

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ МІКРОМЕРЕЖІ
НА ОСНОВІ ВІТРОВОЇ ТУРБИНИ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО
ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-42
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Тюканько М.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Тюканько Максиму Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка гібридної мікромережі на основі вітрової турбіни та фотоелектричного джерела електроенергії

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «24» січня 2025 року № 4/7-51.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи У гібридній мікромережі основними джерелами електроенергії є вітрова турбіна і фотоелектрична станція

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Загальна інформація про мікромережу

2. Фотоелектрична система

3. Вітрогенератор

4. Конфігурація гібридної мікромережі

5. Моделювання та керування

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Мікромережева енергосистема

2. Блок-схема алгоритму збурення та спостереження

3. Гібридна система мікромереж змінного/постійного струму

4. Структурна схема керування

5. Загальна система

6. Результати моделювання

[illegible]

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Студент	(підпис)	Тюканько М.О.	(прізвище та ініціали)
Керівник роботи	(підпис)	Коваль В.П.	(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ-42. – Т. : ТНТУ, 2025.

Стор. 75; рис. 38; табл. 5; креслень (презентацій) __; джерел 29.

Метою роботи є розробити структуру та проаналізувати продуктивність гібридної мікромережевої системи змінного/постійного струму із відновлювальними джерелами енергії.

У роботі запропоновано мікромережу на основі вітрової турбіни та фотоелектричного джерела електроенергії. У ній різні джерела змінного і постійного струму та навантаження підключені до відповідних мереж змінного і постійного струму. Кола змінного і постійного струму з'єднані між собою за допомогою двох трансформаторів і двох двонаправлених трифазних перетворювачів. Шина змінного струму гібридної мережі підключена до електромережі.

Проведено розрахунок вольт-амперних та вольт-ватних характеристик фотоелектричного масиву. Підтверджено той факт, що напруга холостого ходу логарифмічно залежить від сонячного випромінювання, проте струм короткого замикання прямо пропорційний інтенсивності випромінювання.

Ключові слова: МІКРОМЕРЕЖА, ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Загальна інформація про мікромережу.....	8
1.2 Технічні виклики в мікромережах.....	10
1.3 Тенденції розвитку мікромережових технологій.....	12
1.4 Фотоелектрична система як джерело електроенергії для мікромереж в мікромережах	18
1.4.1 Фотоелектричний елемент	18
1.4.2 Фотоелектричний модуль.....	19
1.4.3 Фотоелектричний масив	20
1.4.4 Робота фотоелемента	21
1.5 Висновки до розділу	13
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	14
2.1 Моделювання фотоелектричної панелі.....	23
2.2 Відстеження точок максимальної потужності	26
2.2.1 Необхідність відстеження точки максимальної потужності.....	26
2.2.2 Алгоритми відстеження точки максимальної потужності.....	27
2.2.2.1 Алгоритм збурення та спостереження	27
2.2.2.2 Інкрементна провідність.....	30
2.2.2.3 Паразитні ємності.....	32
2.2.2.4 Точковий трекер максимальної потужності з контролем напруги	32
2.2.2.5 Точковий трекер максимальної потужності з контролем струму.....	33
2.3 Акумуляторна батарея	33
2.4 Вітрогенератори	35

2.5 Математичне моделювання асинхронного двигуна в режимі генератора	36
2.5.1 Моделювання DFIG	36
2.5.2 Динамічне моделювання DFIG	39
2.6 Висновки до розділу	43
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	
3.1 Розробка мікромережі змінного/постійного струму	45
3.2 Моделювання фотоелектричного масиву	48
3.3 Моделювання асинхронного генератора з подвійним живленням	51
3.4 Результати моделювання гібридної мережі	52
3.5 Висновки до розділу	50
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1 Фізичні основи електробезпеки	60
4.2 Інструктажі з охорони праці	61
4.3 Блискавкозахист	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70

ВСТУП

Актуальність теми.

Розподілені генератори (РГ) на основі відновлюваних джерел енергії відіграють домінуючу роль у виробництві електроенергії, зважаючи на посилення глобального потепління. Розподілена генерація на основі вітру, сонячної енергії, біомаси, міні-ГЕС, а також використання паливних елементів і мікротурбін надасть значного імпульсу в найближчому майбутньому. Такі переваги, як екологічність, можливість розширення та гнучкість, зробили розподілену генерацію, що працює на різних відновлюваних та нетрадиційних мікроджерелах, привабливим варіантом для конфігурації сучасних електричних мереж. Мікромережа складається з кластеру навантажень і розподілених генераторів, які працюють як єдина керована система. Як інтегрована система енергопостачання мікромережа може працювати паралельно з основною електромережею або ізольовано від неї. Концепція мікромереж дозволяє зменшити кількість зворотних перетворень в окремій мережі змінного або постійного струму, а також полегшує підключення до енергосистем змінних відновлюваних джерел змінного і постійного струму та навантажень. Підключення генераторів до електромережі через силові електронні перетворювачі викликає занепокоєння щодо безпечної експлуатації та захисту обладнання. За бажанням замовника мікромережа може бути спроектована відповідно до його спеціальних вимог, таких як підвищення локальної надійності, зменшення втрат у фідері, підтримка локальної напруги, підвищення ефективності за рахунок використання відпрацьованого тепла, корекція просідання напруги або забезпечення безперебійного живлення.

Мета кваліфікаційної роботи: розробити структуру та проаналізувати продуктивність гібридної мікромережевої системи змінного/постійного струму із відновлювальними джерелами енергії.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання**:

1. Зробити аналіз мікромереж та тенденції їх розвитку.

2. Розробити мікромережу на основі вітрової турбіни та фотоелектричного джерела електроенергії.
3. Провести відповідні розрахунки.
4. Провести моделювання роботи розробленої гібридної мікромережі.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Виконана згідно вимог [1]. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 79 арк. формату А4, графічна частина – ___ аркушів презентації

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Загальна інформація про мікромережу

З розвитком технологій розподілу електроенергії стає помітним багато тенденцій, які змінюють вимоги до постачання енергії. Ці зміни відбуваються як з боку попиту, де бажана вища доступність та ефективність енергії, так і з боку пропозиції, де необхідно врахувати інтеграцію розподіленої генерації та технологій згладжування пікових навантажень.

Енергосистеми наразі зазнають значних змін в експлуатаційних вимогах, головним чином, внаслідок дерегуляції та збільшення кількості розподілених енергетичних ресурсів (РЕР). У багатьох випадках РЕР включають різні технології, які дозволяють виробляти електроенергію в малих масштабах (мікроджерела), а деякі з них використовують переваги відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячна [2-5], вітрова [6-8] або гідроенергія. Розташування мікроджерел поблизу навантаження має перевагу у зменшенні втрат при передачі електроенергії, а також у запобіганні перевантажень в мережі. Крім того, зменшується ймовірність переривання електропостачання кінцевих споживачів, підключених до розподільчої мережі низької напруги (в Європі 230 В, а в США 110 В), оскільки сусідні мікроджерела, керовані навантаження та системи зберігання енергії можуть працювати в автономному режимі у разі серйозних збоїв у системі. Сьогодні це називається мікромережею. На рисунку 1.1 зображена типова мікромережа. Характерна мікромережа має розмір, подібний до розподільчого фідера низької напруги і рідко перевищує потужність 1 МВА та географічний проміжок в 1 км. Як правило, понад 90% низьковольтних побутових споживачів живляться підземним кабелем, а решта – повітряними лініями. Мікромережа часто постачає споживачам як електроенергію, так і тепло за допомогою теплоелектроцентралей (ТЕЦ), газових турбін, паливних елементів, фотоелектричних (ФЕ) систем, вітрогенераторів тощо. Системи зберігання енергії зазвичай включають акумулятори та маховики [9-11]. Накопичувачі в

мікромережі еквівалентні обортовому резерву великих генераторів у традиційній мережі, що забезпечує баланс між виробництвом та споживанням енергії, особливо під час швидких змін у навантаженні або генерації [12].

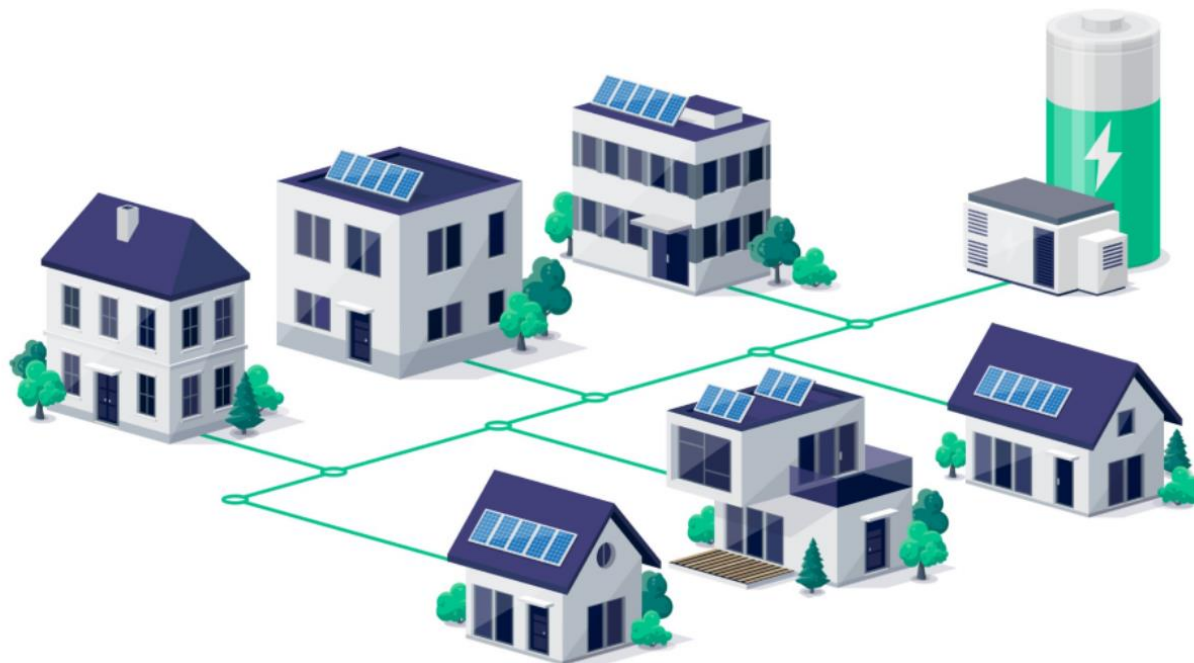


Рисунок 1.1 – Мікромережева енергосистема

З точки зору споживача, мікромережі задовольняють потреби в тепловій та електричній енергії, а також підвищують місцеву надійність, зменшують викиди, покращують якість електроенергії завдяки підтримці напруги та зменшенню перепадів напруги, а також потенційно знижують витрати на енергопостачання. З точки зору комунальних служб, використання розподілених джерел енергії може потенційно зменшити попит на розподільчі та передавальні потужності. Очевидно, що розподілена генерація, розташована близько до навантаження, зменшить потоки в ланцюгах передачі та розподілу з двома важливими ефектами: зменшенням втрат та потенційною можливістю заміщення мережевих активів. Крім того, присутність генерації, наближеної до попиту, може підвищити якість послуг для кінцевих споживачів. Мікромережі можуть забезпечити підтримку мережі під час стресових ситуацій, зменшуючи затори та сприяючи відновленню після збоїв. Розвиток мікромереж може сприяти зменшенню викидів та пом'якшенню наслідків зміни клімату. Це

пов'язано з наявністю та розвитком технологій розподіленої генерації на основі відновлюваних джерел [13] та мікроджерел, які характеризуються дуже низьким рівнем викидів.

Мікромережі мають низку переваг для кінцевих споживачів, комунальних підприємств та суспільства, таких як: підвищення енергоефективності, мінімізація загального споживання енергії, скорочення викидів парникових газів та забруднюючих речовин, підвищення якості та надійності послуг, економічно ефективна заміна електроенергетичної інфраструктури.

Технічні виклики, пов'язані з експлуатацією та управлінням мікромереж, величезні. Забезпечення стабільної роботи під час мережевих збурень, підтримка стабільності та якості електроенергії в автономному режимі роботи вимагає вдосконалення складних стратегій управління інверторами мікромереж з метою забезпечення стабільної частоти та напруги за наявності доволіно змінних навантажень [14]. У світлі цього, концепція мікромереж стимулювала багатьох дослідників і привернула увагу урядових організацій в Європі, США та Японії. Тим не менш, існують різні технічні проблеми, пов'язані з інтеграцією та експлуатацією мікромереж.

1.2 Технічні виклики в мікромережах

Система захисту є одним з головних викликів для мікромережі, яка повинна реагувати як на несправності основної мережі, так і на несправності мікромережі. У першому випадку система захисту повинна відключати мікромережу від основної мережі так швидко, як це необхідно для захисту навантажень мікромережі, а у другому випадку система захисту повинна ізолювати найменшу частину мікромережі при усуненні несправності. Сегментація мікромережі, тобто проектування декількох островів або субмікромереж, повинна підтримуватися контролерами мікроджерел і навантаження. У цих умовах можуть виникнути проблеми, пов'язані з селективністю (помилкові, непотрібні спрацьовування) і чутливістю

(невиявлені несправності або запізнілі спрацьовування) системи захисту. Основними проблемами захисту мікромереж є дві: перша пов'язана з кількістю встановлених в мікромережі одиниць ДРГ, а друга – з наявністю достатнього рівня струму короткого замикання в ізольованому режимі роботи мікромережі, оскільки цей рівень може суттєво знизитися після відключення від жорсткої магістральної мережі. В роботі [15] автори виконали розрахунки струмів короткого замикання для радіальних фідерів з ДРГ і дослідили, що струми короткого замикання, які використовуються в реле максимального струмового захисту (МСЗ), залежать від точки підключення ДРГ та потужності живлення від ДРГ. Напрямки та амплітуди струмів короткого замикання будуть відрізнятися через ці умови. В реальності умови роботи мікромережі постійно змінюються через непостійні мікроджерела (вітер і сонце) та періодичні зміни навантаження. Крім того, топологія мережі може часто змінюватися з метою мінімізації втрат або досягнення інших економічних чи експлуатаційних цілей. Крім того, в результаті несправностей в основній мережі або всередині мікромережі можуть утворюватися керовані острівці різного розміру та складу. У таких ситуаціях може статися втрата координації реле, і загальний захист ЗС з однією групою уставок може стати недостатнім, тобто він не гарантуватиме селективну роботу при всіх можливих пошкодженнях. Тому дуже важливо, щоб уставки, вибрані для реле захисту від ДРГ, враховували топологію мережі та зміни в розташуванні, типі та кількості генерації. В іншому випадку може виникнути небажана робота або відмова під час необхідних умов. Щоб впоратися з двонаправленими потоками потужності та низькими рівнями струму короткого замикання в мікромережах, де домінують мікроджерела з силовими електронними інтерфейсами, необхідна нова філософія захисту, в якій параметри реле повинні періодично перевірятися/оновлюватися, щоб переконатися, що вони все ще є придатними.

1.3 Тенденції розвитку мікромережових технологій

За останні кілька років популярність систем розподіленої генерації зростає швидше через їхню вищу операційну ефективність та низький рівень викидів. Розподілені генератори використовують для своєї роботи кілька мікроджерел, таких як фотоелектричні елементи, акумулятори, мікротурбіни та паливні елементи. У години пікових навантажень розподілені генератори забезпечують пікову генерацію, коли вартість енергії висока, та резервну генерацію під час системних відключень. Мікромережа створюється шляхом об'єднання кластерів навантажень та паралельних систем розподіленої генерації на певній території. Мікромережі мають велику потужність і більшу гнучкість управління, що забезпечує надійність системи, а також відповідає вимогам якості електроенергії. Робота мікромережі потребує впровадження високоефективних алгоритмів керування потужністю та регулювання напруги [12].

Для реалізації потенціалу розподіленої генерації пропонується системний підхід, тобто мікромережа, яка розглядає генерацію та пов'язані з нею навантаження як підсистему. Цей підхід передбачає локальне управління розподіленою генерацією, а отже, зменшує потребу в центральній диспетчеризації. Під час збурень, спричинених ізольованою генерацією та навантаженнями, локальна надійність мікромережі може бути вищою, ніж всієї енергосистеми. Таке застосування підвищує ефективність системи вдвічі. Поточна реалізація мікромережі включає джерела з навантаженнями, дозволи на навмисне ізолювання та використання наявного відпрацьованого тепла енергогенеруючих систем.

Мікромережа працює як єдина керована система, яка забезпечує електроенергією та теплом свою місцевість. Ця концепція пропонує новий прототип для роботи розподіленої генерації. Для комунальних служб мікромережа може розглядатися як керована клітинка енергосистеми. У разі

несправностей у мікромережі, основна мережа повинна бути ізольована від розподільчої секції так швидко, як це необхідно для захисту навантажень. Ступінь ізоляції залежить від навантаження споживача на мікромережу. Компенсація провисання може бути використана в деяких випадках з ізоляцією від розподільчої системи для захисту критичних навантажень.

Концепція мікромереж знижує вартість і підвищує надійність малих розподілених генераторів. Основна мета цієї концепції – прискорити визнання переваг малих розподілених генераторів, таких як здатність постачати відпрацьоване тепло у разі потреби. З точки зору енергосистеми, мікромережа є привабливим варіантом, оскільки вона визнає, що національна система розподілу є розгалуженою, старою і буде змінюватися дуже повільно. Ця концепція дозволяє досягти високого рівня проникнення розподільчої генерації без необхідності перепроєктування самої системи розподілу.

