

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

Шифр і назва

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Шифр і назва


Освітня програма 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Шифр і назва

на тему «Метод керування гібридною сонячною електростанцією»

КВРАКІТ. 2021066.01.06.ПЗ

Виконав:

студент 2 курсу, група АКІТ_м-21-1  Олександр РУДЕНОК

Ім'я, ПІРІЗВИЩЕ

Керівник:

д-р техн. наук, проф.



Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПІРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер



Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПІРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.



Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПІРІЗВИЩЕ

8 грудня

2022 р.

Хмельницький, 2022

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій й
Освітній рівень другий (магістерський)
Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

AKIT
Мартинюк В.В.
« 1 » 02 2022 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

Руденку Олександру Валерійовичу

1 Тема роботи: Метод керування гібридною сонячною електростанцією
керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н, професор.

Затверджено наказом по університету від «1» липня 2022р. № 83.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2022р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: розробка методу керування гібридною сонячною електростанцією.

Об'єкт дослідження: процес керування гібридною сонячною електростанцією.

Предмет дослідження: метод керування гібридною сонячною електростанцією.





4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель гібридної сонячної електростанції. Імітаційне моделювання блоків гібридної сонячної електростанції. Експериментальне дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією. Висновки.

Завдання отримав Руденко

Науковий керівник Мартинюк

5. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

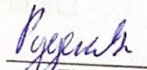
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	к.т.н,доцент Корецька.Л.О,		
Антиплагиат	к.т.н,доцент Федула.М.В		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

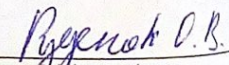
№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	10.09.2022р.	Виконано
2	Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2022р.	Виконано
3	Математична модель гібридної сонячної електростанції	15.10.2022р.	Виконано
4	Імітаційне моделювання блоків гібридної сонячної електростанції	30.10.2022р.	Виконано
5	Експериментальне дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією	10.11.2022р.	Виконано
6	Висновки	15.11.2022р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2022р.	Виконано
7	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2022р.	Виконано

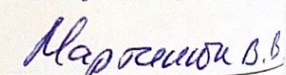
Студент

Керівник роботи


Підпис


Підпис


Ініціали, прізвище


Ініціали, прізвище

Зміст

ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ.....	7
1.1 Будова гібридної сонячної електростанції.....	7
1.2 Стабільність гібридної сонячної електростанції.....	12
Висновки до першого розділу.....	20
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ...22	22
2.1 Математична модель вітрогенератора гібридної сонячної електростанції.22	22
2.2 Математична модель сонячної батареї гібридної сонячної електростанції.27	27
2.3 Математична модель акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції.....	29
2.4 Математична модель дизельного генератора гібридної сонячної електростанції.....	36
Висновки до другого розділу.....	40
3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЛОКІВ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	42
3.1 Імітаційна модель вітрогенератора гібридної сонячної електростанції.....	42
3.2 Імітаційна модель сонячної батареї гібридної сонячної електростанції.....	48
3.3 Імітаційна модель акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції.....	52
3.4 Імітаційна модель дизельного генератора гібридної сонячної електростанції.....	59
Висновки до третього розділу.....	67
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ГІБРИДНОЮ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ.....	68
4.1 Особливості методу керування гібридною сонячною електростанцією....	68
4.2 Імітаційне моделювання методу керування гібридною сонячною електростанцією.....	71
Висновки до четвертого розділу.....	78

ВИСНОВКИ.....	79
Перелік посилань.....	80
Додаток А Стаття у фаховому журналі.....	84
Додаток Б Презентація.....	88

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах військової агресії проти України споживачі, які проживають у важкодоступних районах (малі міста, селища), часто бувають ізольованими від існуючих енергомереж або зазнають труднощів із постійним постачанням електроенергії. Для вирішення цих проблем необхідне встановлення автономного енергозабезпечення [1-4].

Станом на сьогоднішній день стаціонарними джерелами енергопостачання є дизель-генератори, які працюють на вуглеводневій сировині. В умовах роботи зі змінним графіком навантаження на електромережу, дизель-генератори не ефективні, у зв'язку з високими показниками питомої витрати палива при роботі в режимі з низьким ККД, що призводить до збільшення витрат на паливо та загострення екологічних проблем. Також важливим недоліком дизель-бензогенераторів є проблема доставки палива.

