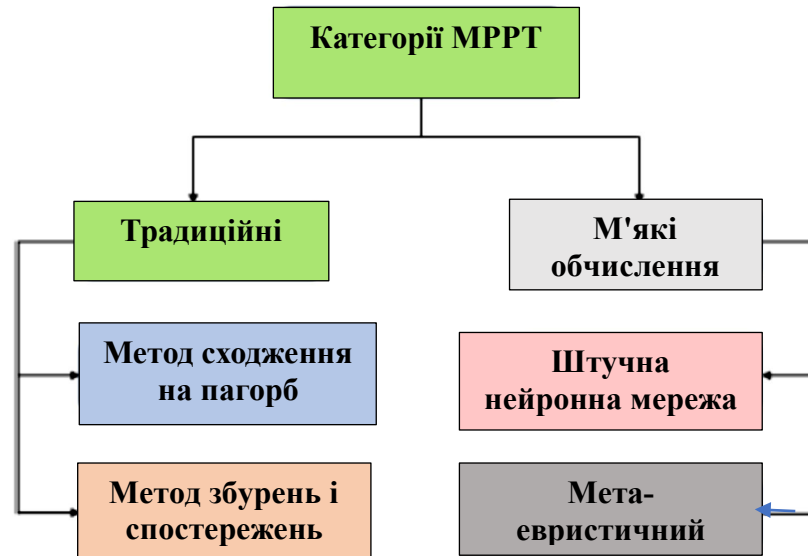


Рисунок 1.1 Блок-схема «Категорії MPPT» (класифікація методів відстеження точки максимальної потужності).

«Традиційні» методи відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking, MPPT) становлять базову групу алгоритмів керування, що застосовуються переважно у фотогальванічних системах для забезпечення роботи джерела в режимі максимальної віддачі енергії за змінної освітленості, температури та навантаження. Їх називають «традиційними», оскільки вони історично є найпоширенішими, відносно простими для реалізації та не потребують складних моделей або значних обчислювальних ресурсів[16].

Метод сходження на пагорб (Hill Climbing) належить до алгоритмів локального пошуку максимуму потужності шляхом невеликого керованого збурення робочої точки. Його суть полягає в послідовній зміні керувального параметра силового перетворювача (зазвичай коефіцієнта заповнення ШІМ), що спричиняє зміну напруги або струму панелі, після чого вимірюється нова потужність. Якщо потужність зросла, подальші кроки виконуються в тому самому напрямі; якщо зменшилась — напрям зміни параметра інвертується. Таким чином алгоритм «підіймається» вгору по кривій $P(U)$ до околу точки максимальної потужності (ТМП), де починаються невеликі коливання навколо максимуму[17].

У класифікації традиційних МРРТ-методів зазвичай виокремлюють підхід на основі збурення й спостереження та підхід на основі провідності. Метод збурення і спостереження (Perturb and Observe, P&O) полягає у періодичній зміні робочої напруги або струму та аналізі, чи зросла потужність; у разі зростання збурення продовжують у тому самому напрямку, а у разі спадання — змінюють напрямок. Перевагами методу є простота й універсальність, тоді як типовими недоліками виступають коливання біля точки максимуму та можливі помилки за швидких змін умов (наприклад, при різкій зміні інсоляції) [18].

Окремо до традиційних часто відносять методи з фіксованими або емпіричними співвідношеннями, зокрема за сталою напругою та за часткою напруги холостого ходу (Fractional Open-Circuit Voltage), а також за часткою струму короткого замикання (Fractional Short-Circuit Current). Вони використовують наближені залежності між величинами в точці максимальної потужності та легко вимірюваними параметрами. Їхніми перевагами є низька вартість і простота, а основними обмеженнями — знижена точність та залежність від параметрів конкретного модуля й умов експлуатації.

Отже, традиційна класифікація МРРТ-методів охоплює алгоритми збурення-спостереження, сходження на пагорб та наближені методи на основі сталих або часткових співвідношень. Попри появу інтелектуальних і адаптивних підходів, саме традиційні методи й надалі залишаються практично важливими завдяки простоті, відтворюваності та достатній ефективності в широкому спектрі застосувань.

М'які обчислення (soft computing) охоплюють підходи, що дозволяють ефективно працювати з невизначеністю, нелінійністю та зашумленими даними, жертвуючи строгістю на користь практичної точності та адаптивності. У контексті фотоелектричних систем ці підходи набули особливої ваги під час розв'язання задачі відстеження точки максимальної потужності (МРРТ), адже характеристики сонячних модулів істотно змінюються під впливом освітленості, температури та часткового затінення.

Класифікацію методів МРРТ доцільно розглядати за принципом обчислювальності “м’якості”. Поряд із класичними детермінованими алгоритмами, що базуються на локальних правилах (наприклад, збурення-спостереження або інкрементальна провідність), виділяють інтелектуальні методи м’яких обчислень. До них належать, зокрема, підходи на основі штучних нейронних мереж та мета-евристичних алгоритмів, які здатні забезпечувати вищу стійкість за складних Штучна нейронна мережа в МРРТ режимів роботи.

Штучна нейронна мережа в МРРТ виконує роль апроксиматора нелінійної залежності між вимірними параметрами (струм, напруга, інколи температура й освітленість) та оптимальною робочою точкою. Перевагою є швидка реакція після навчання та здатність узагальнювати поведінку системи в широкому діапазоні умов. Водночас ключовими обмеженнями залишаються потреба в якісних навчальних даних, ризик погіршення точності за нетипових сценаріїв і необхідність обґрунтованого вибору архітектури мережі[19].

Мета-евристичні методи (наприклад, оптимізація рою частинок, генетичні алгоритми тощо) трактують пошук точки максимальної потужності як задачу глобальної оптимізації. Їхня головна перевага полягає у здатності знаходити глобальний максимум навіть за часткового затінення, коли на характеристиці з’являються кілька локальних максимумів. Недоліками зазвичай є більші обчислювальні витрати та потреба налаштування параметрів пошуку, що впливає на швидкодію та стабільність.

Отже, м’які обчислення розширюють інструментарій МРРТ, пропонуючи адаптивні та стійкі підходи. Нейронні мережі доцільні там, де важлива швидкість прийняття рішення після попереднього навчання, тоді як мета-евристики виправдані у складних умовах із багато модальністю, коли потрібен пошук глобального найкращого режиму роботи.

1.3 Гібридної системи зберігання енергії

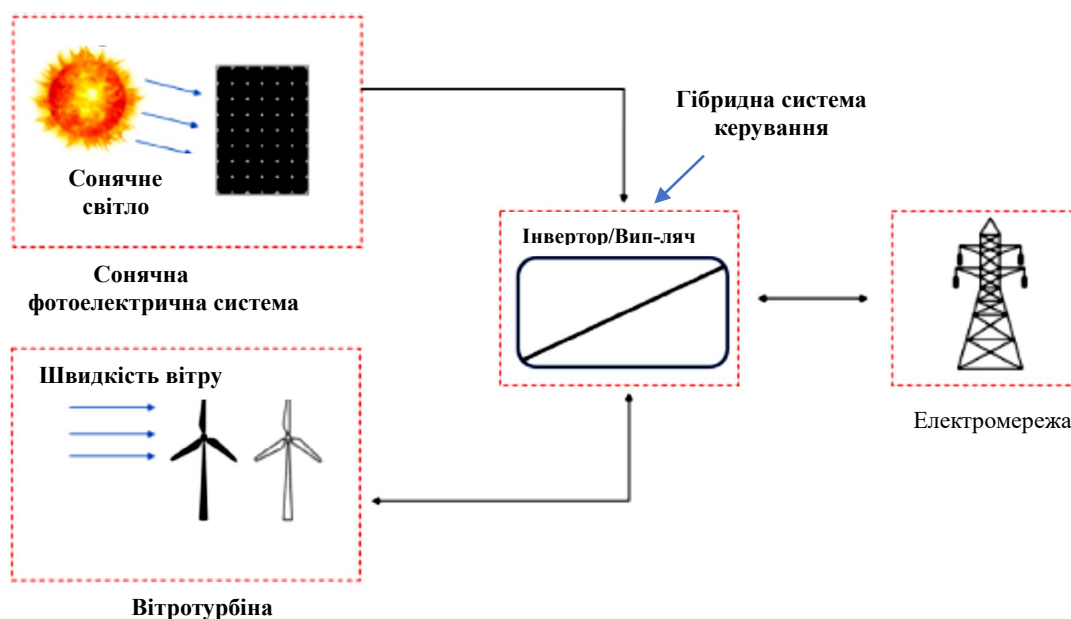


Рисунок 1.2 Блок-схема HSWES (гібридної системи зберігання енергії вітру)

HSWES — це високонадійні системи накопичення енергії (High-Stability/High-Security/Wide-Scale Energy Storage, залежно від інтерпретації), призначені для акумулювання надлишкової електроенергії та її подальшого контрольованого відпуску в мережу. Такі рішення можуть реалізовуватися на основі різних технологій накопичення — від акумуляторних комплексів до гідроакумулювальних або інших інженерних систем — і виконують ключову функцію балансування.

Сонячне світло є базовим природним ресурсом для виробництва електроенергії, оскільки воно забезпечує стабільний щоденний потік енергії в більшості регіонів. На практиці його перетворення здійснює сонячна фотоелектрична система (Solar PV System), у якій фото модулі генерують постійний струм. Для ефективного використання такої генерації необхідний гібридний контрольний комплекс (Hybrid Control System), що узгоджує роботу різних джерел та навантажень, оптимізує режими накопичення й споживання, а також підвищує надійність електропостачання.

Ключову роль у перетворенні енергії відіграє інвертор/випрямляч (Inverter / Rectifier): він забезпечує перехід між постійним і змінним струмом, формує параметри напруги та частоти й підтримує якість електроенергії. У разі підключення до мережі енергосистема взаємодіє з комунальною електромережею (Utility Grid), яка може бути як джерелом резервного живлення, так і каналом для передачі надлишків генерації[20,21].