Концепція мікромереж є рішенням проблеми інтеграції великої кількості мікрогенерації без переривання роботи комунальної мережі. Підсистема мікромережі або розподільчої мережі створить менше проблем для комунальної мережі, ніж звичайна мікрогенерація, якщо існує належна та розумна координація мікрогенерації та навантажень. У разі порушень в основній мережі, мікромережа може потенційно відключитися і продовжувати працювати індивідуально, що сприяє підвищенню якості електроенергії для споживача.

З розвитком розподілених генераторів та мікромереж розробляються різні важливі інтерфейси кондиціонування електроенергії та відповідне управління для підключення декількох мікроджерел до мікромережі, а потім підключення мікромереж до традиційних енергосистем. Завдяки такому взаємозв'язку мікромережа стає дуже гнучкою і може вільно працювати як в режимі підключення до мережі, так і в режимі автономної роботи. У першому випадку кожне мікроджерело може працювати як джерело струму з максимальною потужністю, що передається в мережу. Ізольований режим роботи з більшими вимогами до балансування попиту і пропозиції спрацьовує, коли основна

мережа не є порівняно великою або просто відключена через виникнення несправності. Без потужної мережі та стабільної системної напруги кожне мікроджерело тепер має регулювати власну напругу на клеммах в межах допустимого діапазону, який визначається внутрішньо генерованим еталонним значенням. Таким чином, мікро-джерело виступає як кероване джерело напруги, чия вихідна напруга повинна справедливо розподіляти навантаження з іншими джерелами. Бажано, щоб цей розподіл був пропорційним до їхніх номінальних потужностей, щоб не перевантажувати жодне з них.

Встановлення розподілених генераторів передбачає технічні дослідження у двох основних сферах. Перше – це боротьба з впливами, спричиненими розподіленими генераторами, без внесення значних змін до стратегії управління традиційною розподільчою системою, а друге – створення нової концепції використання розподілених генераторів. Концепція мікромережі відповідає останньому підходу. Встановлення мікромережі має ряд переваг. Мікромережа може ефективно інтегрувати розподілені енергетичні ресурси з навантаженнями. Мікромережа вважається "дружнім до мережі об'єктом" і не чинить небажаного впливу на розподільчу мережу, тобто політику роботи розподільчої мережі не потрібно змінювати. Вона також може працювати незалежно у разі виникнення будь-якої несправності. У випадку великих збоїв існує ймовірність дисбалансу попиту та пропозиції, оскільки мікромережа не має великого центрального генератора. Крім того, мікромережа включає в себе різні РЕР. Навіть якщо енергетичний баланс підтримується, продовжуються небажані коливання [16].

Для кожного компонента мікромережі використовується модель peer-to-peer та plug-and-play для підвищення надійності системи. Концепція peer-to-peer гарантує, що при втраті будь-якого компонента або генератора мікромережа зможе продовжити свою роботу. Функція plug-and-play передбачає, що без перепроєктування системи управління блок може бути розміщений в будь-якій точці електричної системи, що допомагає зменшити ймовірність інженерних помилок.

Економіка країни значною мірою залежить від постачання електроенергії, яке має бути надійним та якісним. Потреба споживачів у якості електроенергії та енергопостачанні задовольняється за допомогою розподіленого енергопостачання. Система розподілу в основному включає в себе відновлювані джерела енергії, системи акумулювання та невеликі генеруючі системи, які, як правило, встановлюються поблизу приміщень споживача. Перевагами PER є краща якість електроенергії, вища надійність та висока ефективність використання енергії за рахунок утилізації відпрацьованого тепла. Це привабливий варіант з екологічних міркувань, оскільки при цьому відбувається незначне забруднення навколишнього середовища. Крім того, це допомагає електроенергетичним компаніям, зменшуючи перевантаження в мережі, знижуючи потребу в новому виробництві та передачі електроенергії, а також в таких послугах, як підтримка напруги та реагування на попит. Мікромережа – це інтегрована система. Інтеграція PER, підключених до мікромережі, має вирішальне значення. Також існує додаткова проблема, пов'язана з контролем, групуванням та управлінням PER в ефективний та надійний спосіб.

Інтеграція вітрових турбін та фотоелектричних систем [17] з електромережею призводить до нестабільності мережі. Одним з рішень цієї проблеми може бути впровадження мікромереж. Незважаючи на ряд переваг, пов'язаних з роботою мікромереж, існують високі втрати в лініях електропередач. У мікромережі є кілька блоків, які можуть бути використані в будинку або дачі. У будинку відновлювані джерела енергії та накопичувачі підключаються до шини постійного струму з різною топологією перетворювачів, від якої живляться навантаження постійного струму. Для передачі енергії між шинами змінного та постійного струму використовуються інвертори. Загальні та чутливі навантаження підключаються до шини змінного струму з різними точками з'єднання. Під час аварії в електромережі мікромережа працює в автономному режимі. Якщо в якомусь випадку відновлюване джерело не може забезпечити достатню кількість енергії, а рівень

заряду накопичувачів низький, мікромережа відключає загальне навантаження і подає живлення на чутливі навантаження [18].

Відновлювані джерела енергії інтегровані з мікромережами для зменшення викидів CO_2 та споживання палива. Відновлювані ресурси дуже мінливі за своєю природою, а також виробництво і споживання цих джерел є дуже складними. Тому нові генератори відновлюваної енергії повинні бути розроблені з більшою гнучкістю і керованістю.

У звичайних системах електропостачання змінного струму джерело змінної напруги перетворюється на постійну за допомогою інвертора змінного/постійного струму для живлення навантажень постійного струму. Перетворювачі AC/DC/AC також використовуються в промислових приводах для керування швидкістю обертання двигуна. Через екологічні проблеми, пов'язані з традиційними електростанціями, відновлювані ресурси підключаються як розподілені генератори або мікромережі змінного струму. Крім того, все більше і більше навантажень постійного струму, таких як світлодіодні лампи та електромобілі, підключаються до енергосистем змінного струму для економії енергії та зменшення викидів вуглекислого газу (CO_2). Передача високої напруги на великі відстані більше не потрібна, коли енергія може постачатися з місцевих відновлюваних джерел. Джерела змінного струму в мережі постійного струму повинні бути перетворені в постійний струм, а навантаження змінного струму підключені до мережі постійного струму за допомогою інверторів постійного/змінного струму [19].

Системи постійного струму використовують силові електронні перетворювачі для перетворення джерел змінного струму в постійний і розподілу електроенергії по лініях постійного струму. Розподіл постійного струму стає привабливим для індустріального парку з великими навантаженнями, керованими електродвигунами, та чутливими електронними навантаженнями. Швидка реакція цих силових електронних перетворювачів допомагає забезпечити високонадійне електропостачання, а також сприяє ефективній фільтрації перешкод. Використання силових електронних

перетворювачів допомагає вирішити дві основні проблеми, пов'язані з системами постійного струму: надійне перетворення змінного струму в постійний/постійний/змінний та переривання постійного струму як в нормальному, так і в несправному стані [20]. У порівнянні зі звичайною мережею змінного струму, мережа постійного струму має перевагу в тому, що джерела живлення, підключені до мережі постійного струму, можуть працювати спільно, оскільки напруга постійного струму на навантаженні контролюється. Система електромереж постійного струму працює в автономному режимі у випадку аномальних ситуацій або несправностей в електромережі змінного струму, в якому вироблена електроенергія подається до навантажень, підключених до мережі постійного струму. Зміни генерованої потужності і споживаної навантаженням потужності можуть бути компенсовані як згусток потужності в поясі постійного струму. Вартість системи та втрати зменшуються через необхідність лише одного інвертора, підключеного до мережі змінного струму.

Тому ефективність знижується через багатоступеневі перетворення в мережі змінного або постійного струму. Тому для скорочення процесу багаторазового перетворення DC/AC/DC або AC/DC/AC в окремій мережі змінного або постійного струму пропонується гібридна мікромережа AC/DC, яка також допомагає зменшити втрати енергії через зворотне перетворення.

Здебільшого відновлювані електростанції впроваджуються в сільській місцевості, яка знаходиться далеко від основної електромережі, де є можливість слабого підключення до лінії електропередач. Концепція мікромереж (ММ) забезпечує ефективне рішення для таких слабких систем. Робота може бути згладжена за допомогою технологій гібридної генерації, при цьому мінімізуючи збурення через переривчастий характер енергії від фотоелектричної та вітрової генерації. Також існує можливість обміну енергією з основною мережею, коли в мікромережі виникає надлишок/дефіцит.

Розподілена генерація набуває все більшої популярності завдяки своїм перевагам, таким як екологічність, можливість розширення та доступність без

зміни існуючої мережі передачі та розподілу електроенергії. Сучасні джерела залежать від природних та кліматичних умов, що робить їх неконтрольованими. Через цю проблему виникає концепція мікромереж, які об'єднують декілька розподілених джерел енергії з різними принципами роботи. У режимі прив'язки до мережі розподілені зелені джерела працюють як кероване джерело струму, а надлишок енергії спрямовується мережею до інших віддалених навантажень. Існує потреба в постійному регулюванні вихідної потужності джерела, що може бути досягнуто за допомогою зовнішніх комунікаційних ліній або без них. У разі будь-яких несправностей режим прив'язки до мережі виявляється менш надійним, оскільки це призводить до нестабільності.

1.4 Фотоелектрична система як джерело електроенергії для мікромереж в мікромережах

Фотоефект вперше помітив французький фізик Едмунд Беккерель у 1839 році. Він припустив, що деякі матеріали мають властивість виробляти невелику кількість електричного струму під впливом сонячного світла. У 1905 році Альберт Ейнштейн пояснив природу світла та фотоефекту, що стало основним принципом фотоелектричної технології. У 1954 році компанія Bell Laboratories побудувала перший фотоелектричний модуль.

Фотоелектрична система використовує одну або кілька сонячних панелей для перетворення сонячної енергії в електричну. Вона складається з різних компонентів, які включають фотоелектричні модулі, механічні та електричні з'єднання і кріплення, а також засоби регулювання та/або зміни електричної потужності.

1.4.1 Фотоелектричний елемент

Основними компонентами фотоелементів є напівпровідникові матеріали, такі як кремній. У сонячних елементах тонка напівпровідникова пластина створює електричне поле, з одного боку позитивне, а з іншого – негативне.

Коли світлова енергія потрапляє на сонячний елемент, електрони вибиваються з атомів напівпровідникового матеріалу. Коли електричні провідники з'єднуються з позитивною і негативною сторонами, утворюється електричний ланцюг, і електрони захоплюються у вигляді електричного струму, тобто електрики. Ця електроенергія використовується для живлення навантаження. Фотоелемент може мати круглу або квадратну форму.

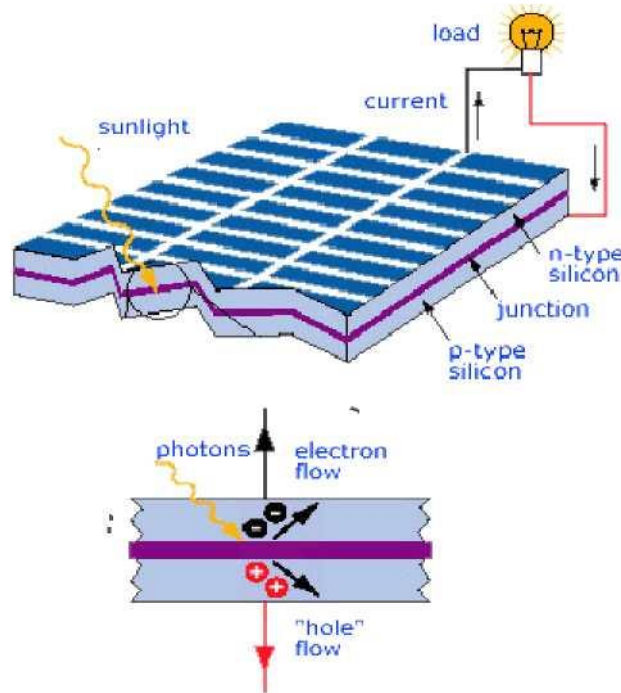


Рисунок 1.2 – Базова структура фотоелемента

1.4.2 Фотоелектричний модуль

Через низьку напругу, що генерується в фотоелементі (близько 0,5 В), кілька фотоелементів з'єднують послідовно (для високої напруги) і паралельно (для високого струму), щоб сформувати фотоелектричний модуль для отримання бажаної потужності. У разі часткового або повного затінення, а також вночі може виникнути потреба в окремих діодах, щоб уникнути зворотних струмів. р-п переходи монокристалічних кремнієвих фотоелементів можуть мати адекватні характеристики зворотного струму, і вони не є необхідними. Через зворотні струми відбувається втрата потужності, що

призводить до перегріву затінених елементів. При високих температурах сонячні елементи забезпечують меншу ефективність, тому інсталятори прагнуть забезпечити хорошу вентиляцію позаду сонячної панелі. Зазвичай фотоелектричні модулі складаються з 36 або 72 комірок. Модулі складаються з прозорої передньої сторони, інкапсульованих фотоелементів та задньої сторони. Лицьова сторона зазвичай складається з матеріалу з низьким вмістом заліза і загартованого скла. Ефективність фотомодуля менша, ніж фотоелемента [21,22,23]. Це пов'язано з тим, що частина випромінювання відбивається від скляного покриття, затінення рами тощо.

1.4.3 Фотоелектричний масив

Фотоелектричний масив (фотоелектрична система) – це з'єднання модулів, які, в свою чергу, складаються з багатьох фотоелементів, з'єднаних послідовно або паралельно. Потужності, виробленої одним модулем, недостатньо для задоволення вимог комерційних застосувань, тому модулі з'єднуються в масив для живлення навантаження. У масиві модулі з'єднуються так само, як і комірки в модулі. Модулі в фотоелектричному масиві зазвичай спочатку з'єднуються послідовно, щоб отримати бажану напругу; потім окремі модулі з'єднуються паралельно, щоб система могла виробляти більше струму. У міських умовах, як правило, масиви встановлюються на дахах будинків. У сільському господарстві потужність фотоелектричних модулів може безпосередньо подаватися на двигун постійного струму.

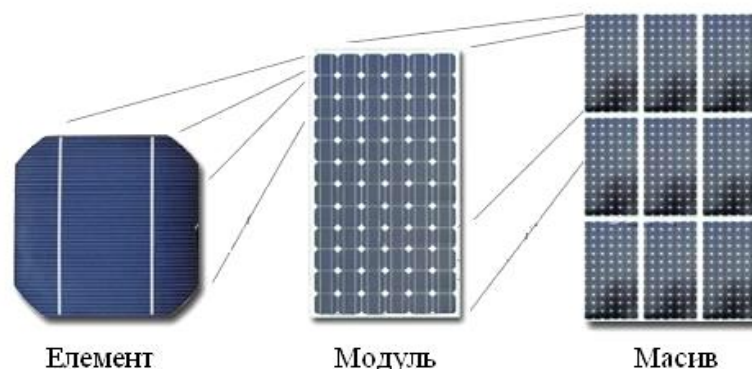


Рисунок 1.3 – Фотоелектрична система

1.4.4 Робота фотоелемента

Основним принципом роботи фотоелемента є фотоелектричний ефект. В цьому ефекті електрон вибивається із зони провідності в результаті поглинання сонячного світла певної довжини хвилі речовиною (металевими або неметалевими твердими тілами, рідинами або газами). Отже, у фотоелектричному елементі, коли сонячне світло потрапляє на його поверхню, деяка частина сонячної енергії поглинається напівпровідниковим матеріалом.

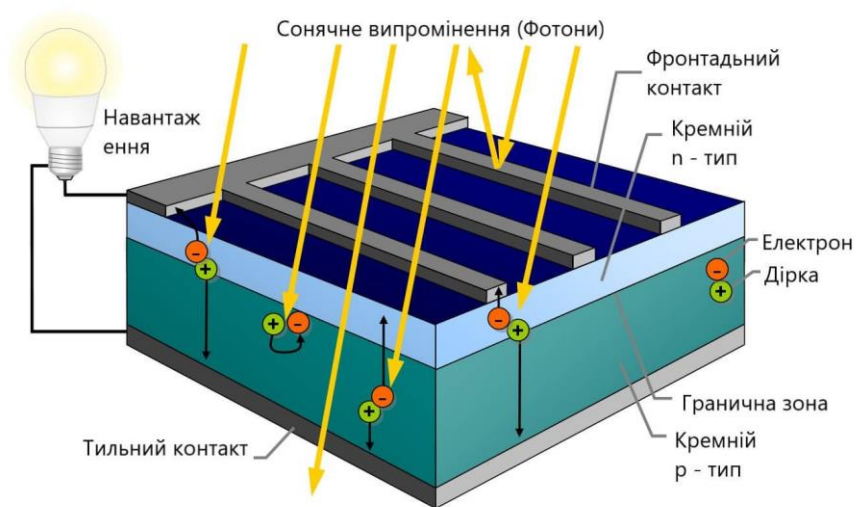


Рисунок 1.4 – Робота фотоелемента

Електрон з валентної зони перескакує в зону провідності, коли поглинута енергія більша за енергію забороненої зони напівпровідника. При цьому в освітленій області напівпровідника створюються пари дірка-електрон. Електрони, створені в зоні провідності, тепер можуть вільно рухатися. Ці вільні електрони змушені рухатися в певному напрямку під дією електричного поля, присутнього в фотоелементах. Ці електрони, що протікають через фотоелемент, утворюють струм, який можна використовувати для зовнішніх потреб, під'єднавши металеву пластину зверху і знизу фотоелемента. Цей струм і напруга виробляють необхідну потужність.