Тому дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією є актуальним завданням в Україні та у світі в цілому.

Метою роботи є підвищення ефективності гібридної сонячної електростанцією шляхом розробки методу керування гібридною сонячною електростанцією в реальному масштабі часу.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

- проаналізувати будову гібридної сонячної електростанції;
- проаналізувати і обрати математичні моделі складових блоків гібридної сонячної електростанції;
- розробити імітаційні моделі складових блоків гібридної сонячної електростанції;
- розробити імітаційну модель гібридної сонячної електростанції;
- розробити метод керування гібридною сонячною електростанцією із джерелами та споживачами електричної напруги у реальному масштабі часу.

Об'єктом дослідження є процес керування гібридною сонячною електростанцією.

Предметом дослідження є метод керування гібридною сонячною електростанцією.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, теорії автоматичного керування, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено метод керування гібридною сонячною електростанцією, який відрізняється від існуючих методів тим, що запропоновано аналізувати похибку частоти мережі змінного струму системою керування і за результатами аналізу здійснювати збільшення потужності джерел та споживачів електричної енергії у реальному масштабі часу. Це забезпечує підвищення енергетичної ефективності генерування електричної енергії.

Практична значимість отриманих результатів:

У роботі розроблена система керування гібридною сонячною електростанцією у реальному масштабі часу на основі використання інформації про похибку частоти мережі змінного струму в реальному масштабі часу. Використання такої системи дозволяє підвищити ефективність гібридної сонячної електростанції.

Апробація результатів дослідження: Результати досліджень представлені у вигляді статті у фаховому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» №4 2022р.

Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, висновків, списку використаних джерел, 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 107 сторінки комп'ютерного тексту, у тому числі: 51 рисунок та 1 таблиця, список використаних джерел вміщує 36 найменувань.

У вступі обґрунтована актуальність наукової задачі, сформульовано мету та задачі досліджень, відображено основні наукові результати та їх практичне значення.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано особливості будови гібридної сонячної електростанції. Проаналізовано процес забезпечення стабільної роботи гібридної сонячної електростанції з метою розробки методу керування гібридною сонячною електростанцією.

У другому розділі розглянуто та обрано математичні моделі складових блоків гібридної сонячної електростанції, проаналізовано їх переваги та недоліки. Істановлені параметри, які впливають на роботу складових блоків гібридної сонячної електростанції.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи розроблено імітаційні моделі складових блоків гібридної сонячної електростанції. Досліджено їх роботу в залежності від зміни входних параметрів, рівня сонячного випромінювання, температури та швидкості вітру.

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи розроблена імітаційна модель гібридної сонячної електростанції. Особливістю запропонованого методу керування гібридною сонячною електростанцією є максимальне використання енергії сонця і вітру, а також економічне використання дизельного пального дизельним генератором.

Для забезпечення цих вимох використовується потужна акумуляторна батарея, яка здатна накопичувати надлишок електроенергії при високих рівнях освітлення та швидкості вітру. У випадку недостатнього рівня освітлення та швидкості вітру, а також недостатнього заряду акумуляторної батареї, система керування запускає дизельний генератор і компенсує недостатню потужність. У загальних висновках по кваліфікаційній роботі висвітлені основні результати досліджень, які отримані у дипломній роботі магістра.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ

1.1. Будова гібридної сонячної електростанції

Для віддалених регіонів, у тому числі приватного сектора, існує перспектива використання відновлюваних джерел енергії, за допомогою гібридних систем. Функція гібридних систем полягає у постачанні електричних потужностей та енергії для окремих клієнтів або поєднання постійних клієнтів [1-4].

Ця підсистема генерування має бути здатна виконувати свої функції, незважаючи на непередбачені обставини, пов'язані з наявністю відновлюваних джерел та/або органічних енергетичних ресурсів, забезпечувати виконання своїх функцій за нормами споживання електроенергії клієнтами.

Гібридна система - це установка з кількома джерелами електричної енергії (генераторами), які використовують не менше двох різних технологій виробництва електроенергії [5-8]. Перед такою системою встановлюються наступні технічні завдання.