Поряд із сонячною генерацією вагомим відновлюваним ресурсом є вітер. Вітровий режим визначається швидкістю вітру (Wind speed), що безпосередньо впливає на потужність і доцільність встановлення обладнання. Вітрова турбіна (Wind Turbine) перетворює кінетичну енергію повітряного потоку на електричну, доповнюючи сонячну генерацію в періоди зниженої інсоляції. Поєднання сонячних і вітрових технологій у межах керованої гібридної архітектури формує стійку, гнучку та економічно обґрунтовану модель енергопостачання.

Висновок по першому розділу

Сучасні технології виробництва електроенергії переходять до інтеграції відновлюваних джерел (сонце, вітер тощо) через зростаючий попит, вичерпність викопного палива та екологічні наслідки їх використання.

Гібридні системи (наприклад, DFIG з перетворювачем $\beta t \beta$ і прямою DC-інтеграцією PV) дозволяють знизити складність та вартість, забезпечити двосторонній потік потужності й незалежне керування генератором і мережею. Через змінність сонячної та вітрової генерації необхідні ефективні MPPT-алгоритми для максимізації енерговидобутку; традиційні методи (P&O, Hill Climbing, Fractional VOC/ISC) прості, але мають обмеження за швидких змін умов.

MPPT, особливо за часткового затінення або багато модальних характеристик, проте потребують навчання/налаштування й більше обчислювальних ресурсів.

HSWES (гібридні системи накопичення) критично важливі для балансування переривчастої генерації, підвищення надійності та інтеграції в мережу.

Поєднання різних чистих джерел, просунутих MPPT та надійних систем зберігання створює ефективну, стійку й економічно обґрунтовану енергетичну систему майбутнього.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ

2.1 Блок-схема електрично зв'язаної HSWES та її робота

На рис. 2.1, показано HSWES з використанням DFIG, фотоелектричної системи, DC-DC перетворювача та вітрових турбін. Метою є генерація 2 МВт потужності при номінальній швидкості вітру. Система складається з турбіни, яка виробляє електроенергію шляхом DC-з'єднання конденсатора, DFIG, перетворювача з боку мережі (GSC), перетворювача з боку ротора (RSC) та фотоелектричної системи. Обмотка ротора DFIG з'єднана з RSC. VSC підключено до PCC, тоді як обмотка статора GSC безпосередньо підключена до мережі. RSC та GSC працюють разом для досягнення різних робочих умов DFIG. На рис. 2.2 зображено блок-схему описаної системи. WECS, яка інтегрує ізолювану сонячну енергію з DFIG, підключеною до мережі. Система перетворює енергію вітру в електричну енергію шляхом поєднання сонячної фотоелектричної системи та підключення її до DC-з'єднання конденсатора через DFIG[22].

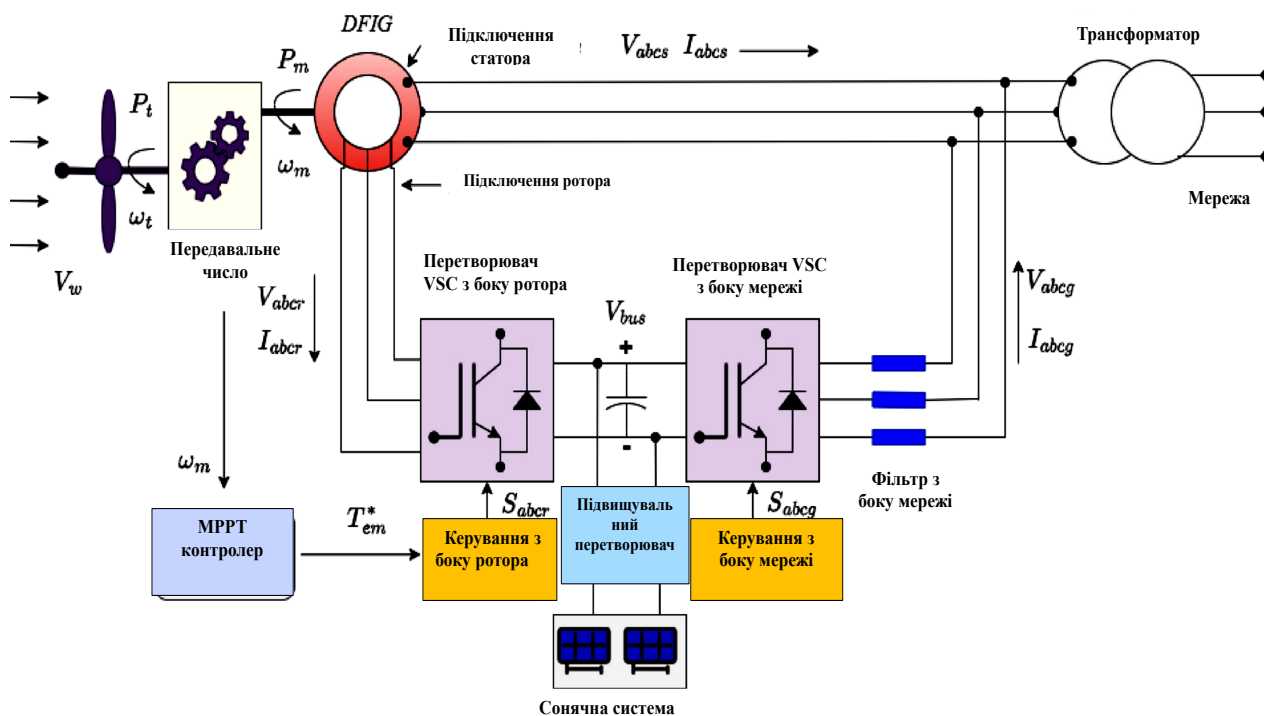


Рисунок 2.1. Конфігурація HSWES

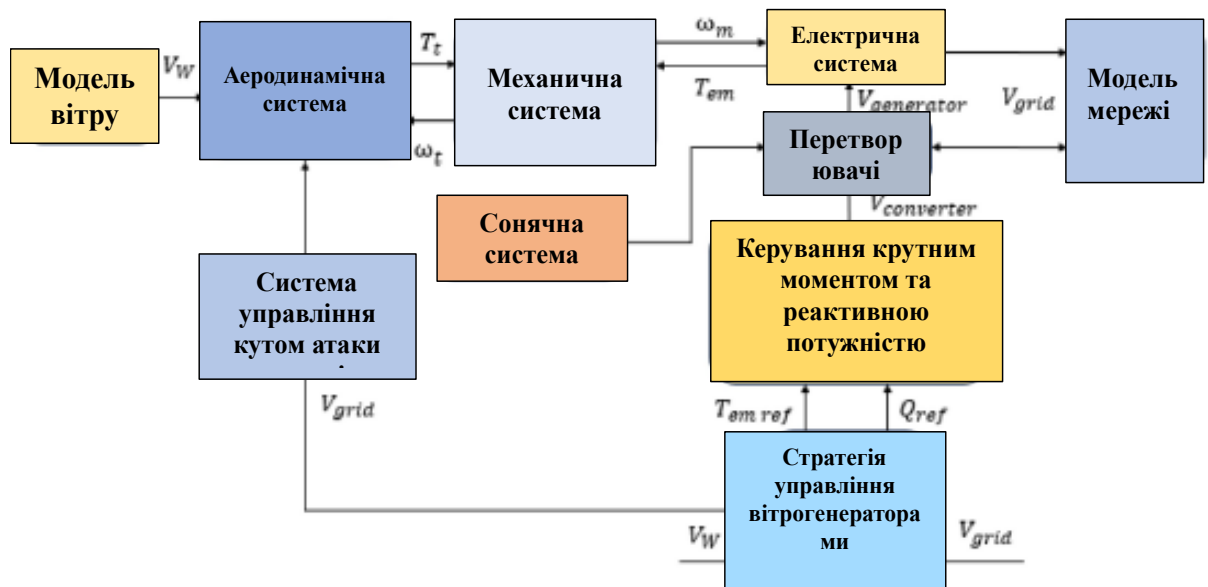


Рисунок 2.2 Блок-схема електрично зв'язаної HSWES

Нижче подано опис роботи системи, зображеної на схемі (вітра-сонячна енергетична установка з підключенням до мережі).

Загальний принцип роботи системи.

Система поєднує вітрову та сонячну енергетичні підсистеми, які через перетворювальну та керовану частини передають електроенергію до електричної мережі з підтримкою необхідних параметрів потужності та напруги.

Опис роботи блоків:

1. Модель вітру.

Формує вхідний сигнал швидкості вітру V_w , який є збуренням для всієї системи та визначає доступну механічну енергію.

2. Аеродинамічна система.

На основі швидкості вітру V_w та кута атаки лопатей:

- обчислює аеродинамічний крутний момент T_t ,
- формує кутову швидкість ротора ω_t .

Робота цього блоку безпосередньо впливає на ефективність перетворення енергії вітру.

3. Система управління кутом атаки.

Регулює кут повороту лопатей вітротурбіни з метою:

- обмеження потужності при великих швидкостях вітру,
- оптимізації відбору енергії,
- забезпечення безпечної роботи установки.

Використовує інформацію про напругу мережі V_{grid} .

4. Механічна система

Передає механічну енергію від турбіни до генератора:

- перетворює аеродинамічний момент T_t у електромагнітний момент T_{em} ,

- формує швидкість обертання генератора ω_{am} .

5. Електрична система.

На основі механічної енергії:

- генерує електричну енергію,
- формує напругу генератора $V_{generator}$.

6. Сонячна система.

Додаткове джерело енергії, яке:

- генерує постійну або змінну напругу,
- подає її на перетворювач, підвищуючи загальну енергетичну

ефективність системи.

7. Перетворювач

Виконує:

- узгодження параметрів напруги та частоти,
- перетворення енергії від генератора та сонячної системи,
- формування напруги $V_{converter}$ для подачі в мережу.