1.5 Висновки до розділу

1. Мікромережі мають низку переваг для кінцевих споживачів, комунальних підприємств та суспільства, таких як: підвищення енергоефективності, мінімізація загального споживання енергії, скорочення викидів парникових газів та забруднюючих речовин, підвищення якості та надійності послуг, економічно ефективна заміна електроенергетичної інфраструктури.
2. За останні кілька років популярність систем розподіленої генерації зростає швидше через їхню вищу операційну ефективність та низький рівень викидів.
3. Розкрито тенденції розвитку мікромережових технологій. Встановлено важливу роль в цьому процесів розподіленої генерації. Розподілена генерація набуває все більшої популярності завдяки своїм перевагам, таким як екологічність, можливість розширення та доступність без зміни існуючої мережі передачі та розподілу електроенергії.
4. Описано принцип роботи та конструкцію найбільш перспективного джерела електроенергії в мікромережах – фотоелектричної системи.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Моделювання фотоелектричної панелі

Фотоелектрична система може генерувати електроенергію постійного струму без впливу на навколишнє середовище під впливом сонячного світла. Основним будівельним елементом фотоелектричної системи є сонячна батарея, яка являє собою р-п перехід, що безпосередньо перетворює світлову енергію в електричну. Вихідна характеристика фотоелектричного модуля залежить від температури фотоеlementa, сонячного випромінювання та вихідної напруги модуля. На рис.2.1 показана еквівалентна схема фотоелектричного елемента з навантаженням [24].

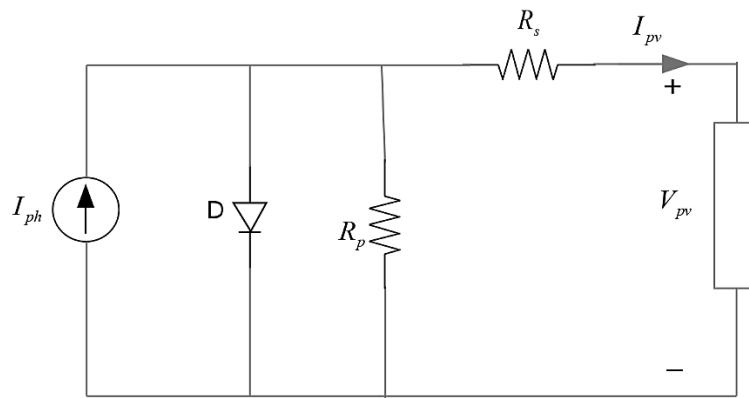


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема сонячного елемента

Зазвичай еквівалентна схема загальної моделі фотоелектричного елемента складається з джерела фотоструму, діода, паралельного резистора, який виражає струм витоку, і послідовного резистора, який описує внутрішній опір протіканню струму. Рівняння вольт-амперної характеристики сонячного елемента має вигляд

$$I_{pv} = I_{PH} - I_S \left[\exp \left(\frac{q V_{pv} + I_{pv} R_s}{k T_C A} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Фотострум в основному залежить від робочої температури елемента і сонячного випромінювання, що пояснюється наступним чином

$$I_{PH} = \left[I_{SC} + K_I (T_C - T_{Ref}) \right] \lambda / 1000 \quad (2.2)$$

Струм насичення комірки змінюється в залежності від температури комірки, що представлено у вигляді

$$I_S = I_{RS} \left(T_C / T_{Ref} \right)^3 \exp \left[q E_G \left(1 / T_{Ref} - 1 / T_C \right) / k A \right] \quad (2.3)$$

Опір шунта R_P елемента обернено пропорційний струму витоку на землю. Зазвичай ефективність фотоелектричної батареї нечутлива до зміни R_P , і можна вважати, що опір витоку на землю наближається до нескінченності без струму витоку на землю.

Крім того, невелика зміна послідовного опору R_S може суттєво вплинути на вихідну потужність фотоелемента. Відповідна модель фотоелектричного елемента відповідної складності показана на рис. 2.1. Рівняння (2.1) може бути модифіковане до вигляду:

$$I_{pv} = I_{PH} - I_S \left[\exp \left(q V_{pv} + I_{pv} R_S / k T_C A \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

Для ідеального фотоелемента немає послідовних втрат і витоку на землю, тобто $R_S = 0$ і $R_P = \infty$. Таким чином, рівняння (2.1) можна переписати як:

$$I_{pv} = I_{PH} - I_S \left[\exp \left(q V_{pv} / k T_C A \right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

Фотоелектрична батарея – це група з декількох фотомодулів, які електрично з'єднані в послідовну або паралельну схему для генерації необхідного струму та напруги. Таким чином, рівняння струму і напруги масиву з N_P паралельних і N_S послідовних елементів може бути представлено як

$$I_{pv} = N_P I_{PH} - N_P I_S \left[\exp \left(q V_{pv} / N_S + I_{RS} / N_P / k T_C A \right) - 1 \right] - N_P V_{pv} / N_S + I_{RS} / R_P \quad (2.6)$$

Ефективність фотоелектричного елемента чутлива до невеликих змін опору послідовного з'єднання, але нечутлива до змін опору шунта. Роль послідовного опору дуже важлива для фотоелектричного модуля, а опір шунта наближається до нескінченності, який також можна вважати відкритим. Математичне рівняння моделі можна описати, розглядаючи послідовний і паралельний опір як

$$I_{pv} = N_P I_{PH} - N_P I_S \left[\exp \left(q V_{pv} / N_S + I_{PV} R_S / N_P / k T_C A \right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

Рівняння (2.7) можна спростити як:

$$I_{pv} = N_p I_{PH} - N_p I_S \left[\exp qV_{pv} / N_s k T_C A - 1 \right] \quad (2.8)$$

Напруга холостого ходу V_{OC} і струм короткого замикання I_{SC} є двома найважливішими параметрами, що описують електричні характеристики елемента. Наведені вище рівняння є неявними і нелінійними; отже, нелегко отримати аналітичне рішення для конкретної температури і освітленості. Зазвичай $I_{PH} \gg I_S$, тому, нехтуючи малими струмами діода і витоку на землю при нульовій напрузі, струм короткого замикання приблизно дорівнює фотоструму, тобто

$$I_{PH} = I_{SC} \quad (2.9)$$

Параметр напруги холостого ходу отримують, припускаючи нульовий вихідний струм. При заданій напрузі холостого ходу при еталонній температурі та ігноруванні струму витоку шунта, зворотний струм насичення можна отримати як

$$I_{RS} = I_{SC} / \left[\exp qV_{OC} / N_s k A T_C - 1 \right] \quad (2.10)$$

Крім того, максимальна потужність може бути визначена як

$$P_{\max} = V_{\max} I_{\max} = \gamma V_{OC} I_{SC} \quad (2.11)$$

Параметри, використані для моделювання фотоелектричної панелі, наведені в таблиці 2.1 [20].

Таблиця 2.1. Параметри фотоелектричної панелі

Символ	Значення
V_{oc}	403 В
q	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$
k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{K}$
A	1,50
I_{sc}	3,27 А
K_I	$1,7 \cdot 10^{-3}$
T_{Ref}	301,18 К
I_{rs}	$2,0793 \cdot 10^{-6} \text{ A}$
T_C	350 К
λ	0-1500 Вт/м ²
N_p	40
N_s	900
E_G	1,1 еВ

2.2 Відстеження точок максимальної потужності

Як електронна система відстеження точки максимальної потужності (ТМП) функціонує таким чином, що дозволяє фотоелектричним (ФЕ) модулям виробляти всю потужність, на яку вони здатні. Це не механічна система відстеження, яка фізично переміщує модулі, щоб вони були спрямовані прямо на сонце. Оскільки ТМП є повністю електронною системою, вона змінює робочу точку модуля таким чином, щоб модулі могли забезпечити максимальну доступну потужність. Оскільки вихідна потужність фотоелектричної системи залежить від температури, опромінення та характеристики навантаження, ТМП не може забезпечити ідеальну вихідну напругу. З цієї причини ТМП необхідно використовувати в фотоелектричній системі, щоб максимізувати вихідну напругу фотоелектричного масиву.

2.2.1 Необхідність відстеження точки максимальної потужності

На кривій залежності потужності від напруги фотоелектричного модуля (рис.2.2) існує єдиний максимум потужності, тобто існує пікова потужність, що відповідає певній напрузі та струму. Коефіцієнт корисної дії сонячного фотомодуля низький – близько 13%. Оскільки ККД модуля низький, бажано експлуатувати модуль в точці пікової потужності, щоб забезпечити максимальну потужність для навантаження при різних температурах і умовах опромінення. Ця максимальна потужність допомагає поліпшити використання сонячного фотомодуля. Пристрій відстеження точки максимальної потужності (ТМП) витягує максимальну потужність з фотоелектричного модуля і передає її на навантаження. Як проміжний пристрій DC/DC перетворювач передає цю максимальну потужність від сонячного фотомодуля до навантаження. Змінюючи робочий цикл, імпеданс навантаження змінюється і узгоджується в точці пікової потужності з джерелом, щоб передати максимальну потужність.

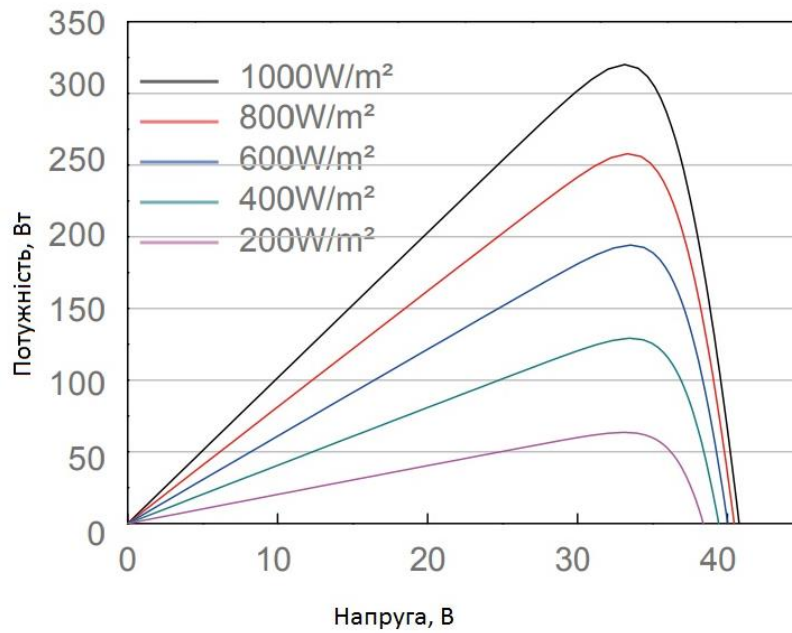


Рисунок 2.2 – Вольт-ватна характеристика

2.2.2 Алгоритми відстеження точки максимальної потужності

Існують різні алгоритми, які допомагають автоматично відстежувати точку пікової потужності сонячного фотомодуля. Алгоритми можуть бути записані у вигляді:

- збурення та спостереження;
- інкрементна провідність;
- паразитна ємність;
- відстеження пікової потужності на основі напруги;
- відстеження пікової потужності на основі струму.

2.2.2.1 Алгоритм збурення та спостереження

У цьому алгоритмі в систему вноситься невелике збурення. Потужність модуля змінюється через це збурення. Якщо потужність збільшується внаслідок збурення, то збурення продовжується в тому ж напрямку. Коли потужність досягає свого піку, наступної миті потужність зменшується, і збурення змінюється на протилежне. Під час стаціонарного стану алгоритм коливається

навколо пікової точки. Розмір збурення підтримується дуже малим, щоб варіація потужності була малою. Досліджено, що є певні втрати потужності через це збурення, а також він не може відстежувати потужність при швидкій зміні атмосферних умов. Але все ж цей алгоритм є дуже популярним і простим [25].

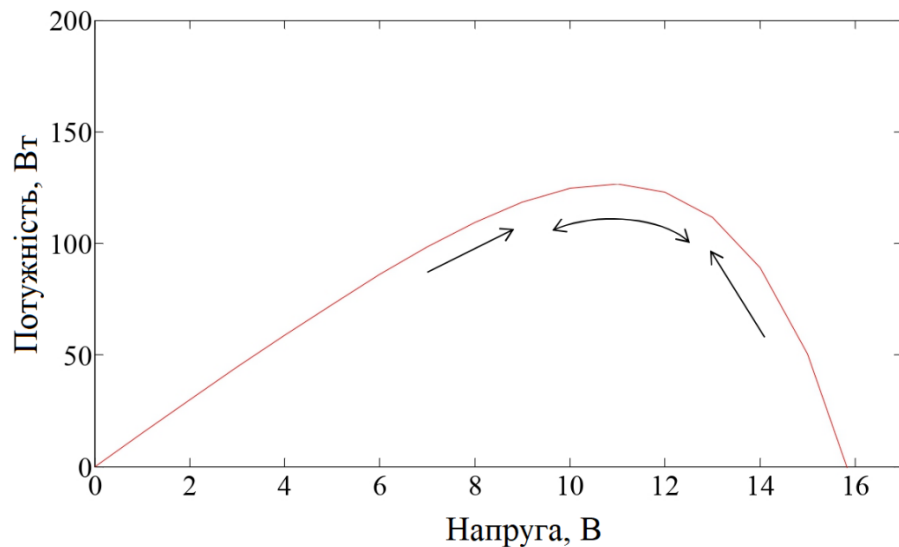


Рисунок 2.3 – Алгоритм збурення та спостереження

У даній роботі обрано саме цей алгоритм. На рис. 2.4 зображено блок-схему алгоритму. Алгоритм спостерігає за вихідною потужністю масиву і змінює потужність на основі приросту напруги масиву. Алгоритм безперервно збільшує або зменшує опорну напругу на основі значення попередньої вибірки потужності.

Тут задається опорна напруга V_{ref} , що відповідає точці пікової потужності модуля. Значення струму і напруги можна отримати від сонячного фотомодуля. За виміряними напругою і струмом розраховується потужність. Значення напруги та потужності в k^{th} момент часу зберігаються. Потім знову вимірюються значення в $(k + 1)^{th}$ момент часу і з вимірянних значень обчислюється потужність. Потужність і напруга в $(k + 1)^{th}$ момент часу віднімаються від значень в k^{th} момент часу. Якщо ми подивимося на криву залежності потужності від напруги сонячного фотомодуля, то побачимо, що на правій кривій, де напруга майже постійна нахил напруги живлення від'ємний

($dP/dv < 0$), тоді як у лівій частині нахил позитивний ($dP/dv > 0$). Залежно від знаку dP [$P(k + 1) - P(k)$] і dV [$V(k + 1) - V(k)$] після віднімання алгоритм вирішує, чи збільшувати або зменшувати опорну напругу.

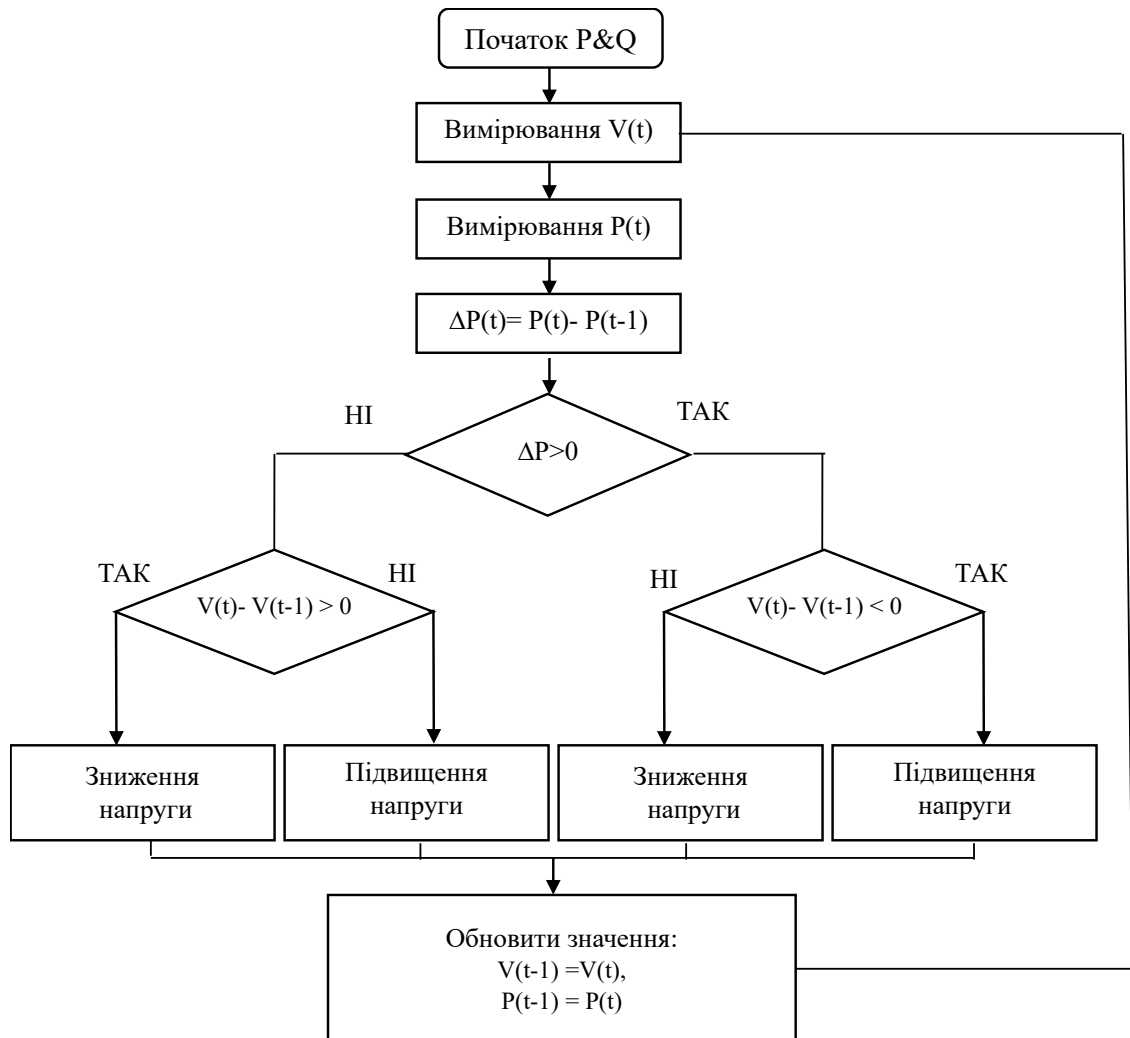


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритму збурення та спостереження

Стверджується, що метод Р&О має повільну динамічну характеристику і високу похибку в усталеному режимі. Насправді, динамічна характеристика є низькою, коли використовується мале значення приросту і низька частота дискретизації. Для зменшення похибки в усталеному режимі необхідні малі прирости, оскільки Р&О завжди змушує робочу точку коливатися біля ТМП, а не біля ТМП. При меншому прирості робоча точка буде ближче до масиву ТМП ТМП завжди змушує робочу точку коливатися поблизу ТМП, але ніколи точно на ТМП. Чим менший крок, тим ближче система буде до масиву ТМП. У

випадку більшого кроку, алгоритм працюватиме швидше, але похибка усталеного режиму буде збільшена. Невеликі кроки мають тенденцію робити алгоритм більш стабільним і точним при зміні умов роботи фотоелектричної системи. У разі великих кроків алгоритм стає заплутаним, оскільки реакція перетворювача на великі коливання напруги або струму спричинить коливання, перерегулювання та час усталення самого перетворювача заплутують алгоритм [25].