1. Виробництво та накопичення енергії економічно вигідним способом.
2. Якщо використовуються відновлювальні джерела електроенергії, то:
 - надавати перевагу використанню відновлювальним джерелам електроенергії, де це локально доступно;
 - накопичувати енергію від відновлювальних джерел електроенергії, коли вони доступні;
 - використовувати резервні джерела енергії (набори генераторів) для досягнення зазначеного рівня сервісу, коли відновлювальні джерела електроенергії є недоступними чи недостатніми.

На рисунку 1.1 зображена будова гібридної сонячної електростанції.

1. Вітрогенератор.
2. Сонячна панель.

3. Двовходова електрична машина-генератор.
4. Блок акумуляторної батареї.
5. Контролер заряду.
6. Дизель-генератор.
7. Система керування дизель-генератором.
8. Інвертор.

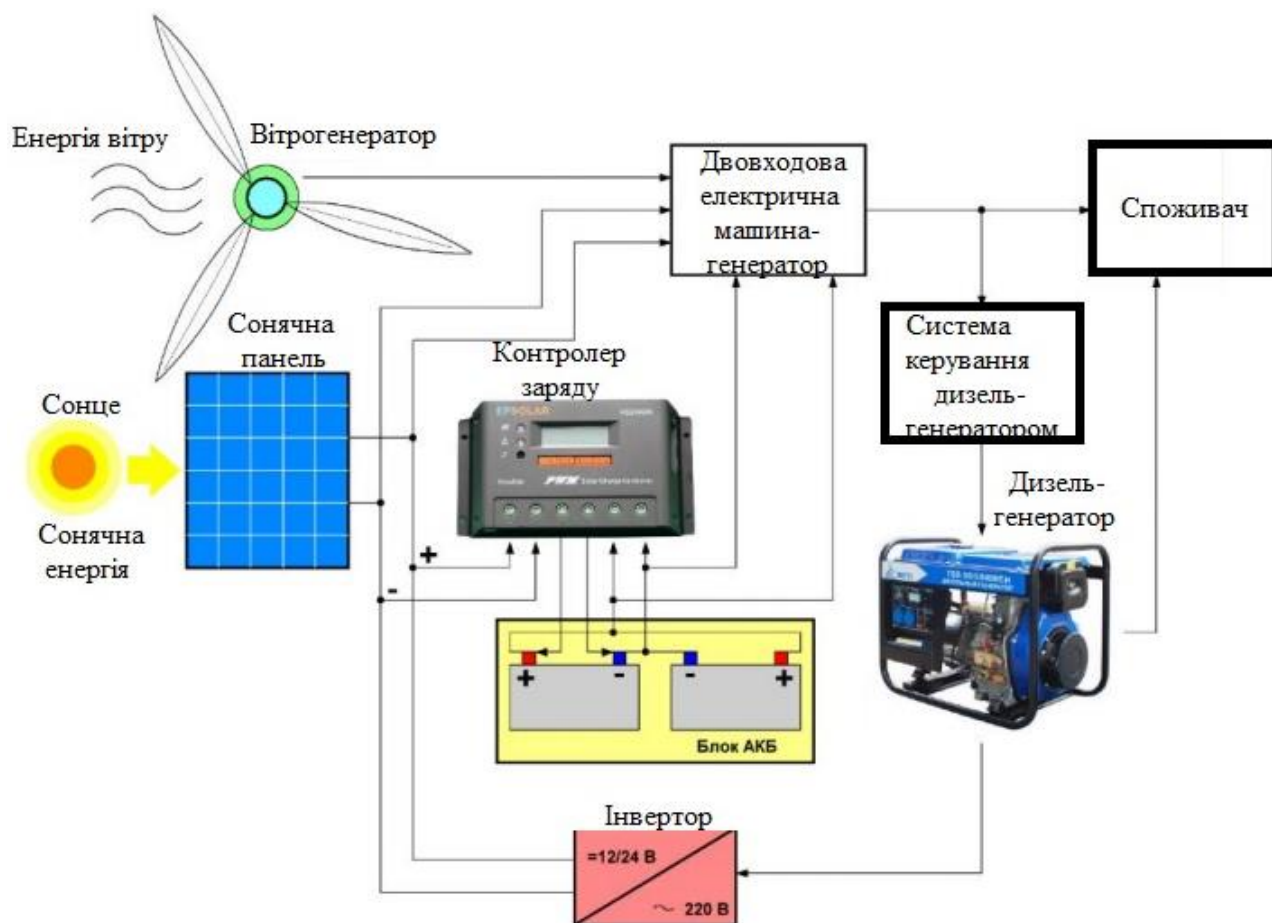


Рисунок 1.1 – Будова гібридної сонячної електростанції

У більшості районів надходження сонячної випромінювання та наявність вітру знаходяться в протифазі (тобто коли світить яскраве сонце, найчастіше відсутній вітер, або коли дме сильний вітер, то є нестача сонячного випромінювання). Для забезпечення безперебійного електропостачання автономного об'єкта, зменшення необхідної потужності вітрогенератора та

сонячної батареї та ємності акумуляторної батареї, покращення режимів роботи станції у багатьох випадках доцільне використання гібридної вітросонячної електростанції [9-12].

Особливо значні переваги гібридних станцій при її використанні протягом року. При цьому в зимовий час основне виробництво електроенергії припадає на вітроелектричну установку, а влітку - на сонячні фотоелектричні модулі. Сонячні та вітрові енергетичні технології, екологічно чисті та доступні, можуть замінити або доповнити традиційні способи отримання енергії, пов'язані з використанням автономних генераторів.

Останнє реалізується за допомогою гібридних енергоустановок (ГЕУ), що поєднують технології використання поновлюваних джерел енергії, дизель-генераторів, електронакопичувальних пристроїв та призначених для використання переважно для енергопостачання автономних споживачів [13-15].

Така система збільшує можливості підвищення екологічної безпеки та економії палива двигуном внутрішнього згоряння за рахунок забезпечення його більш ефективною роботи в умовах змінного графіка навантаження, безпосередньо пов'язаного з потребами в електроенергії в різний час доби.