8. Керування крутним моментом та реактивною потужністю

Забезпечує:

- регулювання електромагнітного моменту T_{em} ,
- контроль реактивної потужності Q ,
- стабільну роботу при змінних умовах мережі.

Працює за заданими значеннями $T_{em,ref}$ та Q_{ref} .

9. Стратегія управління вітрогенераторами

Формує опорні сигнали керування на основі:

- швидкості вітру V_w ,
- напруги мережі V_{grid} .

Реалізує оптимальні алгоритми (наприклад, MPPT, обмеження потужності).

10. Модель мережі.

Моделює електричну мережу:

- приймає енергію від установки,
- задає параметри напруги V_{grid} ,
- впливає на режими керування всієї системи.

Система працює як інтелектуальна гібридна установка, яка:

- адаптується до змін швидкості вітру та умов мережі,
- поєднує вітрову та сонячну генерацію,
- забезпечує стабільну подачу активної та реактивної потужності в

електричну мережу[23,24].

2.2 Моделювання сонячної фотоелектричної системи

Ця модель включає два резистивні елементи: один паралельний і один послідовний, щоб імітувати сонячну енергетичну систему з одним діодом та врахувати втрати в живленні. Взаємозв'язок між паралельним опором, який іноді називають опір шунта, та витоком струму в комірці зумовлений впливом на поверхню та товщиною комірки. На рис. 2.3(a) зображено сонячну фотоелектричну комірку, а на рис. 2.3(b) – принципова схема перетворювача [25].

Коли на фотоелектричну комірку безперервно потрапляє світло, щільність струму, що генерується в певному об'ємі комірки, позначається символом j_{PV} . Якщо площа комірки становить A_{cell} , струм фотоелектричної комірки визначається рівнянням (1), а вихідний струм задається рівнянням (2).

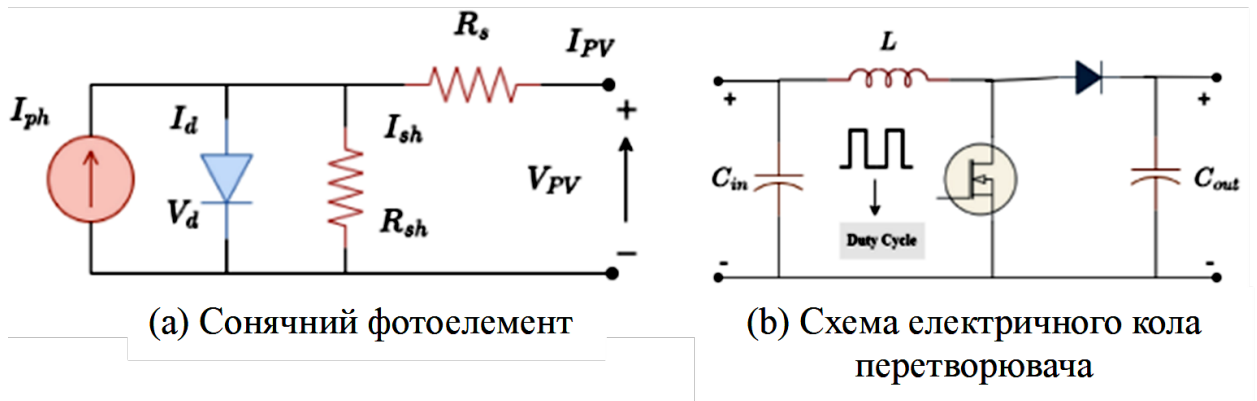


Рисунок 2.3 Схема сонячного фотоелемента та підвищувального перетворювача

$$I_{PV} = j_{PV} \cdot A_{cell} \quad (1)$$

$$I = I_{PV} - I_d - I_{sh} \quad (2)$$

де I_d позначає струм діода, що протікає через паралельний діод, а I_{sh} позначає шунтуючий струм, що протікає через паралельний резистор[18]. Рівняння (3) показує струм, який протікає через діод згідно з розрахунком діода Шоклі.

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{q \cdot V_j}{n k T} \right) - 1 \right) \quad (3)$$

Символи для зворотного струму насичення (A) – I_0 , коефіцієнт ідеальності діода (n), температура діода (T), фундаментальний заряд (q), стала Больцмана (k) та елементарний заряд (q). kT/q приблизно дорівнює 0.0259 вольт при 25° C, де "1" позначає ідеальний діод. Рівняння (4) надає напругу на діоді.

$$V_d = V + I R_s \quad (4)$$

Тут напруга на резисторі шунта та діоді дорівнює V_d . Вихідна напруга на портах дорівнює V . Опір у послідовному з'єднанні становить R_s , після перетворення кожного рівняння до рівняння, що представляє вихідний струм, струм шунта та вихідний струм проілюстровано у рівняннях (5) та (6), відповідно.

$$I_{sh} = V_{sh} / R_{sh} \quad (5)$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

2.3 Підвищувальний перетворювач (Boost-конвертер)

Підвищуючі DC-DC перетворювачі використовуються для узгодження напруги ланки постійного струму та збільшення DC-DC перетворювачів сонячного фотоелектричного модуля. Блок, розміщений між сонячними фотоелектричними панелями та з'єднанням між постійним струмом і $\beta\beta$ перетворювачами, є підвищуючим перетворювачем, базовим імпульсним підвищуючим перетворювачем. Підвищуючий перетворювач складається з індуктора, діода, конденсатора та перемикального пристрою. Найважливішою деталлю, необхідною для перетворення напруги, є перемикач[26, 27]. Вихідна напруга комутації IGBT визначається її коефіцієнтом заповнення D, що представлено в рівнянні (7).

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (7)$$

Алгоритм MPPT описує коефіцієнт заповнення D, який працює як імпульс, що керує IGBT[28].

Таблиця 2 містить специфікації розробленої моделі для фотоелектричної системи. На рисунку 2.4 зображено блок-схему фотоелектричної системи.

Таблиця 2. Технічні характеристики фотоелектричних систем.

Параметри	Значення параметрів
Вхідна Напруга	600 В
Вихідна Напруга	1200 В
Номінальна Потужність	50 кВт
Частота Перемикання	5 кГц
Пульсація Струму	5%
Пульсація Напруги	1%

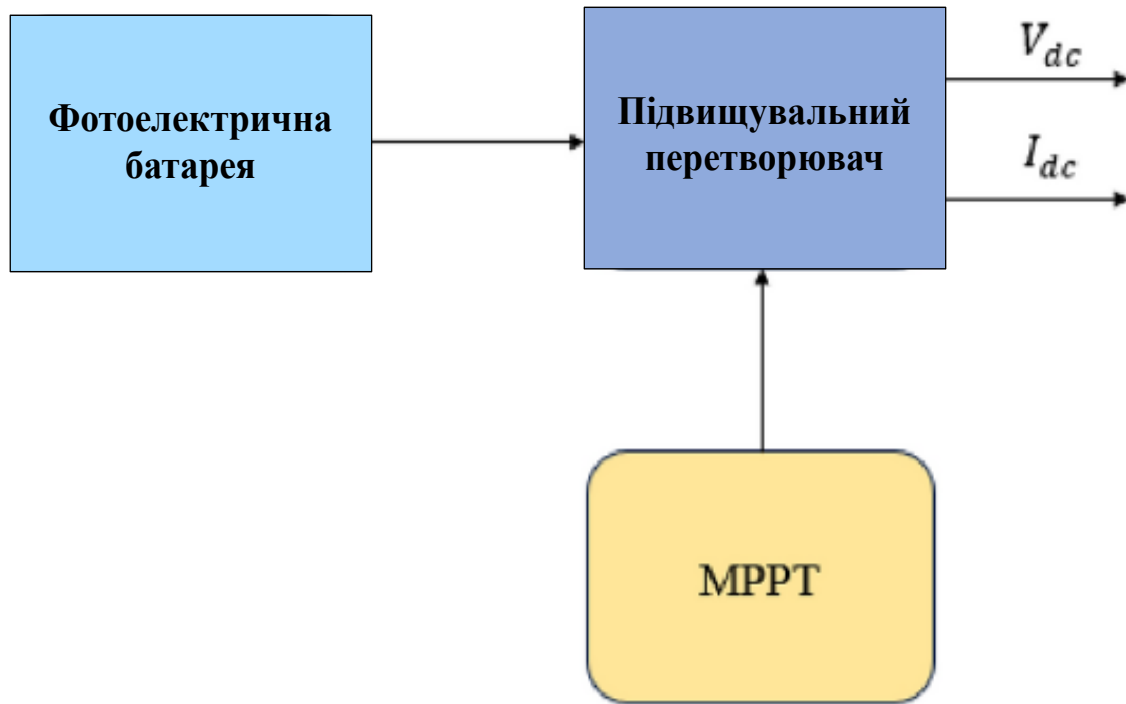


Рисунок 2.4. Блок-схема фотоелектричної системи.

2.4 Моделювання вітрової турбіни

Вітрова турбіна перетворює кінетичну енергію вітру в обертальну енергію або крутний момент. Наступна формула, наведена в рівнянні (8), дає кількість потужності, доступної у вітрів.

$$P_{\omega} = \frac{1}{2} \rho A (V_{\omega})^2 \quad (8)$$

де A : Площа, що охоплюється турбінами, м^2 , ρ : Щільність повітря кг/м^3 , V_{ω} : Швидкість вітру (м/с). Рівняння (9) визначає потужність турбіни.

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 A V_{\omega}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (9)$$

де R : радіус ротора турбіни (в метрах), C_p : коефіцієнт потужності C_p визначається кутом нахилу лопатей (β) та відношенням швидкості кінців лопатей (λ). $C_p(\lambda, \beta)$ може бути записано у вигляді рівнянь (10) та (11)[29,30].