2.2.2.2 Інкрементна провідність

Метод інкрементної провідності може перевантажити проблеми відстеження пікової потужності при швидкій зміні атмосферних умов [25].

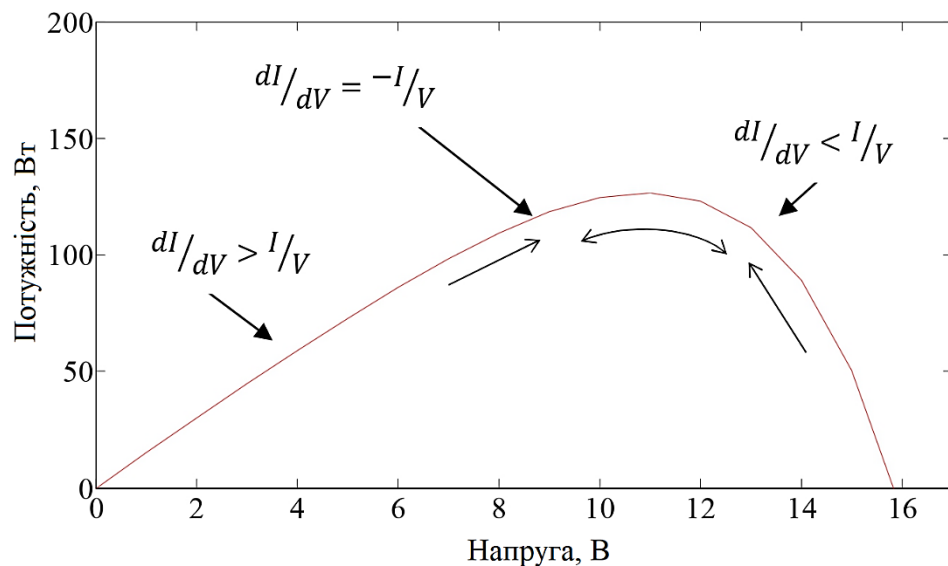


Рисунок 2.5 – Алгоритм інкрементної провідності

Алгоритм використовує рівняння

$$P = V \cdot I \quad (2.12)$$

де

P – потужність модуля;

V – напруга модуля;

I – струм модуля.

Диференціювання щодо dV

$$\frac{dP}{dV} = I + \frac{dI}{dV} \quad (2.13)$$

Алгоритм працює в залежності від цього рівняння.

У точці пікової потужності

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{dI}{dV} = -I/V \quad (2.15)$$

Якщо робоча точка знаходиться праворуч від кривої потужності, то маємо

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{dI}{dV} < -I/V \quad (2.17)$$

Якщо робоча точка знаходиться зліва від кривої потужності, то маємо

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{dI}{dV} > -I/V \quad (2.19)$$

Алгоритм працює за допомогою рівнянь (2.15), (2.17) та (2.18).

Коли інкрементна провідність вирішує, що точка максимальної потужності досягла максимальної потужності, вона припиняє збурення робочої точки. Якщо ця умова не виконується, напрямок робочої точки МП можна обчислити за допомогою співвідношення $\frac{dI}{dV}$ та $-I/V$. Ця залежність впливає з того факту, що коли ТМП знаходиться праворуч від МП, то $\frac{dP}{dV}$ є від'ємним і додатним, коли вона знаходиться зліва від МП.

Цей алгоритм має переваги над методом збурення і спостереження в тому, що він може визначити, коли ТМП досягне МП, де збурення і спостереження коливається навколо МП. Крім того, цей алгоритм може відстежувати швидке збільшення та зменшення освітленості з більшою точністю, ніж метод збурювання та спостереження. Недоліком цього алгоритму є підвищена складність порівняно з методом "збурювання і спостереження".

2.2.2.3 Паразитні ємності

Покращення інкрементної провідності призводить до методу паразитних ємностей, який враховує паразитні ємності сонячних елементів. Цей метод використовує пульсації перемикання ТМП, які допомагають збурювати масив. Вимірюється середня пульсація напруги та потужності фотоелектричного масиву, що генерується частотою перемикання за допомогою серії фільтрів і множників, а потім використовується для розрахунку провідності масиву. Потім алгоритм визначає напрямок руху робочої точки МП. У цього алгоритму є один недолік – паразитна ємність в кожному модулі дуже мала, і він може добре працювати у великих фотоелектричних масивах, де кілька фотоелектричних модулів з'єднані паралельно. У DC-DC перетворювачі є великий вхідний конденсатор, який відфільтровує невеликі пульсації в потужності масиву. Цей конденсатор може покрити загальний вплив паразитної ємності фотоелектричної батареї [25].

2.2.2.4 Точковий трекер максимальної потужності з контролем напруги

Вважається, що точка максимальної потужності (ТМП) фотоелектричного модуля лежить приблизно в 0,75 рази вище напруги холостого ходу модуля. Таким чином, шляхом розрахунку напруги холостого ходу можна отримати опорну напругу, а потім реалізувати схему керування напругою прямого зв'язку, щоб довести напругу сонячного фотоелектричного модуля до точки максимальної потужності. Труднощі, пов'язані з цією методикою, полягають у тому, що напруга холостого ходу змінюється залежно від температури. Оскільки підвищення температури призводить до зміни напруги відкритого контуру модуля, необхідно часто розраховувати напругу відкритого контуру модуля. У цьому процесі навантаження повинно бути відключено від модуля,

щоб виміряти напругу холостого ходу. Таким чином, потужність в цей момент не може бути використана [26].

2.2.2.5 Точковий трекер максимальної потужності з контролем струму

Пікова потужність модуля знаходиться в точці, яка приблизно в 0,9 разів перевищує струм короткого замикання модуля. Для вимірювання цієї точки модуль необхідно замкнути накоротко. Після цього струм модуля регулюється до значення, яке приблизно в 0,9 разів перевищує струм короткого замикання, за допомогою регулятора режиму струму. У цьому випадку потрібен потужний резистор, який може витримати струм короткого замикання. У цьому полягає проблема цього алгоритму. Для вимірювання струму короткого замикання модуль повинен бути замкнений накоротко, оскільки він змінюється залежно від зміни рівня опромінення [26].

2.3 Акумуляторна батарея

У нашому сучасному суспільстві роль батарей як енергоносіїв є важливою, адже їх присутність у пристроях для повсякденного використання. Наприкінці 20^{-го} століття попит на батареї стрімко зріс через великий інтерес до бездротових пристроїв. Сьогодні акумуляторна промисловість відноситься до категорії великомасштабних галузей, які виробляють кілька мільйонів батарей на місяць. Підвищення енергетичної ємності є одним з основних питань розвитку, однак для споживчих товарів безпека, ймовірно, сьогодні вважається не менш важливою. З появою на ринку гібридних електромобілів відбувається технологічний розвиток у сфері акумуляторів, що призводить до зменшення споживання пального та викидів газів. Розробка акумуляторів є важливим завданням як для промисловості, так і для академічних досліджень.

Батарея моделюється як нелінійне джерело напруги, вихідна напруга якого залежить не тільки від струму, але й від стану заряду батареї (СЗБ), який є нелінійною функцією струму і часу [27]. На рис. 2.6 представлена базова модель акумулятора.

Два параметри, що відображають стан акумулятора, тобто напругу на клеммах і рівень заряду, можна записати у вигляді:

$$V_b = V_0 + R_b i_b - K \frac{Q}{Q - \int i_b dt} + A \cdot \exp B \int i_b dt \quad (2.20)$$

$$SOC = 100 \left(1 + \frac{\int i_b dt}{Q} \right) \quad (2.21)$$

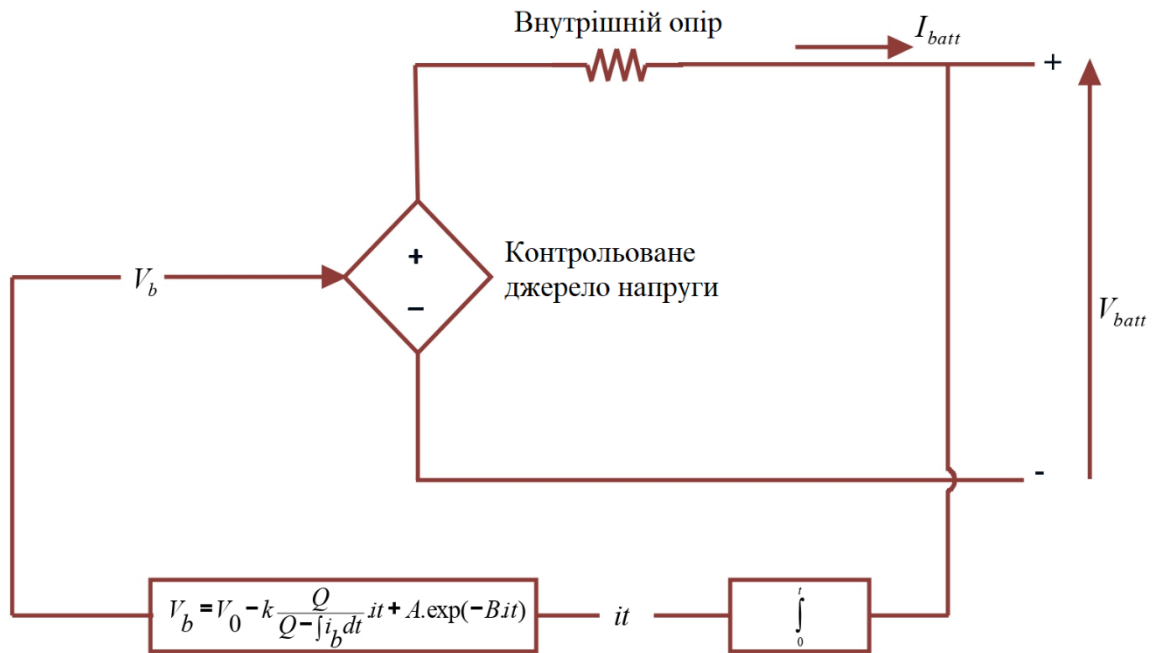


Рисунок 2.6 – Модель акумулятора

Оригінальна модель Шепарда має нелінійний член, що $K \frac{Q}{Q - \int i_b dt}$. Цей член являє собою нелінійну напругу, яка змінюється залежно від амплітуди струму і фактичного заряду акумулятора. Отже, коли батарея повністю розряджена і струм не протікає, напруга батареї буде майже нульовою. Як тільки струм знову починає циркулювати, напруга різко падає. Ця модель дає точні результати, а також відображає поведінку акумулятора.

2.4 Вітрогенератори

Використовуючи силу вітру, вітрогенератори виробляють електроенергію для приводу електричного генератора. Зазвичай вітер проходить над лопатями, створюючи підйомну силу і прикладаючи обертальну силу. У середині гондоли лопаті обертають вал, який потім потрапляє в редуктор. Редуктор допомагає збільшити швидкість обертання для роботи генератора і використовує магнітні поля для перетворення енергії обертання в електричну енергію. Потім вихідна електрична енергія надходить до трансформатора, який перетворює електроенергію у відповідну напругу для системи збору електроенергії. Вітрогенератор видобуває кінетичну енергію з площі, яку охоплюють лопаті.

Потужність, що міститься у вітрі, визначається кінетичною енергією потоку повітряної маси за одиницю часу [28]. Тоді рівняння для потужності, що міститься у вітрі, можна записати як

$$P_{\text{повітря}} = \frac{1}{2} \text{ одиниця часу } V_{\infty}^2 = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \quad (2.22)$$

Хоча рівняння (2.22) описує наявність енергії вітру, потужність, що передається на ротор вітрогенератора, зменшується на коефіцієнт потужності C_p .

$$C_p = \frac{P_{\text{вітрогенератор}}}{P_{\text{повітря}}} \quad (2.23)$$

Максимальне значення C_p визначається межею Беца, яка стверджує, що турбіна ніколи не може витягти більше 59,3% енергії з повітряного потоку. В реальності ротори вітрогенераторів мають максимальні значення C_p в діапазоні 25-45%.

$$P_{\text{вітрогенератор}} = C_p \cdot P_{\text{повітря}} \quad (2.24)$$

Також прийнято визначати коефіцієнт швидкості наконечника λ як

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (2.25)$$

Асинхронна машина є найпоширенішою машиною в наші дні. Асинхронна машина може використовуватися як генератор або двигун. Хоча попит на двигуни є меншим через механічний знос контактних кілець, вони набули популярності як генератори на вітрових та водних електростанціях через їхню очевидну придатність до використання та характер тягового зусилля.

2.5 Математичне моделювання асинхронного двигуна в режимі генератора

DFIG – це асинхронна машина з намотаним ротором, її статор складається з рами статора, осердя статора, поліфазної (3-фазної) розподіленої обмотки, двох торцевих кришок, підшипника тощо. Осердя статора являє собою набір циліндричних сталевих пластин, які мають пази по внутрішній периферії для розміщення 3-фазної обмотки. Ротор складається з пазів на зовнішній периферії для розміщення обмоток, як і статор. Машина працює за принципом електромагнітної індукції, а передача енергії відбувається за допомогою передавальної дії. Таким чином, машину можна уявити як трансформатор, який обертається, а не стоїть на місці. У цьому розділі пояснюється базове математичне моделювання DFIG. У цьому розділі пояснюється моделювання машини з урахуванням двох фазних параметрів.

2.5.1 Моделювання DFIG

На рис. 2.7 і 2.8 показано еквівалентну електричну схему асинхронної машини. На цьому рисунку машина позначена як двофазна машина.

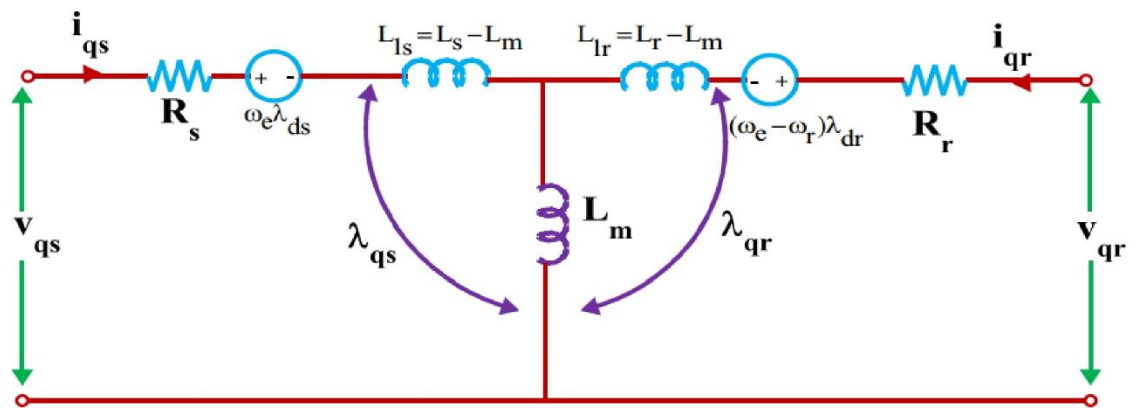


Рисунок 2.7 – Динамічна d-q еквівалентна схема DFIG (схема по осі q)

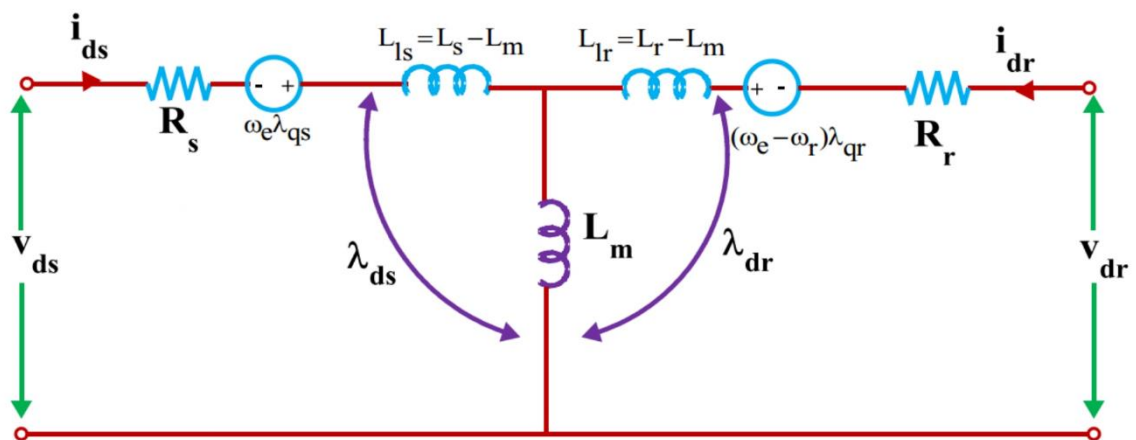


Рисунок 2.8 – Динамічна d-q еквівалентна схема DFIG (схема по осі d)

Рівняння для кола статора можна записати у вигляді

$$v_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^s \quad (2.26)$$

$$v_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^s \quad (2.27)$$

У d-q системі координат рівняння (2.26) і (2.27) можна записати [28] як

$$v_{qs} = R_s i_{qs} \frac{d}{dt} \lambda_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (2.28)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} \frac{d}{dt} \lambda_{ds} + \omega_e \lambda_{qs} \quad (2.29)$$

Де всі змінні знаходяться в рамі, що синхронно обертається. Члени в дужках вказують на зворотну е.р.с. або е.р.с. швидкості, або зустрічну е.р.с., зумовлену обертанням осей, як у випадку машин постійного струму. Коли кутова швидкість ω_e дорівнює нулю, швидкість е.р.с., обумовлена осями d і q,

дорівнює нулю, і рівняння набувають стаціонарної форми. Якщо ротор заблокований або не рухається, тобто $\omega_r = 0$, рівняння машини можна записати у вигляді

$$v_{qr} = R_r i_{qr} \frac{d}{dt} \lambda_{qr} + \omega_e \lambda_{dr} \quad (2.30)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} \frac{d}{dt} \lambda_{dr} - \omega_e \lambda_{qr} \quad (2.31)$$

Нехай ротор обертається з кутовою швидкістю ω_r тоді осі d-q, фіктивно закріплені на роторі, будуть рухатися з відносною швидкістю $\omega_e - \omega_r$ до синхронно обертової рамки.