Аналіз існуючих розробок систем автономного енергозабезпечення та характеристик виробленого обладнання дозволив виявити основні тенденції розвитку даної галузі, сформувані перспективний напрямок практичної реалізації енергоефективної ГЕУ під час проведення науково-дослідних робіт.

Мережевий сонячний інвертор.

Мережеві інвертори є одними з основних компонентів системи економії палива, розроблені спеціально для використання в енергомережах низької напруги, вони чудово витримують коливання частоти та напруги. Вони також залишаються надзвичайно ефективними у суворих умовах навколишнього середовища, таких як підвищена чи знижена температура, вологість, солоне повітря тощо. Існує два типи мережевих інверторів - центральні (central) та

ланцюжкові (string). Обидва типи можуть бути використані у гібридній електростанції.

Фотоелектрична станція на центральному інверторі містить лише одне силове введення в головний пристрій, де постійний струм перетворюється на змінний. У сонячних електростанціях на ланцюжкових інверторах сумарна потужність фотоелектричної установки ділиться на безліч підсистем, кожна з яких перетворює постійний струм сонячних панелей змінним своїм ланцюжковим інвертором. Обидва варіанти ефективно працюють та виконують функції управління енергомережею[16-19].

Інверторна підстанція (Центральний інвертор).

Вибір між системою на центральних або ланцюжкових інверторах залежить від багатьох факторів. Необхідно враховувати і витрати на встановлення системи та експлуатаційні витрати. Наприклад, технічне обслуговування системи на ланцюжкових інверторах не дуже трудомістке, навіть у важкодоступних районах. Якщо потрібне обслуговування, місцеві електрики можуть легко замінити окремі інвертори. Однак для централізованої енергосистеми віддалений моніторинг параметрів набагато простіше.

Масив сонячних панелей.

Сонячна енергія виробляється сонячними батареями (фотоелектричними модулями), які можуть бути встановлені на землі або на даху, залежно від місцевих умов. Мережеві інвертори сумісні з усіма типами фотоелектричних модулів та технологіями, які нині доступні на ринку.

Оптимізатор паливних ресурсів.