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - \lambda_i C_3 \beta - C_4 \beta^{C_5} - C_6 \right) \frac{e^{1/C_7}}{\lambda_i} \quad (10)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.02\beta} - \frac{0.03}{\beta^3 + 1} \quad (11)$$

Рівняння (12) виражає TSR (Tip Speed Ratio) — відношення швидкості руху кінця лопаті ротора до швидкості вітру, тоді як рівняння (13) виражає крутний момент турбіни.

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_t}{V_\omega} \quad (12)$$

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (13)$$

де ω_t : Кутова швидкість обертання ротора віротурбіни (рад/с).

2.5 Моделювання ДВІГ (Двояко живильного індукційного генератора)

Для демонстрації роботи ДВІГ ми використовуємо як прямі, так і обернені перетворення. Застосовуючи теорію просторових векторів, ми можемо розділити три обмотки ротора та статора на дві обмотки. Рівняння (14), (15) і (16), (17) відповідно виражають вектор напруги між статором і ротором.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \quad (14)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \quad (15)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr} \quad (16)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr} \quad (17)$$

Де V_{ds} , V_{qs} — напруги статора, а V_{dr} , V_{qr} — напруги ротора в системі координат DQ. DQ-еквівалентна схема DFIG показана на рис. 2.6 а,б.

Рівняння (18), (19) та (20), (21) виражають потокозчеплення статора та ротора;

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{PL_m}{L_s} (\psi_{qs} i_{dr} - \psi_{ds} i_{qr}) \quad (22)$$

$$T_{em} - T_{load} = j \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (23)$$

Навантажувальний момент, T_{load} , прикладений до валів, і j , інерція ротора, використовуються для обчислення швидкості ротора, Ω_m .

Висновки по другому розділу

У цьому розділі виконано комплексне моделювання та проєктування електрично зв'язаної гібридної системи HSWES, що поєднує сонячне фотоелектричне джерело та вітроенергетичну установку з ДВІГ. Розроблена блок-схема відобразила структуру системи, взаємодію її основних вузлів і логіку перетворення та передавання енергії, що дозволило цілісно оцінити принцип роботи HSWES в різних режимах.

Побудована модель сонячної фотоелектричної системи дала змогу проаналізувати вплив зміни зовнішніх умов (освітленості та температури) на вихідні параметри та енергетичну ефективність. Для узгодження рівнів напруги та підвищення керованості енергопотoku застосовано підвищувальний перетворювач (boost-конвертер), робота якого підтвердила можливість стабілізації/підвищення напруги та забезпечення необхідних режимів живлення навантаження або спільної шини.

Модель вітрової турбіни дозволила дослідити залежність виробітку від швидкості вітру та особливості механіко-електричного перетворення енергії. Окремо змодельована ДВІГ як ключовий елемент вітроенергетичного каналу, що забезпечує гнучке керування активною та реактивною потужністю і розширює робочий діапазон швидкостей, підвищуючи стабільність роботи всієї системи.

Загалом результати моделювання підтвердили працездатність запропонованої структури HSWES та доцільність використаних силових і електромашинних компонентів.

РОЗДІЛ 3

ОГЛЯД ТА ЗАСТОСУВАННЯ MPPT

Технологія MPPT (Maximum Power Point Tracking) є ключовим елементом сучасних систем відновлюваної енергетики, насамперед у фотоелектричних установках. Її призначення полягає в забезпеченні роботи сонячної панелі в точці максимальної потужності, що дає змогу отримувати найбільший можливий вихід енергії за поточних умов експлуатації[33].

Максимальна потужність сонячного модуля залежить від освітленості, температури та електричного навантаження. Оскільки ці фактори постійно змінюються, фіксований режим роботи не здатен забезпечити оптимальну ефективність. MPPT-контролер безперервно аналізує напругу та струм і, змінюючи параметри перетворювача, підлаштовує робочу точку системи так, щоб вона наближалася до оптимальної.

Застосування MPPT особливо важливе в автономних системах і гібридних електростанціях, де кожен відсоток приросту виробітку є суттєвим. У практичних умовах MPPT може забезпечувати помітне підвищення ефективності порівняно з простішими контролерами, особливо за часткового затінення або низької освітленості.

Отже, MPPT є технологічно обґрунтованим рішенням для підвищення енергетичної віддачі сонячних систем. Її використання сприяє раціональному використанню ресурсів і покращує загальну економічну доцільність відновлюваної енергетики

3.1 Сонячний MPPT

Разом із сонячною радіацією та іншими метеорологічними параметрами, температура впливає на нелінійні I-V характеристики сонячного фотоелемента. Тому алгоритми MPPT оптимізують вихідну потужність для отримання найбільшої кількості електроенергії від сонця. Одним із таких методів, який безперервно контролює вихідну напругу та потужність сонячного фотоелектричного методу, є метод "збурення та спостереження"[34,35].

Щоб сформулювати цільову функцію для сонячного МРРТ, використовуючи даний вираз, нам спочатку потрібно зрозуміти його роль у сонячних фотоелектричних системах. У сонячних фотоелектричних системах техніка МРРТ максимізує вихід електроенергії сонячних панелей. Вони мають чітку характеристичну криву потужність-напруга (P-V) порівняно з МРР, або єдиною піковою точкою. Алгоритми МРРТ постійно контролюють робочу точку сонячних панелей, щоб гарантувати, що вони працюють в МРР або близько до неї та збирають максимальну кількість енергії. Дана цільова функція для МРРТ задається рівнянням (24).

$$Fitness = |P_D - P_{old}| \quad (24)$$

Де P_D представляє бажану вихідну потужність у точці максимальної потужності (ТМП), P_{old} представляє вихідну потужність, виміряну або оцінену раніше. Ця функція вимірює абсолютну різницю між бажаною та попередньою вихідною потужністю. Метою алгоритму ТМП є мінімізація цієї різниці. Менше значення фітнес-функції вказує на те, що система працює ближче до ТМП, таким чином максимізуючи відбір потужності від сонячних панелей. Шляхом мінімізації абсолютної різниці між P_D та P_{old} , алгоритм МРРТ забезпечує ефективне використання сонячної енергії. Цей підхід допомагає адаптуватися до мінливих екологічних умов, таких як зміни інтенсивності сонячного світла та температури, які впливають на ТМП.

3.2 Алгоритм збурень і спостережень (Perturb and Observe Algorithm)

Оптимальну точку заданої функції можна знайти, використовуючи метод арифметичного моделювання, відомий як Р&О. Цей підхід наголошує на використанні керуючої змінної, яка регулюється невеликими кроками, і визначенні результату цільової функції до того, як нахил наблизиться до нуля. Цей метод безперервно перевіряє вихідну потужність сонячної фотоелектричної системи. Якщо робоча точка знаходиться ліворуч від найвищої точки кривої, як показано на рис. 3.1, контролер рухається вправо, щоб досягти найвищої точки.

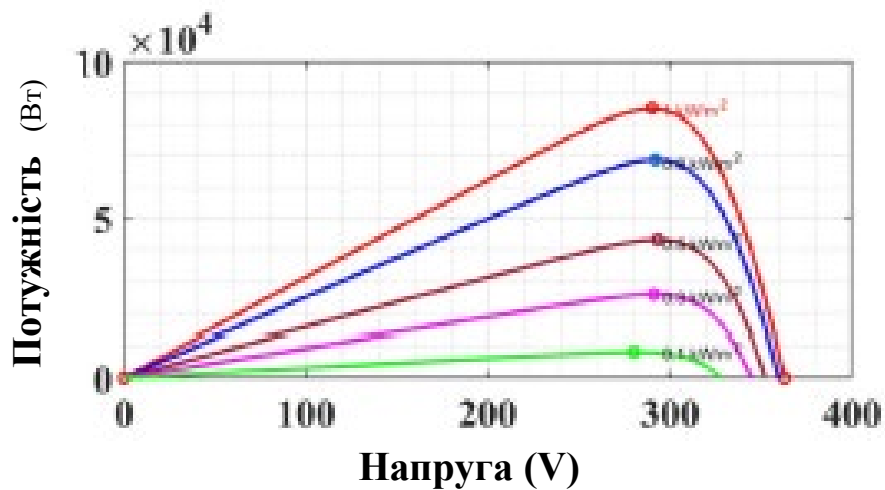


Рисунок 3.1 Вольт-амперна характеристика та крива потужності для сонячного елемента.

Якщо робоча точка знаходиться праворуч від максимального значення, контролер рухається вліво, щоб максимізувати вихідну потужність. Один із способів визначення цього процесу - обчислити нахил керуючої змінної до цільової змінної [36,37]. Цей метод використовує напругу та потужність фотоелектричної батареї як вхідні дані. Коли відбувається збурення в робочій напрузі та підвищення потужності, положення змінюється, наближаючись до точки максимальної потужності. Ця техніка повторюється до тих пір, поки живлення не зникне. Операційна позиція буде відхилена від MPP, якщо живлення буде перервано. Згодом, робоча напруга на іншому шляху має бути перервана. Мобільність точки роботи також можна обчислити за допомогою кривої зміни напруги і потужності. Таким чином, програма гарантує, що система наближається до робочої точки максимальної потужності, як показано на рис. 3.2 Існує компроміс, який потрібно враховувати при встановленні кількості кроків робочого циклу, оскільки більший розмір кроку вказує на швидшу реакцію та більшу кількість коливань під час пікової точки, що означає меншу ефективність. Значно менші розміри кроків підвищують ефективність, але значно сповільнюють збіжність.