Підставивши $\omega_e - \omega_r$ замість ω_e , рівняння ротора d-q рамки можна записати у вигляді

$$v_{qr} = R_r i_{qr} \frac{d}{dt} \lambda_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2.32)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} \frac{d}{dt} \lambda_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2.33)$$

Вирази зв'язку потоку в термінах струму можна записати з рис. 2.7 і 2.8 наступним чином:

$$\lambda_{qs} = L_{1s} i_{qs} + L_m i_{qs} + i_{qr} = L_m i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.34)$$

$$\lambda_{ds} = L_{1s} i_{ds} + L_m i_{ds} + i_{dr} = L_m i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.35)$$

$$\lambda_{qr} = L_{1r} i_{qr} + L_m i_{qs} + i_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.36)$$

$$\lambda_{dr} = L_{1r} i_{dr} + L_m i_{ds} + i_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.37)$$

$$\lambda_{qm} = L_m i_{qs} + i_{qr} \quad (2.38)$$

$$\lambda_{dm} = L_m i_{ds} + i_{dr} \quad (2.39)$$

Рівняння (2.26) – (2.39) описують повне електричне моделювання DFIG. Тоді як рівняння (2.39) виражають зв'язки механічних параметрів, які є важливою частиною моделювання.

У наведених вище рівняннях електричну швидкість ω_r не можна розглядати як константу. Вона може бути пов'язана з обертовим моментом як

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = T_L + \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{2}{P} B\omega_r \quad (2.40)$$

2.5.2 Динамічне моделювання DFIG

Динамічне моделювання у вигляді простору станів необхідне для проведення симуляції за допомогою різних інструментів, таких як MATLAB. Базова форма простору станів допомагає аналізувати систему в перехідному стані.

У системі DFIG змінними стану зазвичай є струми, потоки тощо. У наступному розділі рівняння простору стану для DFIG у синхронно обертовому каркасі виводяться зі зв'язками потоків як змінних стану. Оскільки параметри машини та енергетичної системи майже завжди задаються в омах, відсотках або на одиницю базового опору, доцільно виразити рівняння зв'язку напруги та потоку через реактивності, а не індуктивності. Наведені вище рівняння напруги та потоку можуть бути представлені наступним чином:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (2.41)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (2.42)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr} \quad (2.43)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr} \quad (2.44)$$

Рівняння, пов'язані зі зв'язком потоку, тобто рівняння (2.34)-(2.39), можна записати в термінах реактивностей наступним чином:

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_m i_{qs} + i_{qr} \quad (2.45)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_m i_{ds} + i_{dr} \quad (2.46)$$

$$\psi_{qr} = X_{lr} i_{qr} + X_m i_{qs} + i_{qr} \quad (2.47)$$

$$\psi_{dr} = X_{lr} i_{dr} + X_m i_{ds} + i_{dr} \quad (2.48)$$

$$\psi_{qm} = X_m i_{qs} + i_{qr} \quad (2.49)$$

$$\psi_{dm} = X_m i_{ds} + i_{dr} \quad (2.50)$$

Де реактивності (X_{ls} , X_{lr} , X_m) знаходяться множенням базової частоти ω_b на індуктивності (L_{ls} , L_{lr} , L_m)

З рівнянь (2.45)-(2.50) можна знайти вирази для струмів через потокові зв'язки, а також взаємні потокові зв'язки ψ_{qm} , ψ_{dm} , використовуючи вирази для струмів.

Рівняння мають наступний вигляд [28].

$$i_{qs} = \frac{\psi_{qs} - \psi_{qm}}{X_{ls}} \quad (2.51)$$

$$i_{qr} = \frac{\psi_{qr} - \psi_{qm}}{X_{lr}} \quad (2.52)$$

$$i_{ds} = \frac{\psi_{ds} - \psi_{dm}}{X_{ls}} \quad (2.53)$$

$$i_{dr} = \frac{\psi_{dr} - \psi_{dm}}{X_{lr}} \quad (2.54)$$

Підставивши рівняння (2.51)-(2.54) в (2.49)-(2.50), отримаємо

$$\begin{aligned}
\psi_{qm} &= X_m \left\{ \frac{\psi_{qs} - \psi_{qm}}{X_{1s}} + \frac{\psi_{qr} - \psi_{qm}}{X_{1r}} \right\} \\
\Rightarrow \psi_{qm} &= \frac{X_m}{X_{1s}} \psi_{qs} - \frac{X_m}{X_{1s}} \psi_{qm} + \frac{X_m}{X_{1r}} \psi_{qr} - \frac{X_m}{X_{1r}} \psi_{qm} \\
\Rightarrow \psi_{qm} + \frac{X_m}{X_{1s}} \psi_{qm} + \frac{X_m}{X_{1r}} \psi_{qm} &= \frac{X_m}{X_{1s}} \psi_{qs} + \frac{X_m}{X_{1r}} \psi_{qr} \\
\Rightarrow \psi_{qm} \left(1 + \frac{X_m}{X_{1s}} + \frac{X_m}{X_{1r}} \right) &= \frac{X_m}{X_{1s}} \psi_{qs} + \frac{X_m}{X_{1r}} \psi_{qr} \\
\Rightarrow \psi_{qm} \left(\frac{X_{1s} X_r + X_m X_{1r} + X_m X_{1s}}{X_{1s} X_{1r}} \right) &= \frac{X_m}{X_{1s}} \psi_{qs} + \frac{X_m}{X_{1r}} \psi_{qr} \\
\Rightarrow \psi_{qm} X_m \left(\frac{X_{1s} X_r + X_m X_{1r} + X_m X_{1s}}{X_{1s} X_{1r} X_m} \right) &= \frac{X_m}{X_{1s}} \psi_{qs} + \frac{X_m}{X_{1r}} \psi_{qr} \\
\Rightarrow \psi_{qm} \frac{X_m}{X_{eq}} &= \frac{X_m}{X_{1s}} \psi_{qs} + \frac{X_m}{X_{1r}} \psi_{qr} \\
\Rightarrow \psi_{qm} &= \frac{X_{eq}}{X_{1s}} \psi_{qs} + \frac{X_{eq}}{X_{1r}} \psi_{qr} \\
\psi_{qm} &= \frac{X_{eq}}{X_{1s}} \psi_{qs} + \frac{X_{eq}}{X_{1r}} \psi_{qr}
\end{aligned} \tag{2.55}$$

Аналогічно можна знайти значення ψ_{dm} наступним чином

$$\psi_{dm} = \frac{X_{eq}}{X_{1s}} \psi_{ds} + \frac{X_{eq}}{X_{1r}} \psi_{dr} \tag{2.56}$$

Підставивши рівняння струму з (2.51)-(2.54) у рівняння напруги (2.41)-(2.44), отримаємо,

$$v_{qs} = \frac{R_s}{X_{1s}} \psi_{qs} - \psi_{qm} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} \tag{2.57}$$

$$v_{ds} = \frac{R_s}{X_{1s}} \psi_{ds} - \psi_{dm} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} \tag{2.58}$$

$$v_{qr} = \frac{R_s}{X_{1r}} \psi_{qr} - \psi_{qm} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr} \tag{2.59}$$

$$v_{dr} = \frac{R_s}{X_{1r}} \psi_{dr} - \psi_{dm} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr} \tag{2.60}$$

Змінні стану можуть бути виражені за допомогою наведених вище рівнянь наступним чином

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = \omega_b \left\{ v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{R_s}{X_{ls}} \psi_{qs} - \psi_{qm} \right\} \quad (2.61)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = \omega_b \left\{ v_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} - \frac{R_s}{X_{ls}} \psi_{ds} - \psi_{dm} \right\} \quad (2.62)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = \omega_b \left\{ v_{qr} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr} - \frac{R_r}{X_{lr}} \psi_{qr} - \psi_{qm} \right\} \quad (2.63)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = \omega_b \left\{ v_{dr} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr} - \frac{R_r}{X_{lr}} \psi_{dr} - \psi_{dm} \right\} \quad (2.64)$$

Матриця простору станів може бути записана наступним чином

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_{qs} \\ \dot{\psi}_{ds} \\ \dot{\psi}_{qr} \\ \dot{\psi}_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{X_{ls}} & -\frac{\omega_e}{\omega_b} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_e}{\omega_b} & -\frac{R_s}{X_{ls}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_r}{X_{lr}} & -\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \\ 0 & 0 & \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} & -\frac{R_r}{X_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_s}{X_{ls}} & 0 \\ 0 & \frac{R_s}{X_{ls}} \\ \frac{R_r}{X_{lr}} & 0 \\ 0 & \frac{R_r}{X_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qm} \\ \psi_{dm} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Електрорушійний момент розвивається за рахунок взаємодії потоку повітряного зазору та ЕРС ротора. На синхронній швидкості ротор не може рухатися і, як наслідок, не виникає індукованої ЕРС, а також струму, отже, крутний момент дорівнює нулю, але на будь-якій швидкості, відмінній від синхронної, машина буде відчувати крутний момент, як у випадку з двигуном, де, як і у випадку з генератором, електричний крутний момент з точки зору механічного забезпечується за допомогою основного рушія, яким в даному випадку є вітер.

Крутний момент може бути представлений в термінах потокозчеплення і

$$\begin{aligned}
 T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} \\
 &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr} \\
 &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr}
 \end{aligned} \tag{2.66}$$

Рівняння (2.66) можна записати в термінах змінних стану наступним чином

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_b} \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_b} \psi_{dr} i_{qr} - \psi_{qr} i_{dr} \tag{2.67}$$

Рівняння (2.61)-(2.67) описують повну модель DFIG у вигляді простору станів, де $\psi_{qs}, \psi_{ds}, \psi_{qr}, \psi_{dr}$ - змінні стану.

Параметри, використані для моделювання асинхронного генератора, наведені в таблиці 2.2 [20].

Таблиця 2.2 – Параметри для DFIG

Символ	Значення
$P_{ном}$	50 кВт
$V_{ном}$	400 В
R_s	0,00706 в.о.
L_s	0,171 в.о.
R_r	0,005 в.о.
L_r	0,156 в.о.
L_m	2,9 в.о.
J	3,1 кг·м ²
n_p	6
$V_{dc_ном}$	800 В
P_m	45 кВт

2.6 Висновки до розділу

1. Узагальнено результати моделювання фотоелектричної панелі з використанням алгоритму відстеження точки максимальної потужності.
2. Представлено різні алгоритми ТМП для дослідження фотоелектричної батареї з метою відстеження максимальної потужності за різних умов сонячного випромінювання та температури.
3. Описано модель батареї для моделювання мікромережі.
4. Визначено роль вітрогенератора в роботі мікромережі.
5. Проаналізовано детальне моделювання асинхронної машини в режимі генератора з подвійним живленням (DFIG).

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розробка мікромережі змінного/постійного струму

Концепція мікромережі розглядається як сукупність навантажень і мікроджерел, яка функціонує як єдина керована система, що забезпечує електроенергією і теплом свою локальну територію. Ця ідея пропонує нову парадигму для визначення роботи розподіленої генерації. Для комунальних служб мікромережу можна розглядати як контрольовану комірку енергосистеми. Наприклад, ця комірка може бути виміряна як єдине навантаження, здатне до диспетчеризації, яке може реагувати за лічені секунди, щоб задовольнити вимоги системи передачі. Для замовника мікромережа може бути спланована таким чином, щоб задовольнити його особливі вимоги, такі як підвищення локальної надійності, зменшення втрат у фідері, підтримка локальної напруги, підвищення ефективності за рахунок використання відпрацьованого тепла, корекція просідання напруги. Основна мета цієї концепції – прискорити визнання переваг, які надають малі розподілені генератори, наприклад, можливість постачати відпрацьоване тепло під час потреби. Мікромережа або підсистема розподільчої мережі створить менше проблем для комунальної мережі, ніж звичайна мікрогенерація, якщо існує належна та розумна координація мікрогенерації та навантажень. Мікромережа вважається "дружнім до мережі об'єктом" і не чинить небажаного впливу на приєднану розподільчу мережу, тобто політика експлуатації розподільчої мережі не повинна бути змінена.

Конфігурація гібридної системи показана на рис. 3.1, де різні джерела змінного і постійного струму та навантаження підключені до відповідних мереж змінного і постійного струму. Кола змінного і постійного струму з'єднані між собою за допомогою двох трансформаторів і двох двонаправлених трифазних перетворювачів. Шина змінного струму гібридної мережі підключена до електромережі.

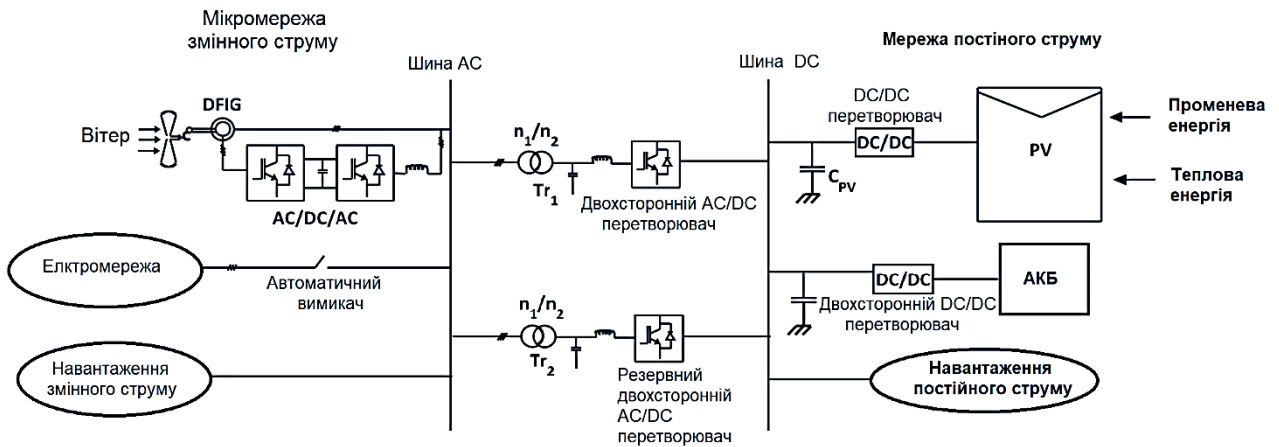


Рисунок 3.1 – Гібридна система мікромереж змінного/постійного струму

На рис. 3.2 показано конфігурацію гібридної системи, яка складається з мережі змінного та постійного струму. Мережі змінного і постійного струму мають відповідні джерела, навантаження і накопичувачі енергії та з'єднані між собою за допомогою трифазного перетворювача. Шина змінного струму підключена до електромережі через трансформатор і автоматичний вимикач.