Оптимізатор паливних ресурсів забезпечує ідеальну взаємодію між генераторними установками, фотоелектричними системами та навантаженнями, керуючи необхідним потоком сонячної енергії, що надходить у дизельну енергосистему. Як центральна ланка в системі оптимізації потоків енергії, він забезпечує максимальну безпеку, дозволяє скоротити витрати на паливо і

мінімізує викиди CO₂. Найкращі показники ефективності системи та економії палива досягаються, як правило, за потужності СЕС, що дорівнює 60% потужності наявної генераторної установки.

Оптимізатор паливних ресурсів складається із трьох модулів.

Головний модуль контролю сонячної енергосистеми. Управління потужністю фотоелектричної установки, що передається в дизельну енергосистему. Забезпечує оптимальну кількість необхідної сонячної енергії шляхом оцінки поточного стану генераторної установки та загального навантаження.

Інтерфейсний модуль. Записує та передає дані та задані значення та виступає як інтерфейс зв'язку між головним модулем контролю СЕС та інверторами.

Модуль збирання даних. Швидко та точно аналізує поточне навантаження та вихідні параметри мережу та передає дані в головний модуль контролю сонячної енергосистеми.

Дизель-генераторна установка

У регіонах, віддалених від централізованих мереж, дизель-генераторні системи часто забезпечують електроенергією промислові підприємства. Вони формують локальну енергомережу, забезпечуючи постійне джерело живлення всім підключеним споживачам.

Оскільки генераторні установки вимагають постійного постачання палива, експлуатаційні витрати на них найчастіше найвищі. У регіонах з частими відключеннями електроенергії або нестабільними вихідними параметрами за частотою та напругою дизель-генераторні установки часто є додатковим джерелом енергії при відключенні електромережі.

Блок керування генераторними установками.

Блок керування генераторними установками - це центральний термінал контролю, керування та синхронізації з іншими генераторними установками.

Акумуляторний блок.

Для підвищення ефективності усієї системи енергопостачання необхідно її забезпечувати блоком акумуляторних батарей. Коли сонячна інтенсивність недостатня або потрібна додаткова енергія після настання темряви, акумуляторна батарея зможе забезпечувати недостатню потужність, гарантуючи оптимальну роботу гібридної системи.

Промислові споживачі та навантаження.

Конкретні види споживачів, наприклад, потужні промислові верстати для видобутку або переробки сировини, а також для сільськогосподарського використання, як правило, мають високі пускові струми і широкі коливання графіка навантаження.

Інтелектуальне керування системою гарантує, що поточна генерація та навантаження в будь-який момент будуть ідеально підібрані. Система забезпечує постійну стабільність, швидко реагуючи на стрибки генерації та навантаження, наприклад, коли включаються потужні споживачі, такі як промислові насоси, компресори, конвеєрні стрічки.

У світі вже реалізовано сотні гібридних електростанцій. Наприклад, один з останніх і найбільших - це проект компанії «Тесла» на острові Кауаї (штат Гаваї, США), де встановлена сонячна електростанція потужністю 13 МВт та накопичувачі енергії ємністю 52 МВт·година, що дозволяє економити 6 млн. літрів дизельного палива в рік.

Гібридні фотоелектричні дизельні системи можуть окупитись досить швидко, особливо в сонячних регіонах з обмеженим доступом або без доступу до централізованих енергомереж. Ця технологія у поєднанні з дизельними агрегатами максимізує використання сонячної енергії [20-25].

Для таких галузей, як гірничодобувна промисловість, переробка сировини, сільськогосподарська промисловість (квіткові ферми та системи знесолення води), туризм (туристичні об'єкти з високим попитом на електроенергію та

обмеженим доступом до міських мереж) готовність до використання, максимальна надійність та доступність є фундаментальними. Екологічні переваги також значні: викиди CO₂ та шумове забруднення значно скорочуються, зводячи до мінімуму вплив на довкілля.

1.2 Стабільність гібридної сонячної електростанції

Стабільність енергосистеми вказує на здатність електроенергетичної системи відновлювати стан робочої рівноваги після того, як зазнала фізичних збурень, при цьому більшість системних змінних обмежені таким чином, щоб зберегти цілісність системи [1].

Стабільність може бути досягнута, лише якщо несправну ділянку мережі (навантаження або генератори) відключити без впливу на інші генератори. Іншими словами, стабільність - це рівновага між механічним і електричним моментами.