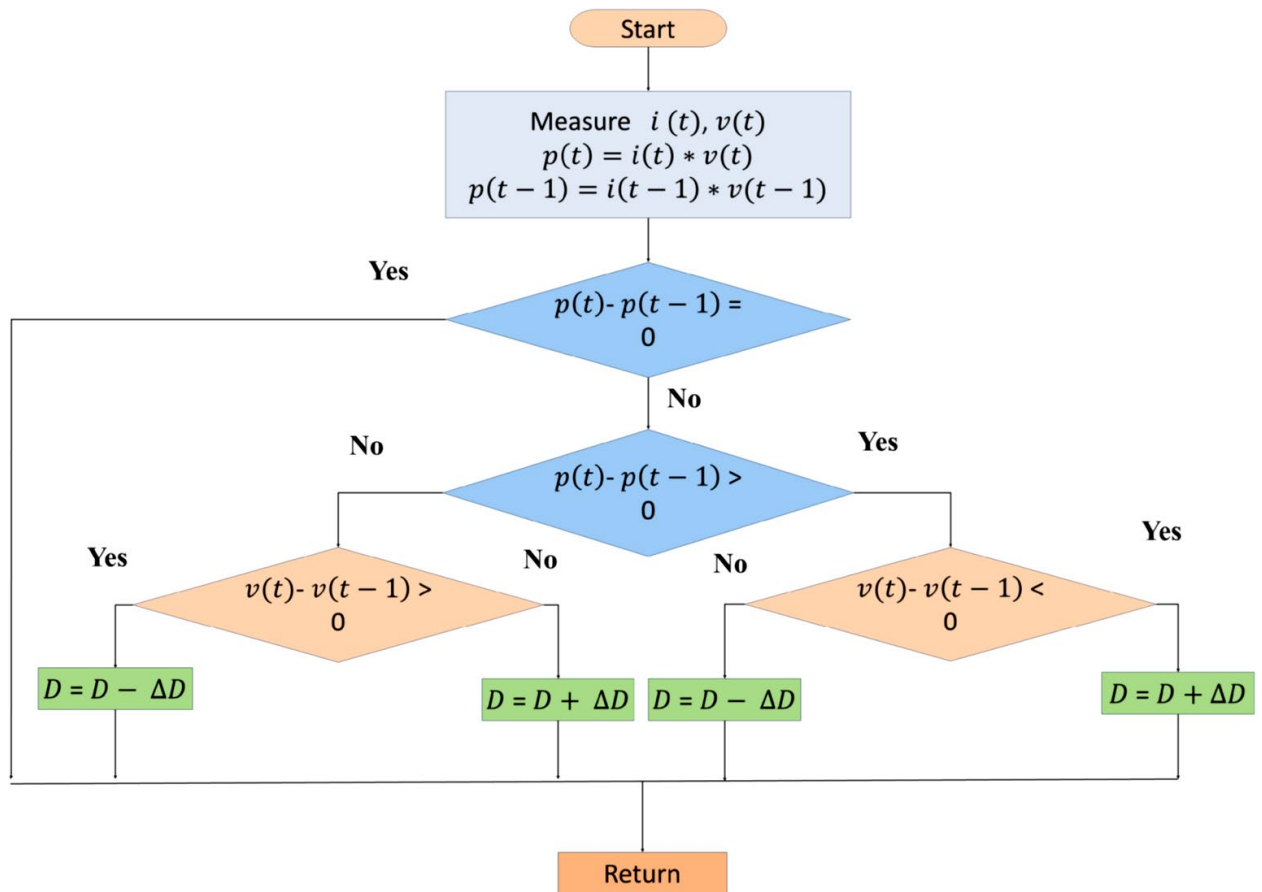


Рисунок 3.2. Блок-схема методу збурень та спостережень.

3.3 МРРТ для вітрової турбіни

Вітрові турбіни поділяються на FSWT та VSWT залежно від швидкості їхньої роботи. FSWT працюють з фіксованою кутовою швидкістю для забезпечення номінальної потужності, зазвичай при 1,0 відсотка від номінальної швидкості вітру. В результаті виробництво електроенергії змінюється в залежності від швидкості вітру. З іншого боку, VSWT функціонують в широкому діапазоні швидкостей вітру, змінюючи швидкість ротора для досягнення оптимальної ефективності. VSWT використовують пристрої перетворення енергії для підтримки вихідної потужності на номінальному рівні, незважаючи на зміни швидкості вітру. Ефективне регулювання швидкості у вітрових турбінах є вирішальним для безпечної роботи та для зменшення механічного навантаження на приводний механізм[38]. Ця система регулювання швидкості працює в трьох різних регіонах, як показано на рис. 3.3.

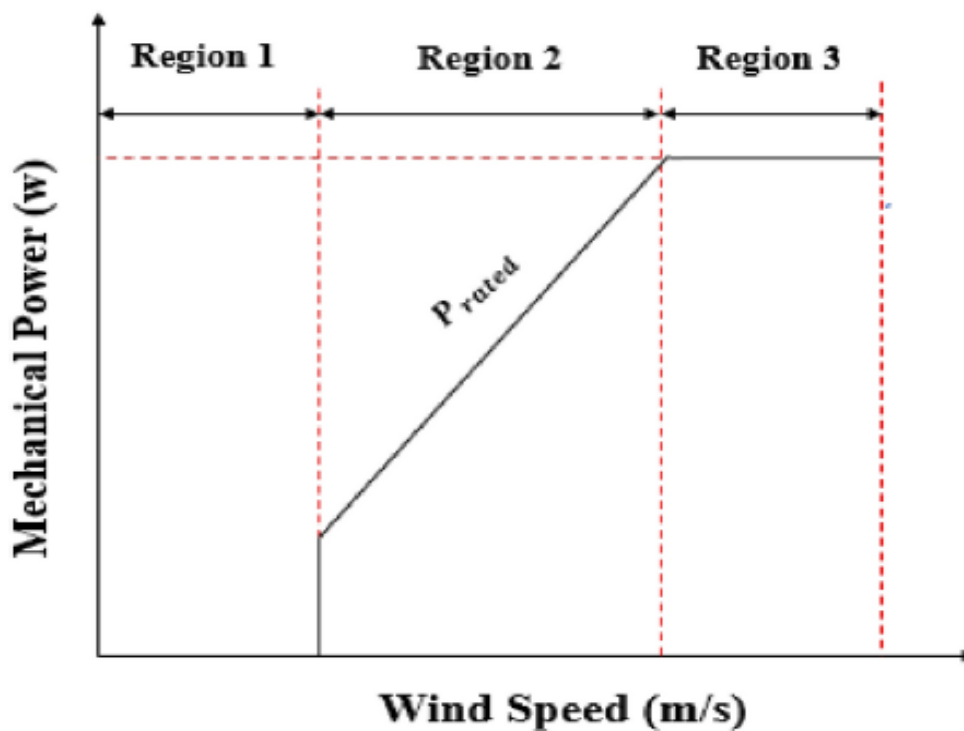


Рисунок 3.3 Різні режими роботи вітротурбіни

- Області мінімальної робочої швидкості та максимального відбору потужності.
- Максимальна робоча швидкість в областях часткової та повної/номінальної вихідної потужності.

Регіони 1 та 3 мають на меті утримувати вітрову турбіну в найнижчій точці в першому випадку та на її максимальному значенні в другому. Так само, турбіна обертається на низькій частоті при відносно низькій швидкості вітру. Резонансні частоти вежі корелюють з цією нижчою частотою. Постійна робота турбіни на знижених швидкостях стимулює резонансну частоту вежі, послаблюючи конструкції та викликаючи збоїв, спричинені вібрацією. Через це турбіна має визначену нижню межу, після якої її не слід використовувати. Швидкість турбіни слід обмежувати найвищими безпечними робочими межами для небезпечно високих швидкостей вітру, щоб турбіна працювала лише в межах своїх абсолютних безпечних робочих параметрів. Підтримання швидкості вітру в межах визначених нижньої та верхньої меж є основним завданням у такій ситуації. Регіон 2. Основна мета в цій сфері роботи - генерувати якомога більше електроенергії. Щоб досягти цього, турбіна

обертається зі швидкістю, яка лінійно збільшується зі швидкістю вітру. Використання кількох контролерів і методів MPPT оптимізує вилучення потужності. Одним із методів є відстеження MPP, або ISC, за допомогою електромагнітного моменту як еталону[39,40]. Щоб використовувати коефіцієнт швидкості кінця лопаті, DSC є альтернативним методом, який встановлює ідеальну швидкість обертання турбіни для кожного діапазону швидкості вітру та використовує її як еталон для швидкості обертання.

Висновки по третьому розділу

MPPT (Maximum Power Point Tracking) є ключовим засобом підвищення енергоефективності відновлюваних джерел, оскільки забезпечує роботу установки поблизу точки максимальної потужності попри зміну зовнішніх умов. Для сонячних систем MPPT особливо важливий через нелінійність I–V/P–V характеристик та постійні коливання освітленості й температури: правильне відстеження MPP дозволяє суттєво збільшити корисний відбір енергії та стабілізувати роботу перетворювача.

Розглянутий алгоритм збурень і спостережень (P&O) є одним із найпоширеніших завдяки простоті реалізації та низьким вимогам до обчислювальних ресурсів. Водночас він має характерний компроміс: коливання навколо MPP у сталому режимі та можливі помилки відстеження за швидких змін умов (наприклад, різка зміна інсоляції), що потребує коректного вибору кроку збурення або застосування адаптивних модифікацій.