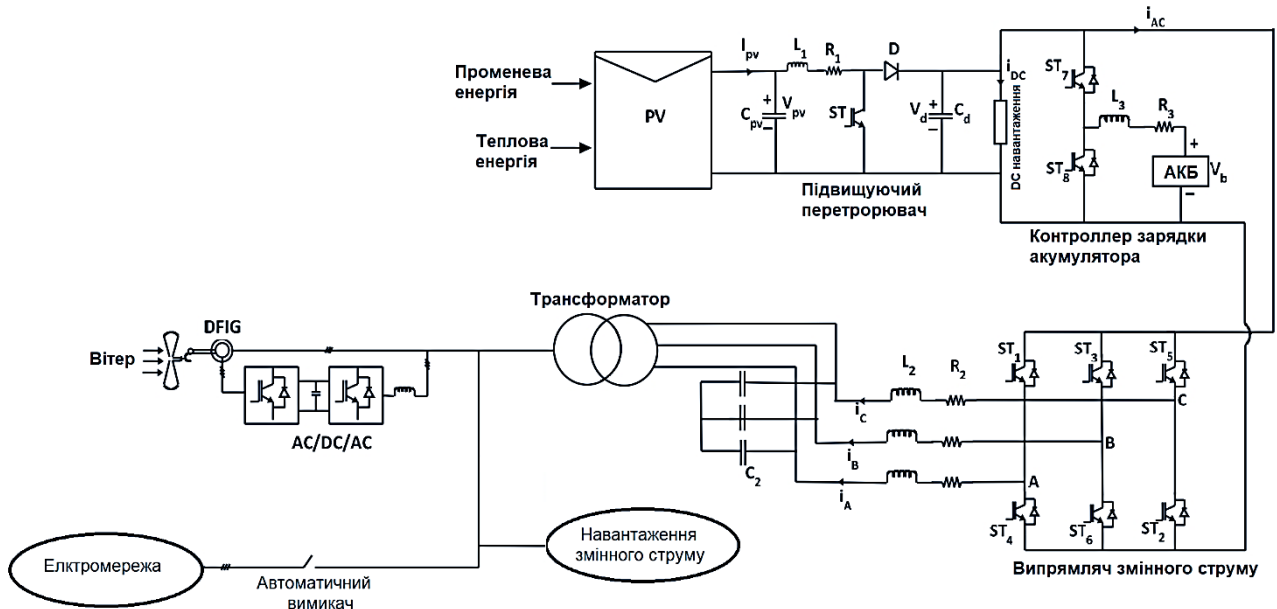


Рисунок 3.2 – Представлення гібридної мікромережі

У запропонованій системі фотоелектричні модулі підключені до шини постійного струму через підвищувальний перетворювач для імітації джерел постійного струму. Система вітрогенерації DFIG підключена до шини змінного

струму для імітації джерел змінного струму. Акумулятор з двонаправленим DC/DC перетворювачем підключений до шин постійного струму як накопичувач енергії. Змінне навантаження постійного та змінного струму підключено до шин постійного та змінного струму для імітації різних навантажень.

Фотомодулі з'єднуються послідовно і паралельно. Зі зміною рівня сонячного випромінювання та температури навколишнього середовища змінюється вихідна потужність сонячної панелі. Конденсатор C_{pv} додається до фотоелектричної клема для придушення високочастотних пульсацій вихідної напруги фотоелектричних модулів. Двонаправлений DC/DC перетворювач призначений для підтримки стабільної напруги на шині постійного струму під час заряджання або розряджання акумулятора, коли система працює в автономному режимі. Три перетворювача (підвищувальний, основний і двонаправлений) мають спільну шину постійного струму. Система вітрогенерації складається з асинхронного генератора з подвійним живленням (DFIG) і з'єданого з ним ШІМ-перетворювача змінного/постійного/перемінного струму, з'єданого між ротором через контактні кільця і шиною змінного струму. Шини змінного і постійного струму з'єднані через трифазний трансформатор і головний двонаправлений перетворювач потоку потужності для обміну енергією між сторонами постійного і змінного струму. Трансформатор допомагає підвищити напругу змінного струму головного перетворювача до рівня напруги мережі та ізолювати мережі змінного та постійного струму.

Параметри, що використовуються для моделювання гібридної мережі, наведені в таблиці 3.1 [20].

За допомогою середовища MATLAB/SIMULINK змодельовано гібридну мікромережу, параметри якої наведено в таблиці 3.1. Робота виконується для режиму підключення до мережі. Разом з гібридною мікромережею проаналізовано роботу асинхронного генератора з подвійним живленням, фотоелектричної системи. Для дослідження гібридної мікромережі також

враховується сонячне випромінювання, температура елементів і швидкість вітру. Аналіз продуктивності виконано з використанням результатів моделювання, отриманих за допомогою MATLAB.

Таблиця 3.1 - Параметри компонентів гібридної мережі

Символ	Значення
C_{pv}	110 мкФ
L_i	2,5 мГн
C_d	4700 мкФ
L_2	0,43 мГн
R_2	0,3 Ом
C_2	60 мкФ
L_3	3 мГн
R_3	0,1 Ом
f	50 Гц
f_s	10 кГц
V_d	400 В
V_{AC_rms}	400 В

3.2 Моделювання фотоелектричного масиву

На рис. 3.3 – 3.8 представлені I-V, P-V, P-I характеристики при зміні температури та сонячного випромінювання. З рисунків помітна нелінійна природа фотоелемента, тобто вихідний струм і потужність фотоелемента залежать від робочої напруги на клеммах фотоелемента і температури, а також від сонячного випромінювання.

З рис. 3.3 і 3.4 видно, що зі збільшенням робочої температури фотоелектричного масиву, вихідний струм збільшується, тоді як максимальна вихідна потужність зменшується. Оскільки збільшення вихідного струму

набагато менше, ніж зменшення напруги, загальна потужність зменшується при високих температурах.

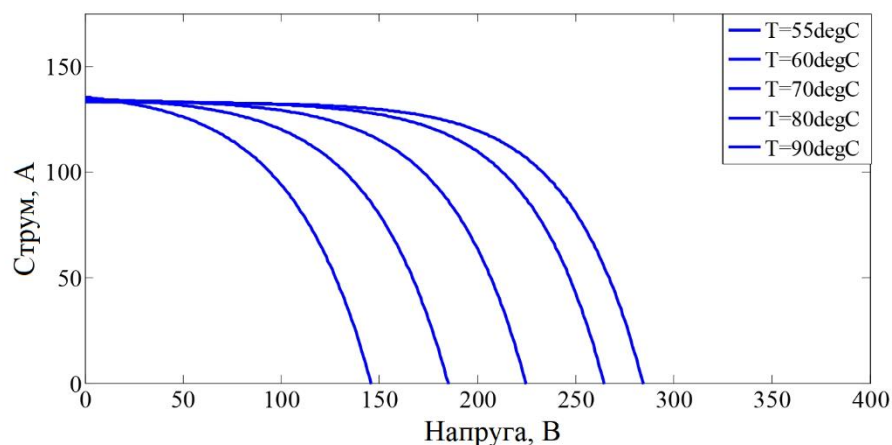


Рисунок 3.3 – I-V вихідні характеристики фотоелектричного масиву для різних температур

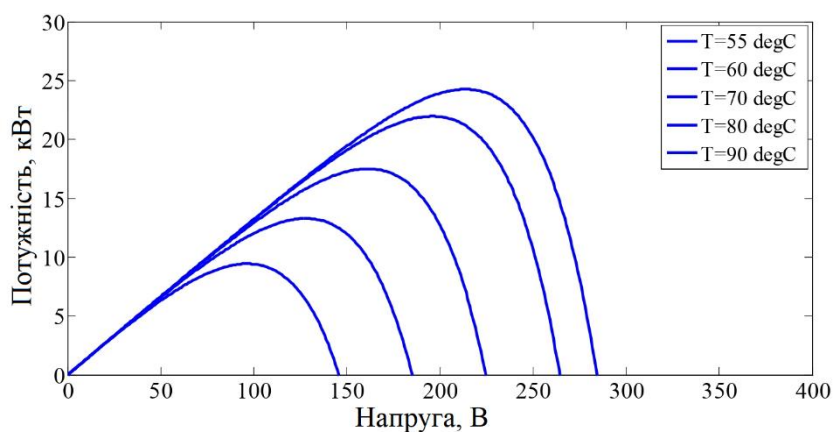


Рисунок 3.4 – P-V вихідні характеристики фотоелектричного масиву для різних температур

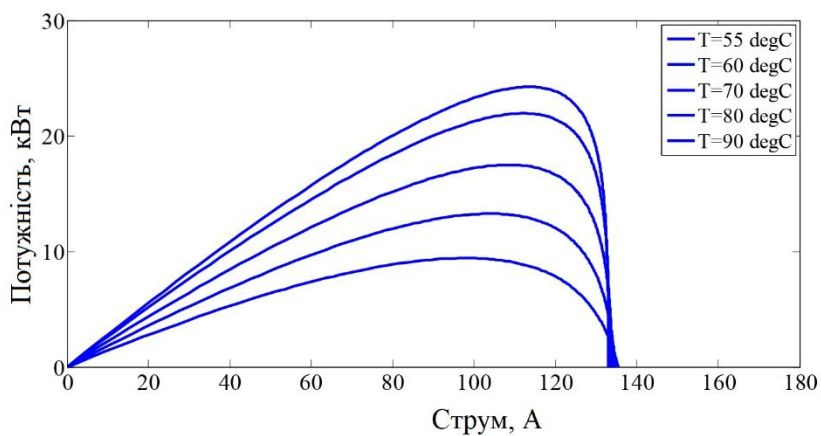


Рисунок 3.5 – P-I вихідні характеристики фотоелектричного масиву для різних температур

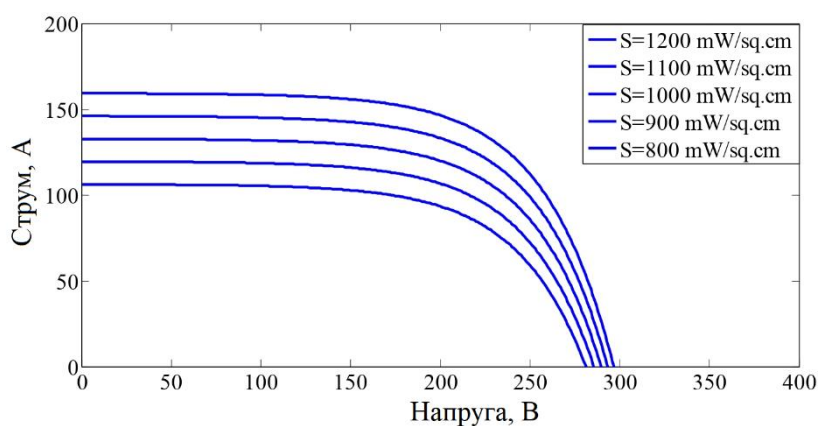


Рисунок 3.6 – I-V вихідні характеристики фотоелектричного масиву для різних рівнів освітленості

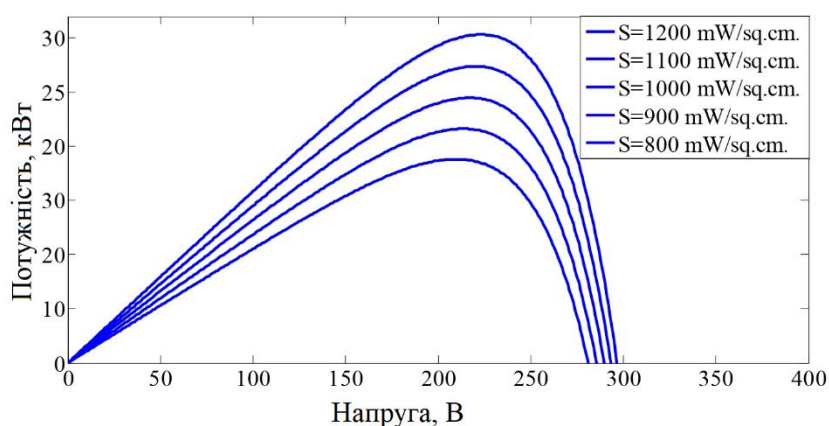


Рисунок 3.7 – P-V вихідні характеристики фотоелектричного масиву для різних рівнів освітленості

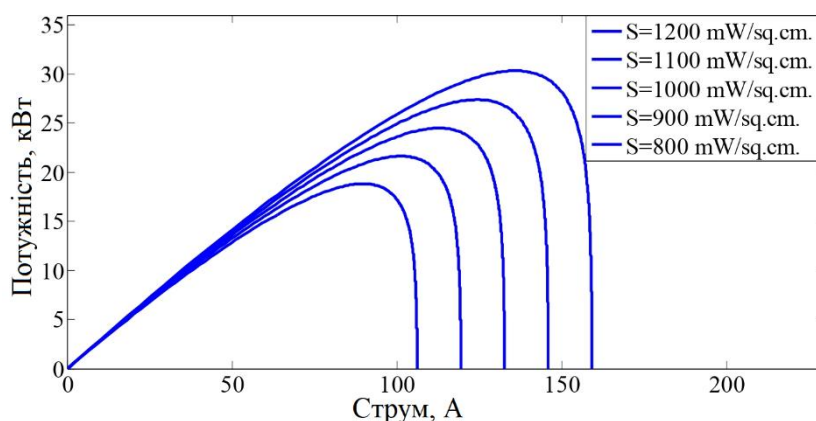


Рисунок 3.8 – P-I характеристики фотоелектричного масиву для різних рівнів освітленості

З рис. 3.6 і 3.7 видно, що зі збільшенням сонячного випромінювання зростає вихідний струм фотомодуля, а також максимальна вихідна потужність. Причиною цього є те, що напруга холостого ходу логарифмічно залежить від

сонячного випромінювання, проте струм короткого замикання прямо пропорційний інтенсивності випромінювання.

3.3 Моделювання асинхронного генератора з подвійним живленням

Залежність швидкості вітру, трифазної напруги статора і трифазної напруги ротора показано на рис. 3.9 – 3.11. Тут значення швидкості вітру змінюється від 1,0 до 1,05 в.о., що є необхідним для дослідження продуктивності асинхронного генератора з подвійним живленням. Міжфазна напруга статора встановлена на рівні 300 В, тоді як значення напруги ротора становить 150 В.

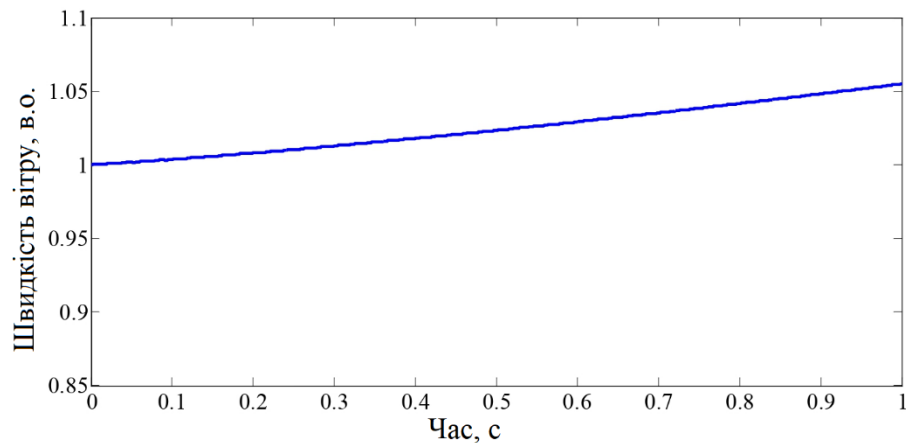


Рисунок 3.9 – Реакція на швидкість вітру

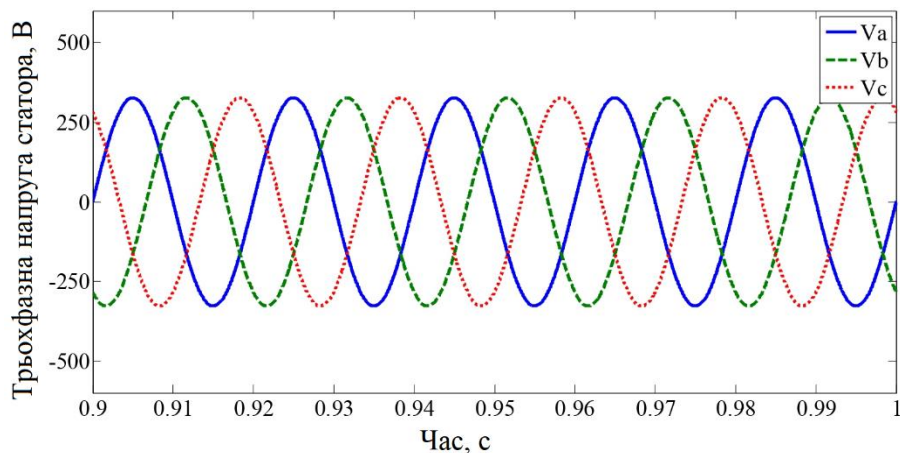


Рисунок 3.10 – Трифазна напруга статора

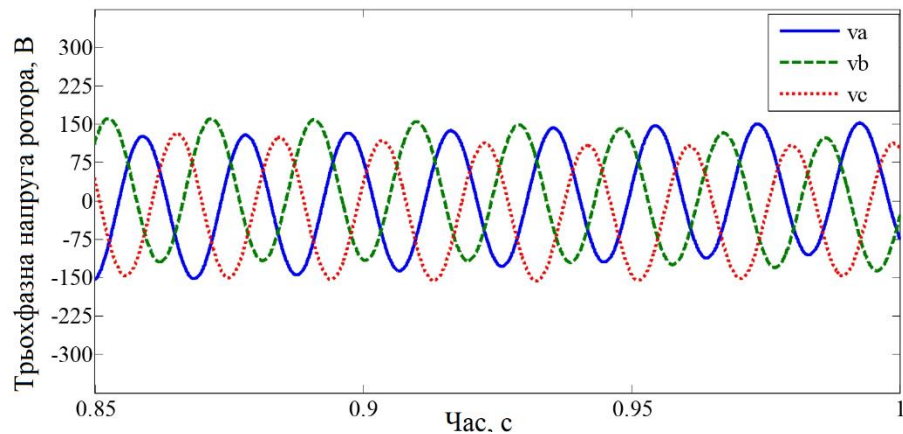


Рисунок 3.11 – Трифазна напруга ротора

3.4 Результати моделювання гібридної мережі

Різні характеристики гібридної мікромережі представлені на рис. 3.12 – 3.27. Тут мікромережа працює в режимі прив'язки до мережі. У цьому режимі головний перетворювач працює в режимі PQ, а потужність балансується за рахунок електромережі. Акумулятор повністю заряджений. Напруга на шині змінного струму підтримується електромережею, а напруга на шині постійного струму підтримується головним перетворювачем.