Велика енергосистема є дуже нелінійною системою, оскільки вона працює зі змінними умовами, такими як навантаження, потужність генератора, топологія та робочі параметри. Коли параметри системи змінюються, наприклад, через відключення або підключення великого навантаження або відключення великого генератора, енергосистема повинна досягти нового стану рівноваги, щоб залишатися стабільною.

Це досягається автоматичним керуванням і операторами. Якщо після збою система не може повернутися до нормального стану, це означає, що вона стала нестабільною системою. Це означає, що система призведе до відключення або вимкнення.

Усю мережу, де багато синхронних генераторів і багато навантажень підключено в багатьох різних точках, можна вважати одним великим електромеханічним об'єктом [26-30], як показано на рисунку 1.2.

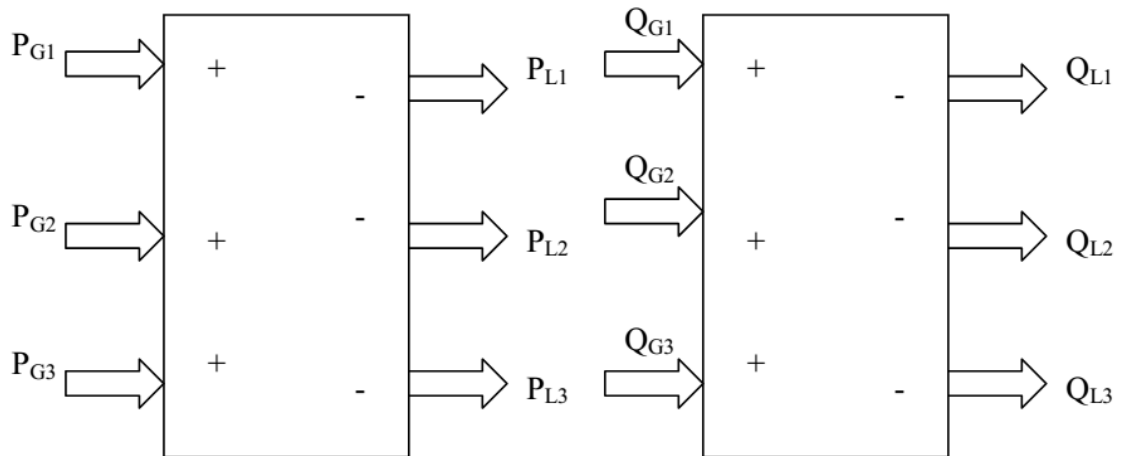


Рисунок 1.2 – Баланс активної та реактивної потужності в мережі

Щоб досягти бажаної частоти мережі за будь-яких умов, виробництво електроенергії різними генераторами має завжди відповідати підключеним навантаженням. Зазвичай можуть виникнути три наступні ситуації:

$$\sum P_{ГЕН} > \sum P_{СПОЖ}, \quad (1.1)$$

$$\sum P_{ГЕН} = \sum P_{СПОЖ}, \quad (1.2)$$

$$\sum P_{ГЕН} < \sum P_{СПОЖ}, \quad (1.3)$$

де $P_{ГЕН}$ - загальна потужність генерації електроенергії у поточний момент;

$P_{СПОЖ}$ - загальна потужність споживання електроенергії у поточний момент.

Зв'язок між $P_{ГЕН}$, $P_{СПОЖ}$ та механічним обертанням або частотою мережі виражається рівнянням:

$$\sum P_{ГЕН} - \sum P_{СПОЖ} = \frac{d}{dt} \sum J_i \Omega_i^2, \quad (1.4)$$

де J_i - момент інерції всієї системи;

Ω_i - кутова частота мережі.

Зв'язок між $P_{ГЕН}$, $P_{СПОЖ}$ та механічним обертанням або частотою мережі не залежить від типів підключених генераторів і навантажень [2]. Кутова частота мережі визначається рівнянням:

$$\Omega_i = \frac{1}{J_i} \int (T_m - T_e) dt . \quad (1.5)$$

Математична модель визначення кутової частоти мережі зображена на рисунку 1.3.