Для вітрових турбін MPPT має іншу фізичну основу: максимізація потужності досягається через підтримання оптимального співвідношення швидкості обертання до швидкості вітру (оптимального λ) або еквівалентних керованих параметрів генератора/перетворювача. Отже, хоча мета MPPT однакова (максимальна потужність), підходи та критерії керування відрізняються для фотоелектричних і вітрових систем. Загалом застосування MPPT у обох випадках є необхідною умовою для підвищення ККД, зменшення втрат та покращення стабільності роботи енергетичної установки.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

На рис. 4.1 а показано залежність швидкості ротора від потужності турбіни для різних швидкостей вітру. Також на рис. 4.1 б показано залежність коефіцієнта потужності від швидкості кінчика лопаті для різних значень кута

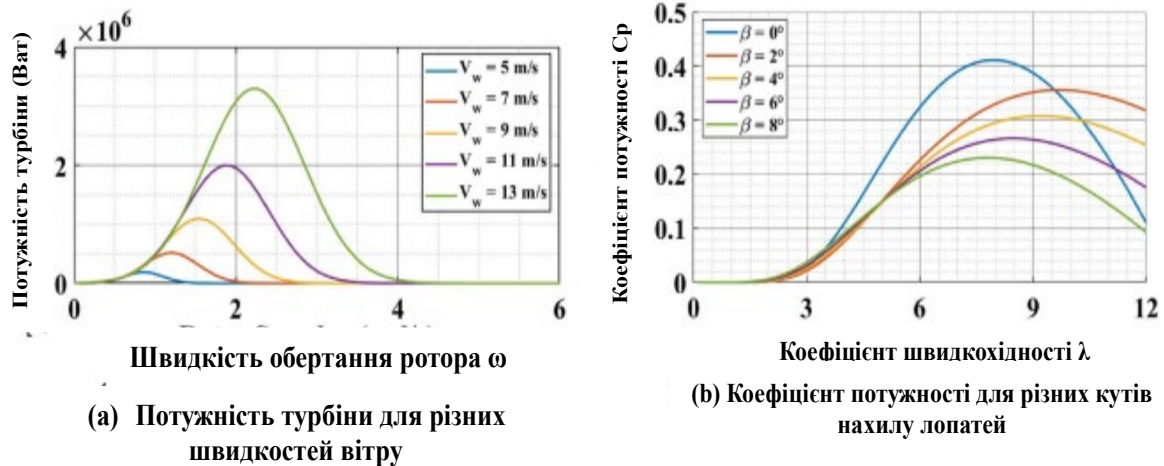


Рисунок 4.1 Параметри турбіни для різних швидкостей вітру та кутів нахилу лопатей.

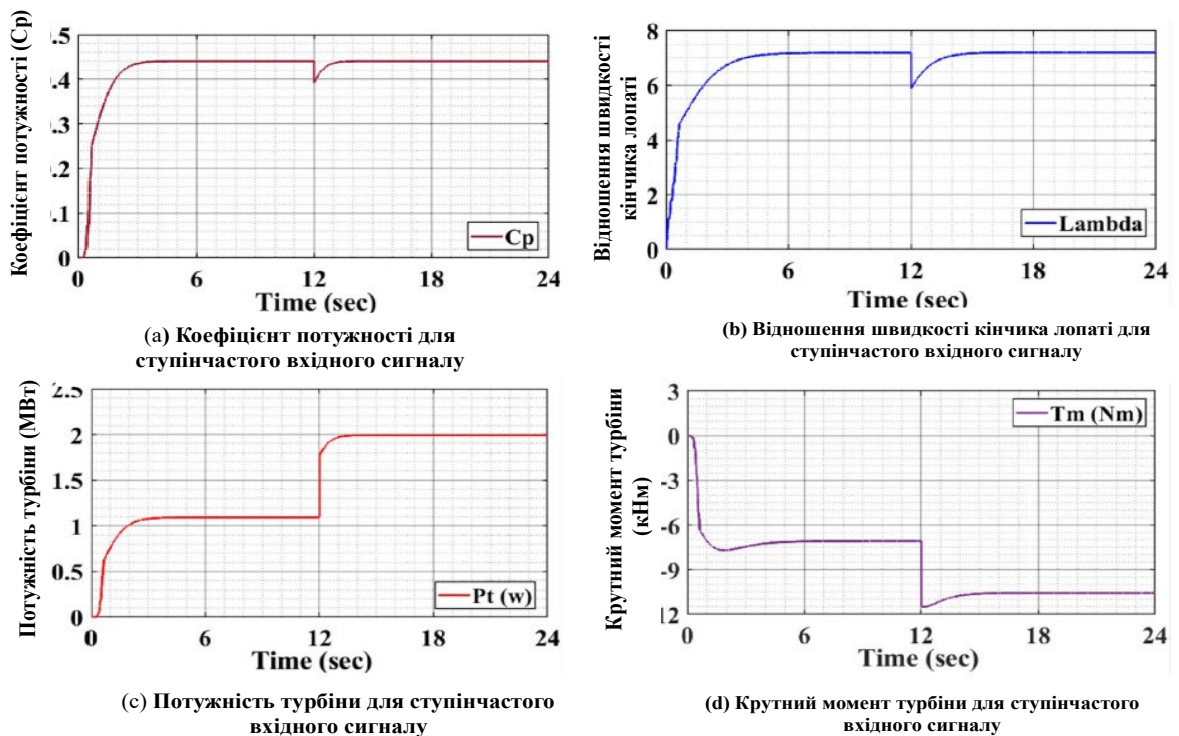


Рисунок 4.2 Параметри турбіни для вхідного підвищення.

Інтеграція джерел вітрової та сонячної енергії через ланку постійного струму перетворювача $\beta\beta$ продемонструвала ефективну стратегію. Гібридне

MPPT для вітру та незалежне MPPT для сонця співпрацювали для максимізації видобутку енергії з обох джерел. Незважаючи на зміни швидкості вітру та сонячного випромінювання, напруга ланки постійного струму залишалася постійною, гарантуючи надійне підключення до мережі та передачу енергії[22].

Далі, на рис. 4.2 показано гібридні результати системи при збільшенні вхідної швидкості вітру. На цьому рисунку, рис. 4.2 а–d представляють параметри ВЕУ (вітряної електроустановки), а саме: коефіцієнт потужності, швидкість кінчика лопаті, потужність турбіни та крутний момент турбіни, відповідно. Для номінальної швидкості вітру генерується 2 МВт, що зображено на рис. 30с.

Параметри RSC (перетворювача з боку ротора) для збільшеного вхідного сигналу вказані на рис. 4.3. На цьому рисунку, рис. 13а–с представляють еталонний крутний момент, середній крутний момент і швидкість ротора, відповідно. Коли швидкість змінюється з 9 м/с до 11 м/с, що є номінальною швидкістю вітру, швидкість ротора становить 1500 об/хв.

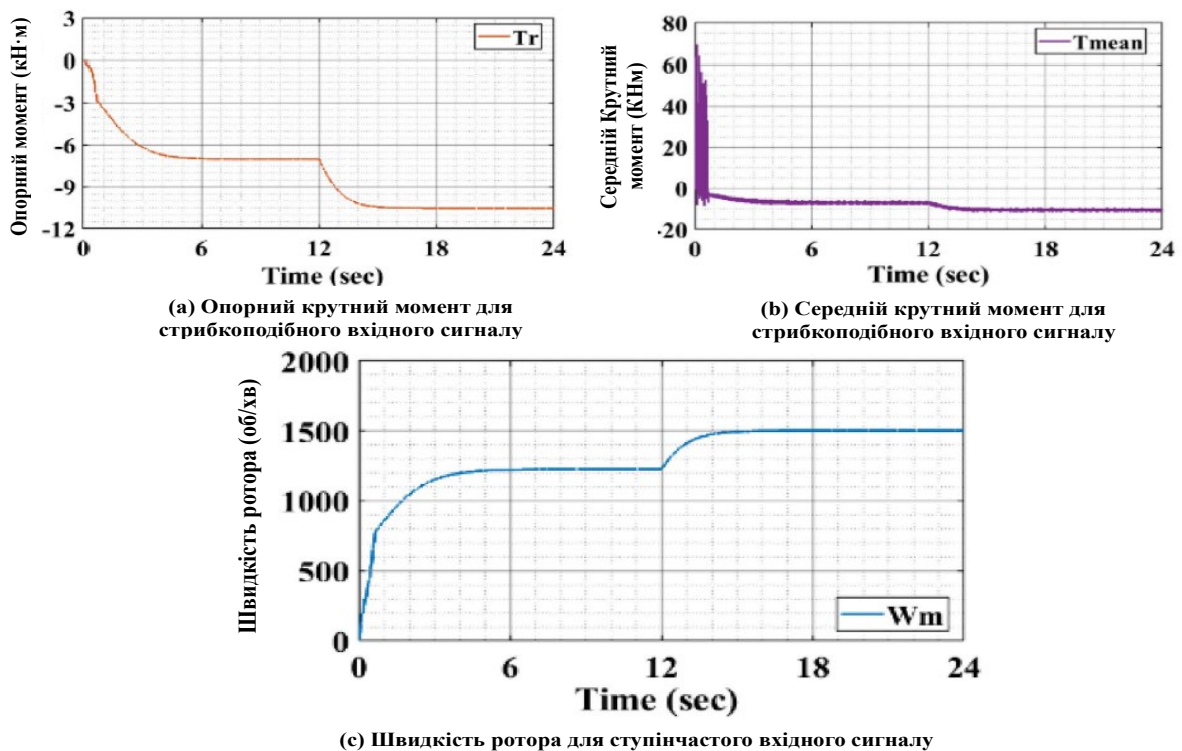
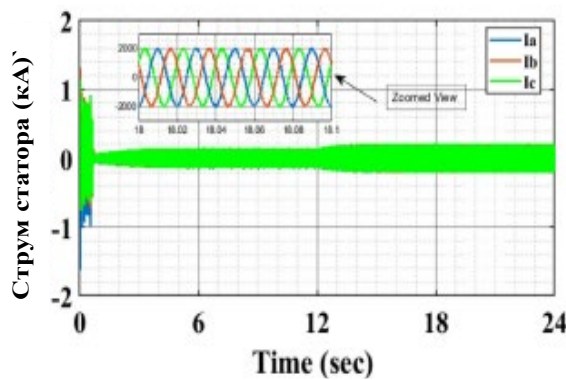


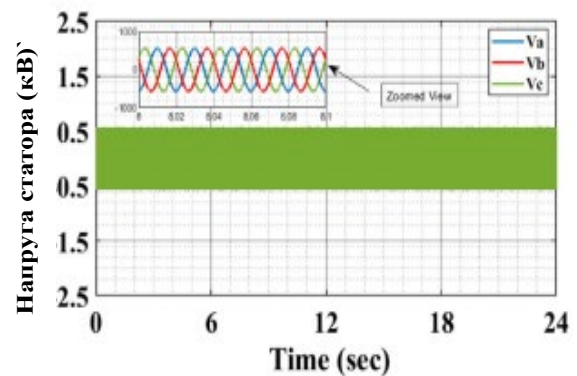
Рисунок 4.3 Параметри з боку ротора для ступінчастої вхідної дії.