На рис. 3.12 показана крива рівня сонячного випромінювання, значення якого встановлюється на рівні 950 Вт/м^2 від $0,0\text{с}$ до $0,1\text{с}$, лінійно зростає до 1300 Вт/м^2 від $0,1\text{с}$ до $0,2\text{с}$, залишається постійним від $0,3\text{с}$ до $0,4\text{с}$, зменшується до 950 Вт/м^2 і зберігає це значення до 1с . На рис. 3.13 – 3.15 показані вихідна напруга, струм і потужність по відношенню до сонячного випромінювання. Вихідна потужність фотоелектричної панелі змінюється від $11,25 \text{ кВт}$ до 13 кВт , що точно відповідає сонячному випромінюванню при фіксованій температурі навколишнього середовища.

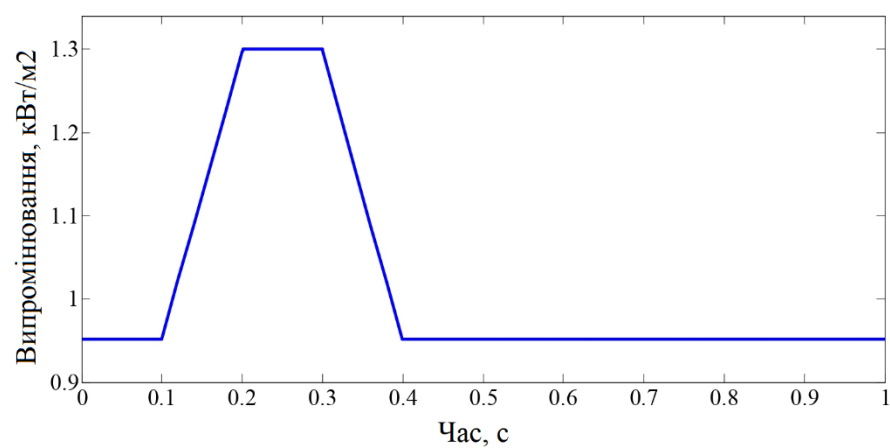


Рисунок 3.12 – Сигнал опромінення фотоелектричної батареї

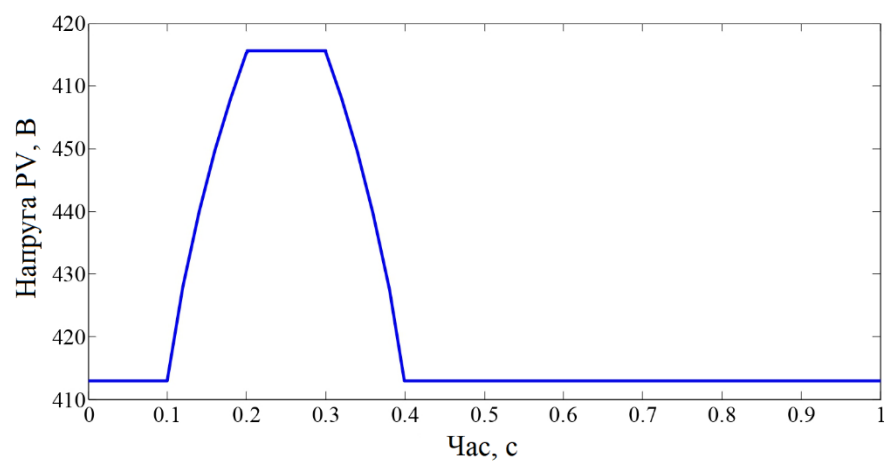


Рисунок 3.13 – Вихідна напруга фотоелектричної батареї

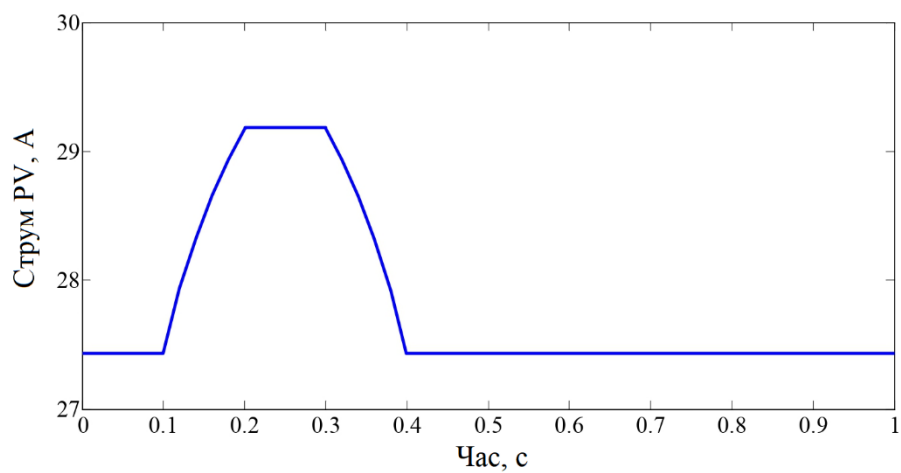


Рисунок 3.14 – Вихідний струм фотоелектричної батареї

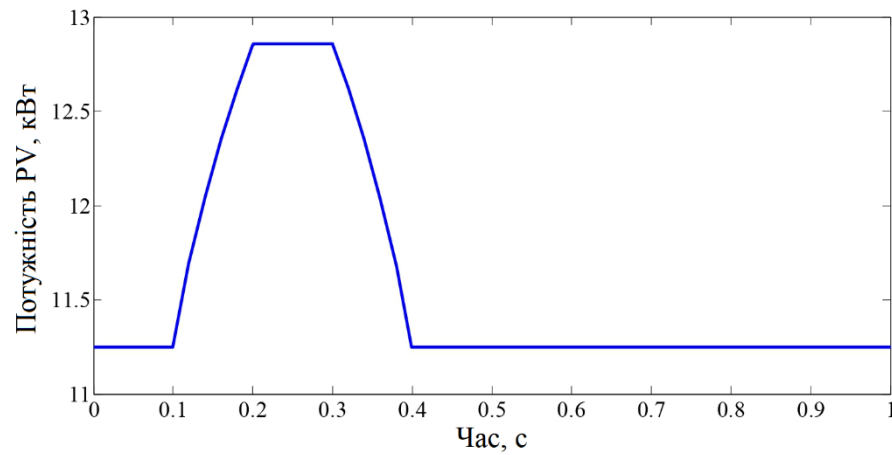


Рисунок 3.15 – Вихідна потужність фотоелектричної батареї

На рис. 3.16 показано імпульсний сигнал затвора, який подається на перемикач підвищувального перетворювача. Вихідна напруга на навантаженні постійного струму показана на рис. 3.17, яка встановлена на рівні близько 820 В.

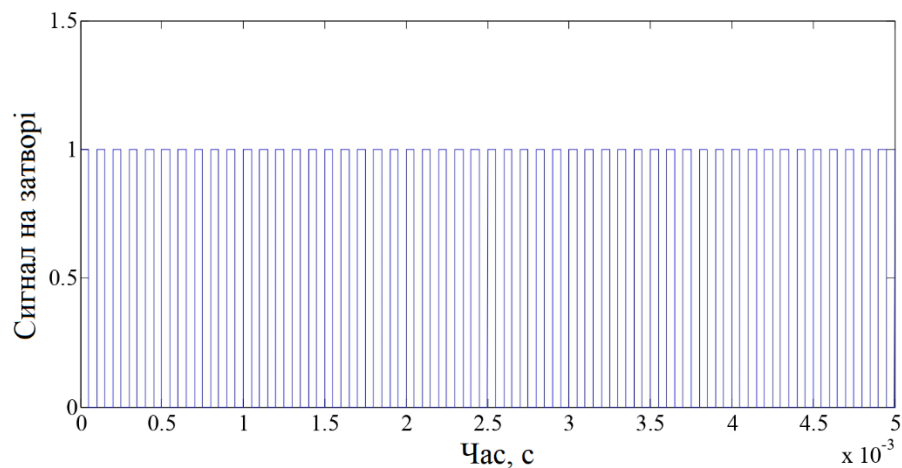


Рисунок 3.16 – Сформований ШІМ-сигнал для підвищувального перетворювача

Характеристики батареї показані на рис. 3.18 – 3.20. Рівень заряду батареї встановлений на рівні 85%, струм батареї змінюється від -50 до 50 А, а значення напруги батареї становить майже 163,5 В. Вихідні характеристики змінної напруги та струму навантаження представлені на рис. 3.28 та 3.29. Міжфазна напруга змінного навантаження становить 300 В, а струм – 50 А.

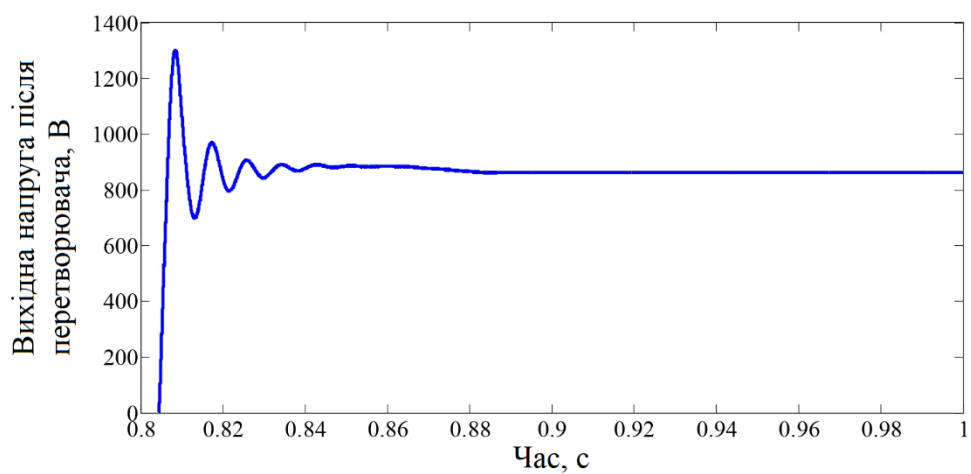


Рисунок 3.17 – Вихідна напруга

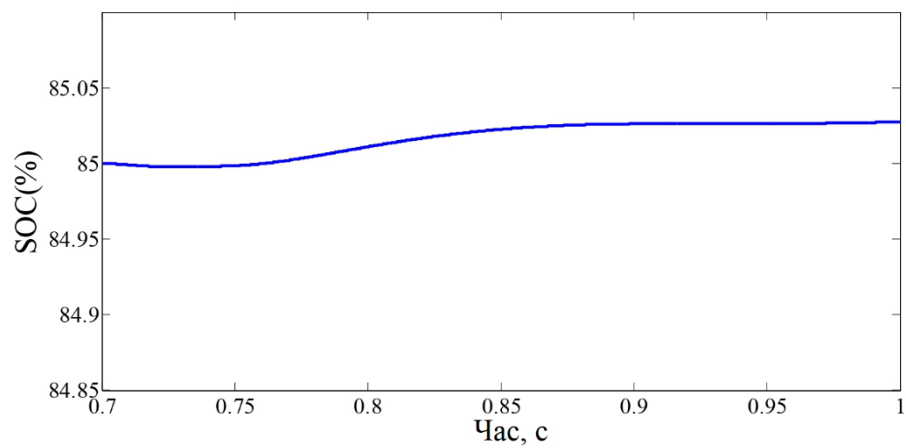


Рисунок 3.18 – Стан заряду акумулятора

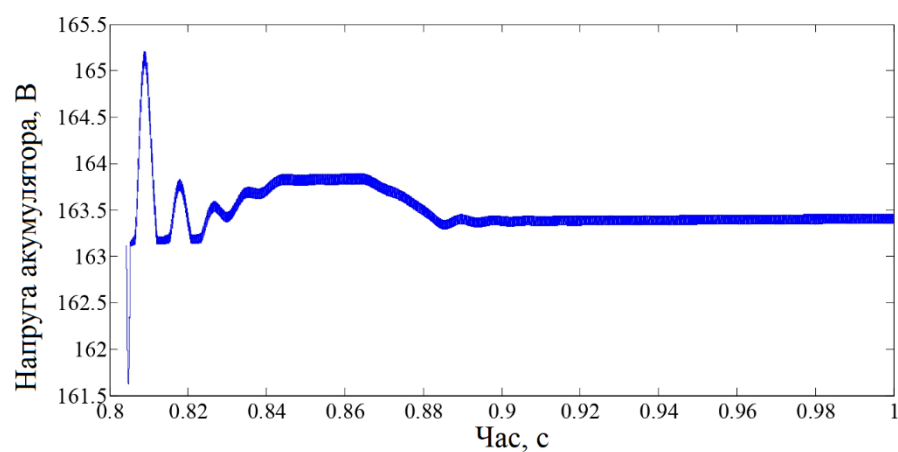


Рисунок 3.19 – Напруга акумулятора

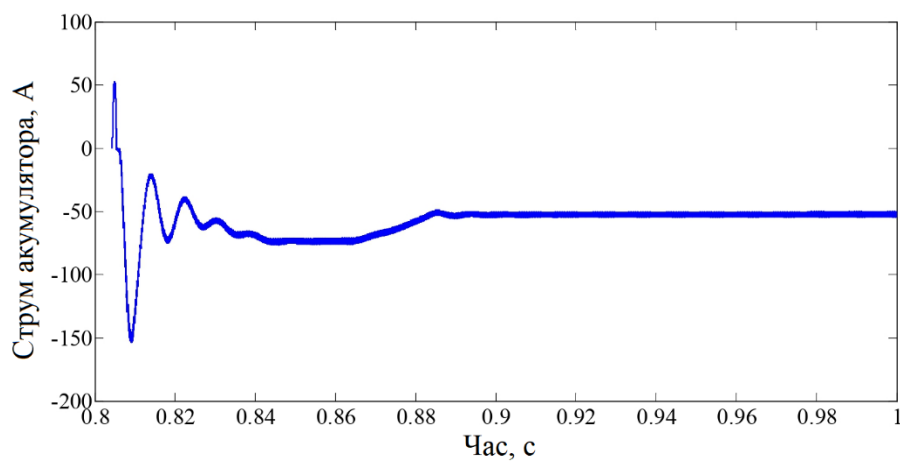


Рисунок 3.20 – Струм акумулятора

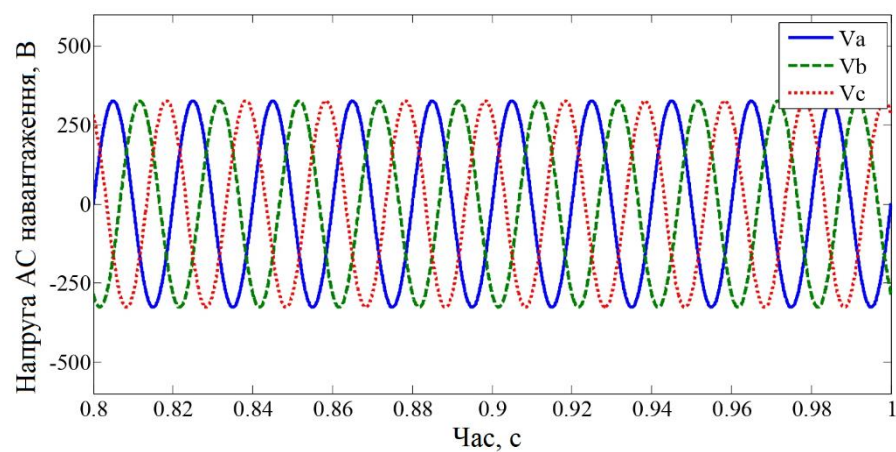


Рисунок 3.21 – Вихідна напруга на змінному навантаженні

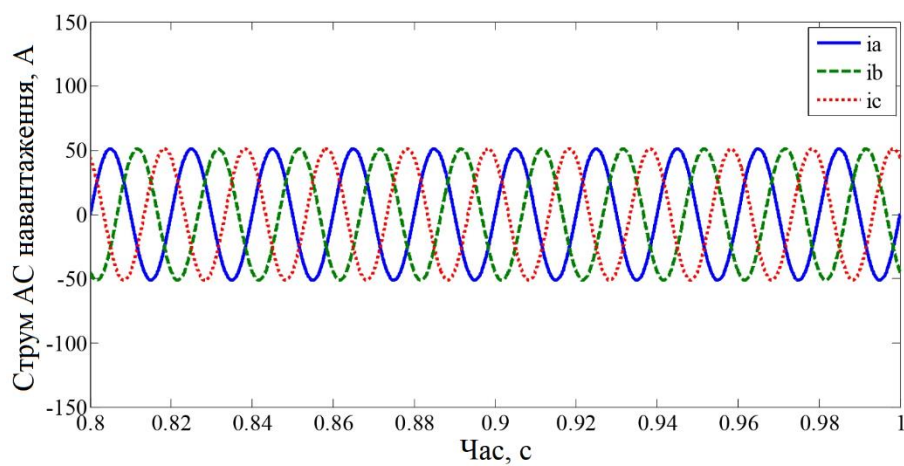


Рисунок 3.22 – Вихідний струм на змінному навантаженні

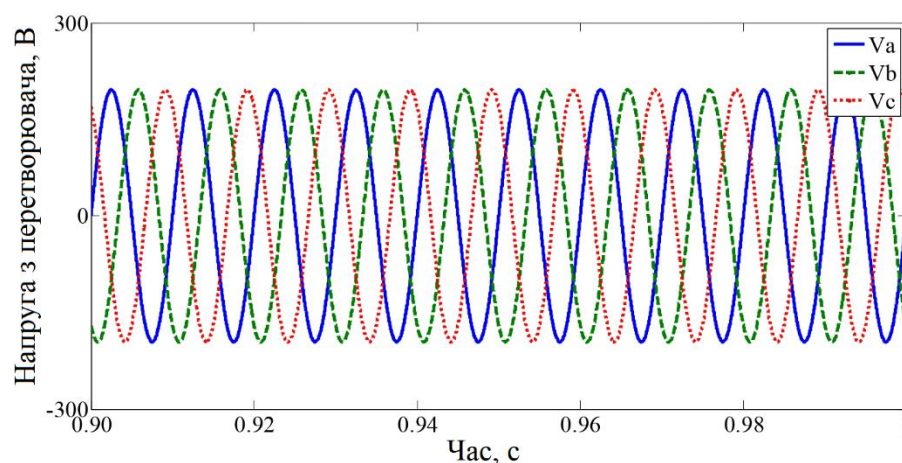


Рисунок 3.23 – Напряга змінного струму на стороні головного перетворювача

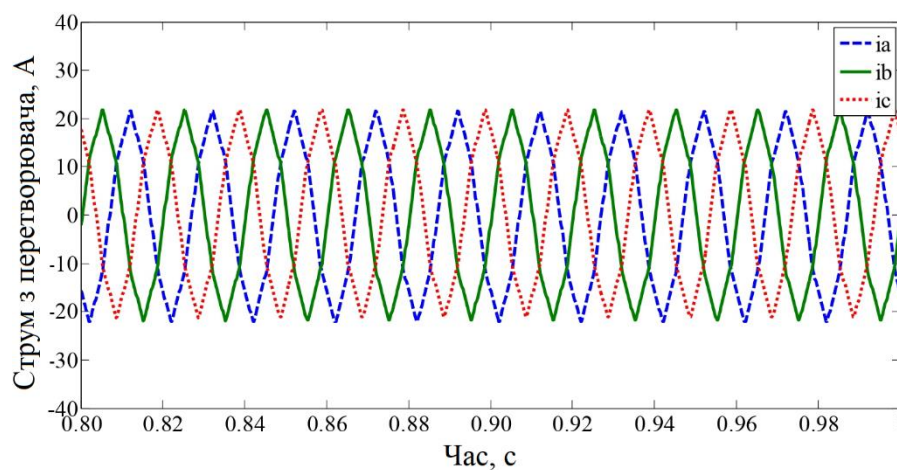


Рисунок 3.24 – Бічний струм змінного струму головного перетворювача

На рис. 3.23 і 3.24 показані характеристики напруги і струму на стороні змінного струму головного перетворювача, коли значення сонячного випромінювання змінюється в діапазоні 950-1300 Вт/м² при фіксованому постійному навантаженні 25 кВт.