Параметри GSC (перетворювача з боку мережі) для збільшеного вхідного сигналу показано на рис. 4.4. На цьому рисунку, рис. 4.4a–d представляють струм статора, напругу статора, напругу ланки постійного струму та напругу мережі, відповідно. У цьому випадку вітер збільшується з 9 до 11 м/с, а напруга ланки постійного струму залишається постійною, що означає, що системи управління працюють належним чином.

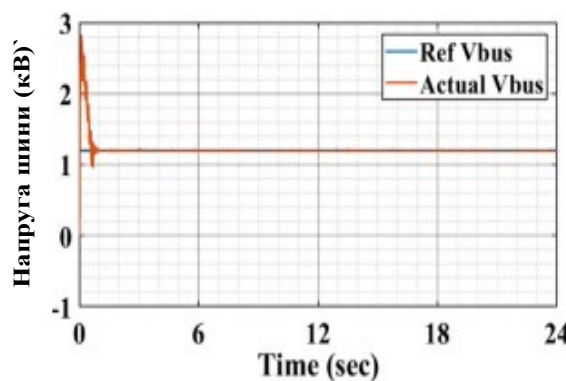
Далі, на рис. 4.5 показано гібридні результати системи для ступінчастого зниження швидкості вітру. На цьому рисунку, рис. 4.5 a–d представляють коефіцієнт потужності параметрів ВЕУ, швидкість кінчика лопаті, потужність турбіни та крутний момент турбіни, відповідно. На початку швидкість вітру становить 11 м/с, а вироблена потужність - 2 МВт. Отже, ВЕУ працює належним чином.



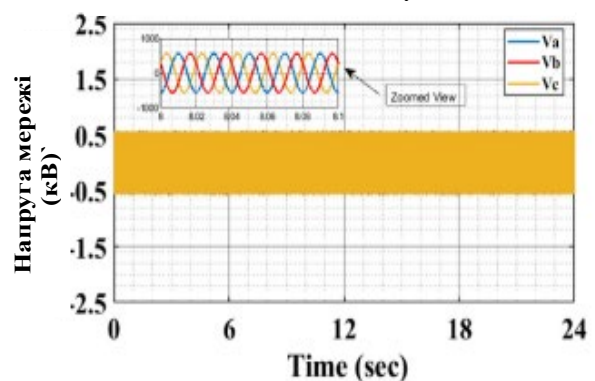
“(a) Струм статора для ступінчастого вхідного сигналу”



“(b) Напруга статора для ступінчастого вхідного сигналу”



“(c) Напруга шини для ступінчастого вхідного сигналу”



“(d) Напруга мережі для ступінчастого вхідного сигналу”

Рисунок 4.4 Параметри боку сітки для вхідного підвищення напруги.

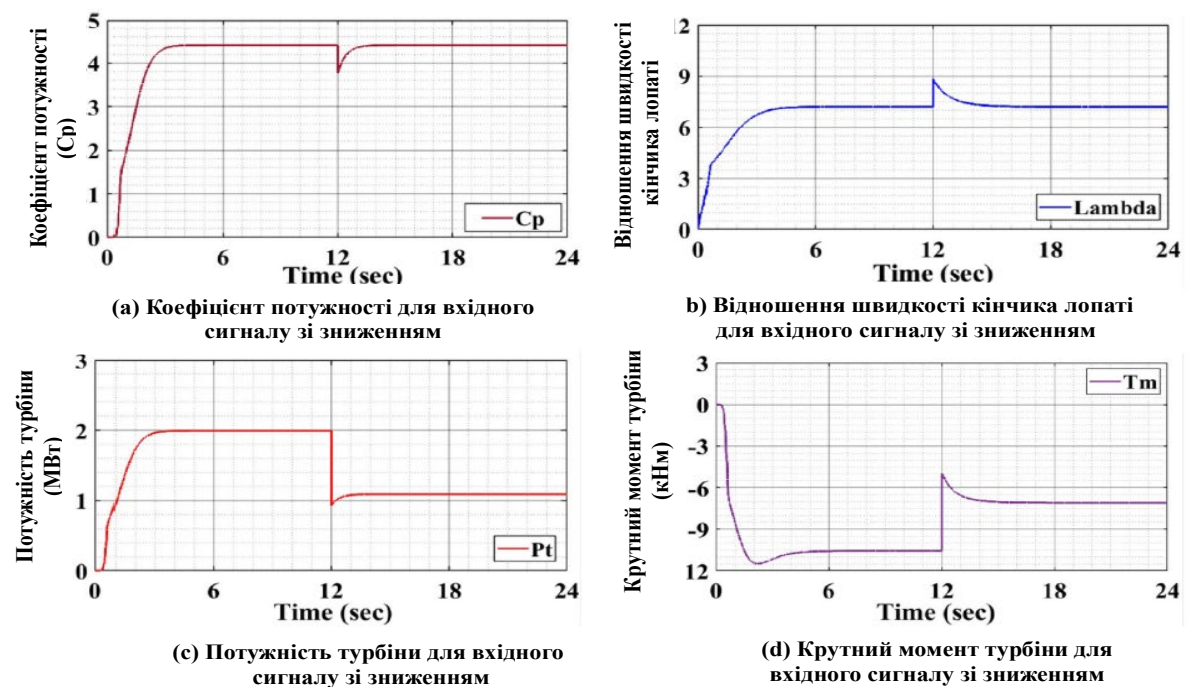


Рисунок 4.5 Параметри турбіни для пониженого входу.

Аналіз роботи гібридної енергетичної системи за допомогою різних математичних платформ показав дієвість поєднання сонячної та вітрової енергії з використанням МРРТ. Найбільш перспективним рішенням є створення гібридних енергетичних систем (ГЕС), що поєднують фотоелектричні панелі та вітрогенераторів. Такий підхід дозволяє нівелювати властиву ВДЕ нестабільність та підвищити надійність енергопостачання завдяки взаємодоповнюваності сонячної та вітрової активності.

Ключовим аспектом ефективності таких систем є максимізація відбору потужності від кожного джерела. Оскільки робочі характеристики сонячних панелей та віротурбіни є нелінійними і суттєво залежать від інтенсивності випромінювання та швидкості вітру, використання технології відстеження точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking — МРРТ) є обов'язковим. Для сонячних підсистем найчастіше застосовуються алгоритми Р&О (збурення та спостереження) або інкрементальної провідності, які адаптують опір навантаження для підтримки оптимальної напруги. У вітроенергетичних установках МРРТ реалізується шляхом регулювання швидкості обертання ротора або зміни кроку лопатей для досягнення оптимального коефіцієнта швидкохідності.

Аналіз роботи гібридної системи засвідчує, що використання індивідуальних MPPT-контролерів для кожного джерела дозволяє значно підвищити загальний ККД системи порівняно з прямим підключенням до акумуляторних батареї або мережі. Синергетичний ефект поєднання двох типів генерації зменшує потребу в надлишкових накопичувачів енергії, оскільки піки вітрової активності часто припадають на нічний час або періоди низької сонячної інсоляції.

Висновок по четвертому розділу.

Результати проведеного дослідження підтверджують високу ефективність та стабільність інтегрованої системи сонячної та вітрової генерації. Основні результати аналізу дозволяють зробити такі висновки:

Ефективність гібридизації: Поєднання вітрових та сонячних джерел через спільну ланку постійного струму є дієвою стратегією. Це дозволяє компенсувати нестабільність кожного джерела окремо, забезпечуючи більш надійне та безперервне енергопостачання.

Роль MPPT-керування: Використання незалежних алгоритмів відстеження точки максимальної потужності (MPPT) для обох підсистем (сонячної та вітрової) є критичним фактором. Гібридне керування дозволило системі адаптуватися до нелінійних змін швидкості вітру та інтенсивності сонячного випромінювання, максимізуючи вихідну потужність.

Динамічна стійкість: Моделювання показало, що система адекватно реагує як на збільшення, так і на зменшення швидкості вітру (ступінчасті зміни від 9 до 11 м/с і навпаки):

При номінальній швидкості вітру 11 м/с вітряна установка стабільно генерує проектну потужність 2 МВт.

Швидкість ротора підтримується на рівні 1500 об/хв при номінальних параметрах, що свідчить про коректну роботу перетворювача з боку ротора (RSC).

Стабільність мережевої інтеграції: Незважаючи на різкі зміни вхідних погодних умов, напруга в ланці постійного струму та параметри

перетворювача з боку мережі (GSC) залишалися постійними. Це підтверджує високу якість регулювання та гарантує можливість безперебійної передачі енергії в загальну електричну мережу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі представлено детальний аналіз систем збору енергії вітру (HSWES). Поєднання сонячної та вітрової енергії з їхньою максимальною потужністю (MPPT) для максимального збору енергії було основною метою підвищення ефективності та надійності джерел чистої енергії та просування рішень у сфері сталого розвитку енергетики. Система збору енергії вітру (WECS) на основі DFIG була практичним вибором для збору енергії вітру, оскільки вона може добре функціонувати в умовах різної швидкості вітру. Розташування перетворювача полегшило розділення роботи мережі та генератора, надаючи користувачам більше контролю над потоком потужності та покращуючи стабільність системи загалом. Інтеграція незалежної сонячної фотоелектричної системи з MPPT та гібридним MPPT була важливим аспектом цієї роботи. Поєднання стратегії керування з алгоритмом оптимізації робить цю роботу новою та ефективною. Ця комбінація використовується з акцентом на оптимізацію для оцінки роботи гібридної системи, застосовуючи методи оптимізації до стратегій керування. Сонячна система була оптимізована як за допомогою звичайного методу P&O, так і за допомогою мета евристичного методу PSO. Основною метою цієї роботи було перевірити ефективність процесу оптимізації для покращення стратегії керування. Основні переваги, досягнуті шляхом поєднання алгоритмів оптимізації та контролера, включають економічну ефективність, оскільки зменшується один інвертор, використання даних сонячної радіації в режимі реального часу, стабільність напруги постійного струму для ширшого діапазону коливань сонячної радіації та кращу продуктивність звичайних алгоритмів для однієї цільової функції в гібридній конфігурації.

Використання MPPT забезпечило роботу сонячної системи на її MPP за різних умов навколишнього середовища, максимізуючи енергію, зібрану з сонячної батареї. Гібридний підхід MPPT поєднував традиційні методи, покращуючи точність відстеження та час відгуку. Було проведено аналіз підключеної до мережі конструкції комбінованої вітрової - сонячної системи.

Результати показали, що запропонована система може успішно синхронізуватися з мережею, гарантуючи плавний розподіл потужності та підтримуючи стабільність частоти та напруги. Крім того, було виявлено, що гібридний підхід до MPPT має переваги в максимізації вироблення енергії сонячної фотоелектричної системи, підвищенні ефективності вітрової енергії та покращенні загальної продуктивності системи. Результати моделювання підтвердили теоретичні моделі та стратегії керування, запропоновані в цій дисертації. Результати підтвердили, що інтеграція джерел вітрової та сонячної енергії з використанням передових методів керування може призвести до більш надійної та ефективної системи відновлюваної енергетики. Цей гібридний підхід пропонує перспективне рішення для вирішення проблем переривчастості, пов'язаних з окремими джерелами відновлюваної енергії, та сприяє більш сталій та стійкій енергетичній інфраструктурі. На завершення, дослідження успішно продемонструвало доцільність та переваги інтеграції БЕКС на основі DFIG з незалежною сонячною фотоелектричною системою з використанням MPPT та гібридних MPPT методів для мережевих застосувань.

Перспективи: Створення таких гібридних систем із застосуванням сучасних математичних платформ для оптимізації керування є найбільш перспективним шляхом розвитку відновлюваної енергетики, оскільки забезпечує баланс між максимальною продуктивністю та технічною стабільністю обладнання.

Таким чином гібридна система продемонструвала повну працездатність та здатність підтримувати стабільні вихідні параметри при динамічних змінах зовнішнього середовища, що робить її надійним рішенням для сучасної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. О.В. Ключев Конспект лекцій з дисципліни Моделювання енергетичних систем <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/30/6-30-kl6.pdf>
2. Прасад Р. М. Мулла М. А. Математичне моделювання та алгоритм без датчика положення для статорна-орієнтованого керування вектором поля роторно-зв'язаної ДІМ з подвійним живленням в системі координат потокозчеплення ротора. <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2956255> (2020).
3. Лисак, В., & Олійник, М. (2021). Моделювання динамічних режимів роботи асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (42), 113–121. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.42.2021.240665>
4. Інноваційні джерела енергії: навч. посіб. / О.О. Азовський, Д.В. Ципленков, О.В. Боров, Н.С. Дрешпак, С.І. Федоров; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ "ДП", 2024. – 336 с.
5. Mohamed, S. A., Tolba, M. A., Eisa, A. A. & El-Rifaie, A. M. Comprehensive modeling and control of grid-connected hybrid energy sources using mppt controller. *Energies*14, <https://doi.org/10.3390/en14165142> (2021).
6. Sai, B. S. V. et al. An efficient mppt technique for inter-harmonic reduction in grid-connected hybrid wind and solar energy systems. *Heliyon*10, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27312> (2024).
7. Bhatnagar, P. & Nema, R. K. Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*23, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.011> (2013).
8. Khodair, D. et al. Modeling and simulation of modified mppt techniques under varying operating climatic conditions. *Energies*16, <https://doi.org/10.3390/en16010549> (2023).

9. Masters, G. M. Wind Power Systems (John Wiley & Sons, New Jersey, 2013).
10. Sai, B. S. V., Chatterjee, D., Mekhilef, S. & Wahyudie, A. An ssm-pso based mppt scheme for wind driven dfig system. IEEE Access 10, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193998> (2022).
11. Baba, A. O., Liu, G. & Chen, X. Classification and evaluation review of maximum power point tracking methods. Sustain. Futur. 2, <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100020> (2020).
12. Kamran, M. et al. Implementation of improved perturb observe mppt technique with confined search space for standalone photovoltaic system. J. King Saud Univ. Eng. Sci. 32, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.04.006> (2020).
13. Yang, X. S. Particle Swarm Optimization (John Wiley & Sons, New Jersey, 2010).
14. Youssef, A. R., Hefny, M. M. & Ali, A. I. M. Investigation of single and multiple mppt structures of solar pv-system under partial shading conditions considering direct duty-cycle controller. Sci. Rep. 13, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46165-1> (2023).
15. Kumar, G. B. A. & Shivashankar, S. Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind-solar energy system. Int. J. Energy Environ. Eng. 13, <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00399-9> (2022).
16. Відстеження точки максимальної потужності
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BA%D0%B8_%D0%BC%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%97_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%83%D0%B6%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96
17. Евристичні методи пошуку розв'язку. Hill climbing methods
<https://rpubs.com/ignat/434313>
18. Підвищення ефективності фотоелектричного перетворювача за допомогою методу відстеження точки максимальної потужності

https://www.researchgate.net/publication/399970017_Improving_the_efficiency_of_a_photovoltaic_converter_using_the_maximum_power_point_tracking_method

19. Порівняльний аналіз алгоритмів відстеження точки максимальної потужності фотоелектричної панелі <https://ena.lpnu.ua/bitstreams/18b3cb53-6eea-478a-955c-96c72a98034f/download>

20. Гібридна система зберігання енергії <https://insolenergy.com.ua/tovary/sistemu-zberiganya-energii/komplektu-sistem-zberiganya-energii/gibridnaya-sistema-hraneniya-energii-fox-ess-h1-6-0-e-g2-i-6-b-5-18>

21. Силові перетворювачі відновлювальної енергетики. Навчальний посібник / С.М. Бойко, І.В. Касаткіна, О.М. Городній, О.А. Жуков – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 230 с.

22. A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects <https://scispace.com/pdf/a-comprehensive-review-of-hybrid-energy-storage-systems-4xcrtr7oqo.pdf>

23. <https://aw-therm.com.ua/gibridna-sonyachna-elektrostantsiya-shemi-pidklyuchennya/>

24. Behura, A. K., Kumar, A., Rajak, D. K., Pruncu, C. I. & Lamberti, L. Towards better performances for a novel rooftop solar pv system. Solar Energy 216, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.045> (2021).

25. Особливості моделювання автономної сонячної фотоелектричної системи <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/f62f8799-9295-49f9-8e97-137ec567a5af/content>

26. <https://poilka.com.ua/ua/g99886458-povyshayuschie-preobrazovateli?srsId=AfmBOooaZp9NbV6R95mSQqwB7vBBYWrk3seLvwMN38Nyy1OzUZ1sgZ5R>

27. <https://voron.ua/uk/catalog/active-components/integrated-circuit/power-management-ic-pwm-controllers/dc-dc-converters-ic/step-up-converters-ic>

28. Modeling and Control of a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) Wind Power Generation System for Real-time Simulations
<https://scispace.com/pdf/modeling-and-control-of-a-doubly-fed-induction-generator-52gsa05s0d.pdf>
29. <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/878109f9-a23d-4b93-8d0d-efcff391190f/content>
30. Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).50-58](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).50-58)
31. <https://sun-energy.com.ua/image/pdf/%D0%9A%D0%BE%D0%BDD1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D1%80%20%D0%B7%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%B0%20MPPT%2010%20%20MPPT%2020.pdf?srsId=AfmBOorzocPrLCVg3UKSxbP oGjva58fUFAb6NEuoOsI6VxS3Qi1fEYI>
32. Kumar, G. B. A., Shivashankar, S. & Keshavamurthy, K. Design and control of grid-connected solar-wind integrated conversion system with dfig supplying three-phase four-wire loads. *Int. J. Power Electr. Drive Syst.* 12,
33. Kathe, M. L. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (MPPT) techniques used in solar PV systems. *Energies*, 16(5), 2206.
<https://doi.org/10.3390/en16052206>.
34. Fateh, F., White, W. N. & Greenbacker, D. A maximum power tracking technique for grid-connected dfig-based wind turbines. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electr.* 3, <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2448633> (2015).
35. Moosavi, S. K. R., & others (2022). Highly efficient MPPT control using a dynamic group-based cooperation optimization (DGBCO) algorithm for PV systems. *Engineering Applications / Renewable Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.011>
36. Wind Turbine Modeling, Maximum Power Point Tracking (MPPT), and Experimental Validation
https://www.researchgate.net/publication/382677143_Wind_Turbine_Modeling_

37. Абделлатіф, Е., Хамада, А.М. та Абдельвахаб, М. (2021). Техніка MPPT оцінки швидкості вітру вітрових турбін на базі DFIG: теоретичне та експериментальне дослідження. *Electrical Engineering*, 103(6), с. 2769–2781. doi:<https://doi.org/10.1007/s00202-021-01268-8>

38. Xia, Y.Y., Ahmed, K.H., Williams, B.W.: ‘Wind turbine power coefficient analysis of a new maximum power point tracking technique’, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2013, 60, (3), pp. 1122–1132

39. <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/469>

40. Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника до 85-річчя від дня народження https://iee.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/04/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80_%D0%B4%D0%BE_85_%D1%80%D1%96%D1%87_%D0%9F%D1%80%D0%B0%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%9D%D0%9D%D0%86%D0%95%D0%95_2025_%D0%B4%D1%80%D1%83%D0%BA.pdf