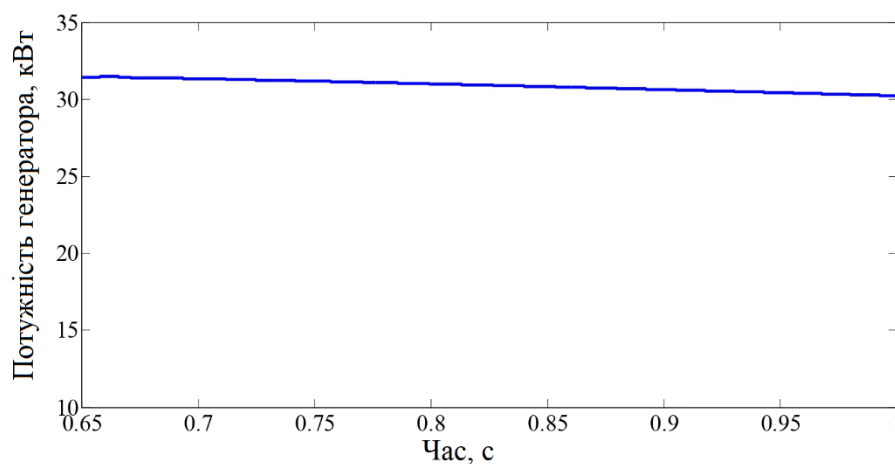


Рисунок 3.25 – Вихідна потужність DFIG

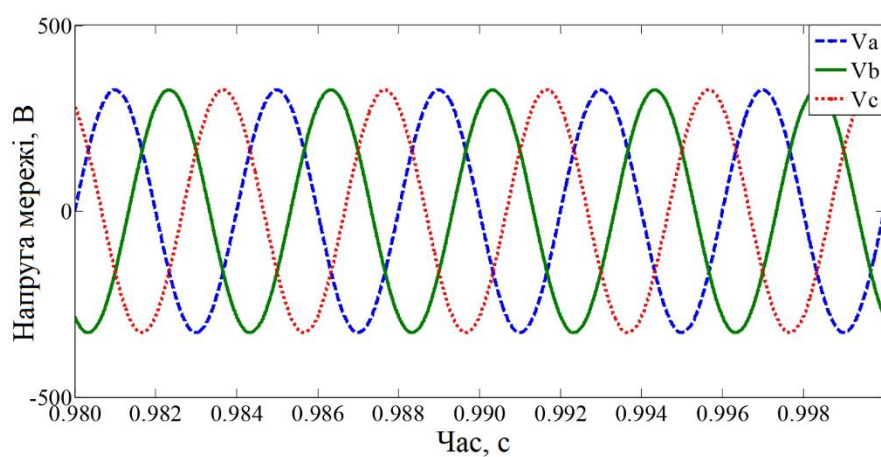


Рисунок 3.26 – Трифазна напруга живлення від електромережі

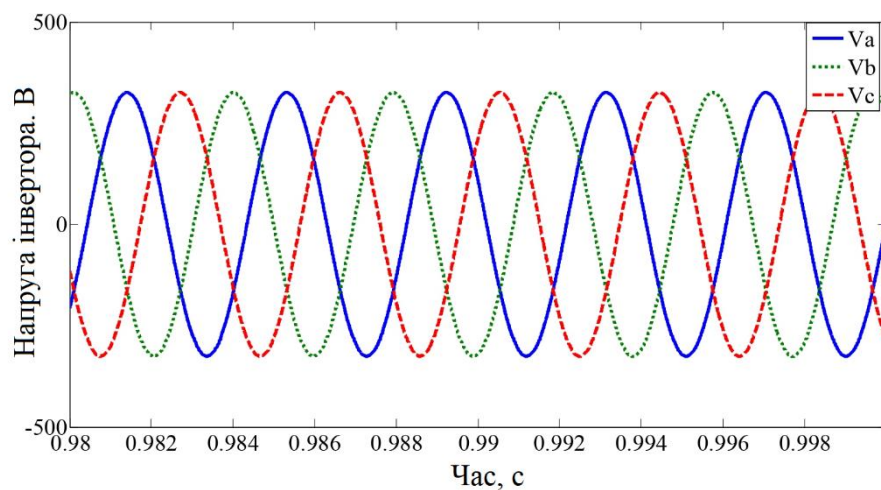


Рисунок 3.27 – Напруга трифазного ШІМ-інвертора

На рис. 3.25 показано реакцію вихідної потужності DFIG, яка через механічну інерцію стає стабільним значенням 32 кВт. На рис. 3.26 і 3.27

показано трифазну напругу живлення від мережі та трифазну вихідну напругу ШІМ-інвертора відповідно.

3.5 Висновки до розділу

1. Запропоновано мікромережу на основі вітрової турбіни та фотоелектричного джерела електроенергії. У ній різні джерела змінного і постійного струму та навантаження підключені до відповідних мереж змінного і постійного струму. Кола змінного і постійного струму з'єднані між собою за допомогою двох трансформаторів і двох двонаправлених трифазних перетворювачів. Шина змінного струму гібридної мережі підключена до електромережі.
2. Проведено розрахунок вольт-амперних та вольт-ватних характеристик фотоелектричного масиву. Підтверджено той факт, що напруга холостого ходу логарифмічно залежить від сонячного випромінювання, проте струм короткого замикання прямо пропорційний інтенсивності випромінювання.
3. Наведено результати моделювання гібридної мережі. Отримано графічні залежності: вихідного струму та напруги фотоелектричного масиву; стан заряду акумулятора та його напруга й струм з часом; напруги та струми на навантаженні змінного струму від часу; потужності і напруги вітрогенератора від часу. Зроблено відповідні висновки.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Фізичні основи електробезпеки

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [29].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, струмопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтно-профілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

4.2 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [29].

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;

- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;
- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві [29].

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою – 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт – 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів – для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт – понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;

- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 – 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і

затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.3 Блискавкозахист

Блискавкозахист — це система захисних пристроїв та заходів, що призначені для забезпечення безпеки людей, збереження будівель та споруд, устаткування та матеріалів від можливих вибухів, займань та руйнувань, спричинених блискавкою.

Блискавка — особливий вид проходження електричного струму через величезні повітряні прошарки, джерелом якого є атмосферний заряд, накопичений грозовою хмарою. Умови утворення таких хмар — велика вологість та швидка зміна температури повітря. За таких умов у атмосфері Землі проходять складні фізичні процеси, які призводять до утворення та накопичення електричних зарядів. При підвищенні напруженості електричного поля до критичних значень виникає розряд, який супроводжується яскравим свіченням (блискавкою) та звуком (громом). Довжина каналу блискавки може досягати кількох кілометрів, сила струму — 200 000 А, напруга — 150 000 кВ, а температура — 10000 °С і більше. Час існування блискавки 0,1 — 1 с. Щосекунди земну кулю уражають в середньому більше 100 блискавок [29].

Розрізняють первинні (прямий удар) і вторинні прояви блискавки.

Прямий удар блискавки (ураження блискавкою) — безпосередній контакт каналу блискавки з будівлею чи спорудою, що супроводжується протіканням через неї струму блискавки. Прямий удар блискавки здійснює на уражений об'єкт наступні дії: електричну, що пов'язана з ураженням людей і тварин електричним струмом та виникненням перенапруг на елементах, по яких струм відводиться в землю; теплову, що зумовлена значним виділенням теплоти на

шляхах проходження струму блискавки через об'єкт; механічну, що спричинена ударною хвилею, яка поширюється від каналу блискавки, а також електродинамічними силами, що виникають у конструкціях, через які проходить струм блискавки.

Під вторинними проявами блискавки розуміють явища під час близьких розрядів блискавки, що супроводжуються появою потенціалів на конструкціях, трубопроводах, електропроводах всередині будівель і споруд, які не зазнали прямого удару блискавки. Вони виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції.

Електростатична індукція проявляється у наведені потенціалів на металевих елементах конструкції, в незамкнених металевих контурах, що може викликати іскріння всередині будівель та споруд і тим самим ініціювати пожежу чи вибух.

Електромагнітна індукція супроводжуються появою в просторі змінного магнітного поля, яке індукує в металевих контурах, що утворені із різних протяжних комунікацій (трубопроводів, електропроводів і т. п.) електрорушійну силу (ЕРС).

У замкнених контурах ЕРС призводить до появи наведених струмів. У контурах, в яких контакти недостатньо надійні в місцях з'єднання, такі струми можуть викликати іскріння або сильне нагрівання, що дуже небезпечно для приміщень, де утворюються вибухо- та (або) пожежонебезпечні концентрації.

Ще однією особливістю вторинного прояву блискавки є занесення високих потенціалів у будівлю по металоконструкціях, які підведені в цю будівлю (трубопроводах, рейкових шляхах, естакадах, проводах ліній електропередач і т. п.). Такі занесення супроводжуються електричними розрядами, які можуть стати джерелом вибуху чи пожежі.

Захист об'єктів від прямих ударів блискавки забезпечується шляхом встановлення блискавковідводів. Захист від електростатичної індукції (вторинний прояв блискавки) здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих

блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше ніж на 10 см.. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

При виборі пристроїв блискавкозахисту за категоріями враховують важливість об'єкта, його висоту, місце розташування серед сусідніх об'єктів, рельєф місцевості, інтенсивність грозової діяльності. Останній параметр характеризується середньорічною тривалістю гроз у годинах для даної місцевості.

Таблиця 4.1 – Середня інтенсивність грозової діяльності у різних регіонах (областях) України

№ зп.	Регіони (області) України	Інтенсивність грозової діяльності, год/рік
1	Автономна Республіка Крим	40—60
2	Закарпатська, Запорізька, Донецька	80—100
3	Інші області України	60—80

Для захисту об'єкта від прямих ударів блискавки застосовують блискавковідвід — пристрій, який височіє над захищуваним об'єктом, сприймає удар блискавки та відводить її струм у землю. Захисна дія блискавковідводу базується на властивості блискавки уражати найбільш високі та добре заземлені металеві конструкції. За конструктивним виконанням блискавковідводи поділяються на стержневі, тросові та сітчасті, а за кількістю та загальною

площею захисту — на одинарні, подвійні та багатократні. Окрім того, розрізняють блискавковідводи встановлені окремо та такі, що розташовані на захищуваному об'єкті. Будь-який блискавковідвід складається з блискавкоприймача (металевий стержень, трос, сітка), який безпосередньо сприймає удар блискавки; несівної опори (спеціальні стовпи, елементи конструкцій будівлі), на якій розташовується блискавкоприймач; струмовідводу (металевий провідник, конструкція), по якому струм блискавки передається в землю; заземлювача, який забезпечує розтікання струму блискавки в землі.

Блискавковідвід характеризується зоною захисту — частиною простору, навколо блискавковідводу, яка захищена від прямих ударів блискавки з відповідним ступенем надійності.

Таблиця 4.2 – Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км² поверхні землі залежно від інтенсивності грозової діяльності

Середня інтенсивність грозової діяльності, год/рік	10–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100 і більше
Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км ² поверхні землі	1	2	4	5,5	7	8,5

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі розкрито тенденції розвитку мікромережових технологій. Встановлено важливу роль в цьому процесів розподіленої генерації. Розподілена генерація набуває все більшої популярності завдяки своїм перевагам, таким як екологічність, можливість розширення та доступність без зміни існуючої мережі передачі та розподілу електроенергії.
2. Узагальнено результати моделювання фотоелектричної панелі з використанням алгоритму відстеження точки максимальної потужності.
3. Визначено роль вітрогенератора в роботі мікромережі.
4. Запропоновано мікромережу на основі вітрової турбіни та фотоелектричного джерела електроенергії. У ній різні джерела змінного і постійного струму та навантаження підключені до відповідних мереж змінного і постійного струму. Кола змінного і постійного струму з'єднані між собою за допомогою двох трансформаторів і двох двонаправлених трифазних перетворювачів. Шина змінного струму гібридної мережі підключена до електромережі.
5. Проведено розрахунок вольт-амперних та вольт-ватних характеристик фотоелектричного масиву. Підтверджено той факт, що напруга холостого ходу логарифмічно залежить від сонячного випромінювання, проте струм короткого замикання прямо пропорційний інтенсивності випромінювання.
6. Наведено результати моделювання гібридної мережі. Отримано графічні залежності: вихідного струму та напруги фотоелектричного масиву; стан заряду акумулятора та його напруга й струм з часом; напруги та струми на навантаженні змінного струму від часу;

потужності і напруги вітрогенератора від часу. Зроблено відповідні висновки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)
3. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .
4. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173
5. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19. — (Electrical engineering and power electronics)
6. Білевич В.Р. Вплив кількості лопатей на енергоефективність вітротурбіни // В.Р. Білевич; А.М.Яковчук; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних

технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 11-12.

7. Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 70.

8. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 204. — (Електротехніка та енергозбереження)

9. Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.

10. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.

11. Стельмах С.С. Енергоефективність гідроакумуючих установок малої потужності // С.С.Стельмах, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 71.

12. Pedrasa, M. A., & Spooner, T. (2006). A survey of techniques used to control microgrid generation and storage during island operation. *Aupec2006*, 1, 15.

13. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.

14. Kanellos, F. D., Tsouchnikas, A. I., & Hatziaargyriou, N. D. (2005, June). Micro-grid simulation during grid-connected and islanded modes of operation. In *International Conference on Power Systems Transients (Vol. 6)*.

15. Girgis, A., & Brahma, S. (2001, July). Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. In *LESCOPE 01. 2001 large engineering systems conference on power engineering. Conference Proceedings. Theme: Powering Beyond 2001 (Cat. No. 01ex490) (pp. 115-119)*. IEEE.

16. Jin, C., Loh, P. C., Wang, P., Mi, Y., & Blaabjerg, F. (2010, December). Autonomous operation of hybrid AC-DC microgrids. In *2010 IEEE international conference on sustainable energy technologies (ICSET) (pp. 1-7)*. IEEE.

17. Грицюк М.Я. Переваги концентруючих фотоелектричних електростанцій // М.Я. Грицюк; В.П. Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня

заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 29-30

18. Jiang, Z., & Yu, X. (2008, November). Hybrid DC-and AC-linked microgrids: towards integration of distributed energy resources. In 2008 IEEE Energy 2030 Conference (pp. 1-8). IEEE.

19. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.

20. Liu, X., Wang, P., & Loh, P. C. (2011). A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control. IEEE Transactions on smart grid, 2(2), 278-286.

21. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53

22. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10.

23. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій —, 25-26 листопада 2020 року.—Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81

24. Loh, P. C., Li, D., & Blaabjerg, F. (2011, September). Autonomous control of interlinking converters in hybrid AC-DC microgrids with energy storages. In 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (pp. 652-658). IEEE.

25. Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., & Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric

conditions. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 142(1), 59-64.

26. Villalva, M. G., & Ruppert, E. (2009, November). Analysis and simulation of the P&O MPPT algorithm using a linearized PV array model. In 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (pp. 231-236). IEEE.

27. Masoum, M. A., Dehbonei, H., & Fuchs, E. F. (2003). Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. IEEE Transactions on energy conversion, 17(4), 514-522.

28. Trzynadlowski, A. (1998). Modern power electronics. IEEE Power Engineering Review, 18(7), 31-31.

29. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.