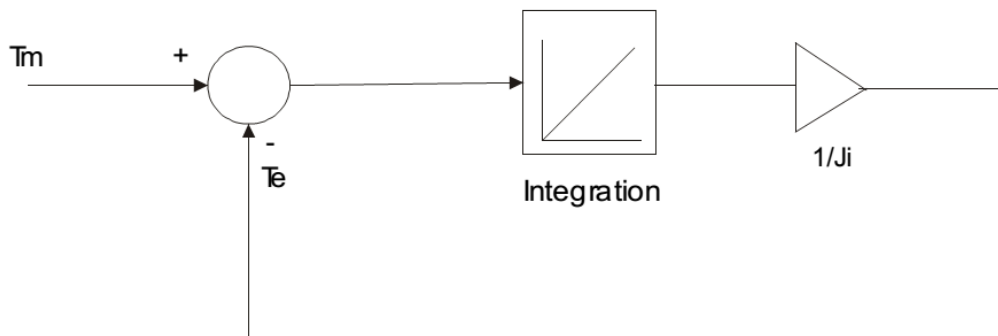


Рисунок 1.3 – Математична модель визначення кутової частоти мережі

Графік зміни кутової частоти мережі у часі в залежності від співвідношення загальної потужності генерації електроенергії у поточний момент $P_{ГЕН}$ та загальної потужності споживання електроенергії у поточний момент $P_{СПОЖ}$ зображено на рисунку 1.4.

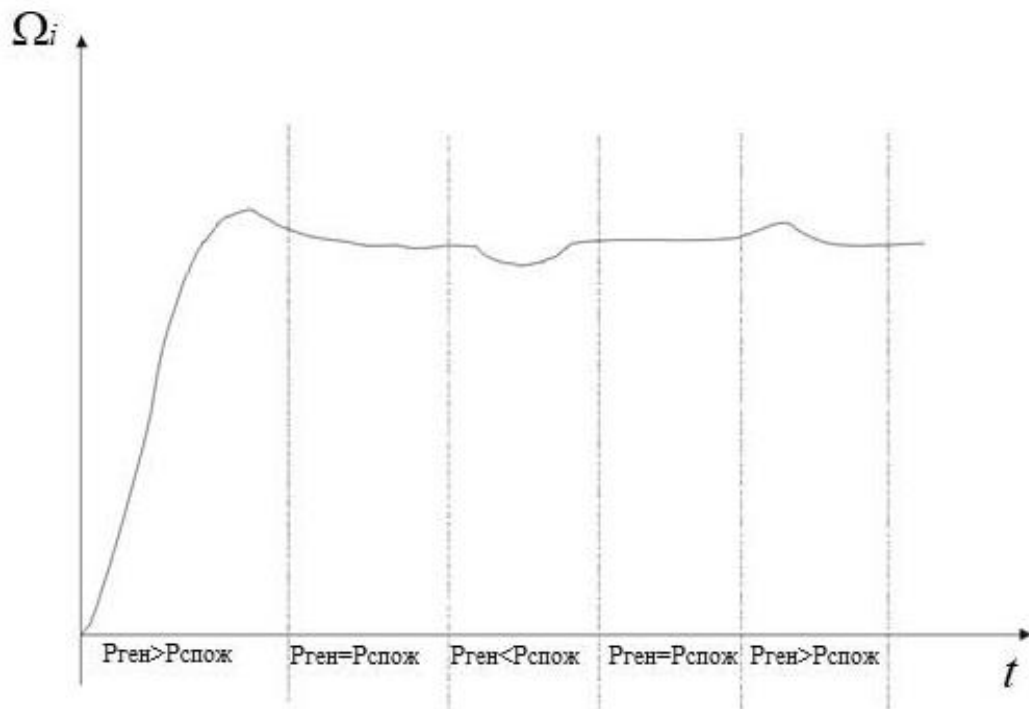


Рисунок 1.4 – Графік зміни кутової частоти мережі у часі в залежності від співвідношення загальної потужності генерації електроенергії у поточний момент $P_{ГЕН}$ та загальної потужності споживання електроенергії у поточний момент $P_{СПОЖ}$

Враховуючи, що система запускається без навантаження, то кутова частоти мережі збільшується повільно. Час, який необхідний системі для досягнення номінальної кутової частоти мережі, залежить від моменту інерції першого блоку генеруючого пристрою мережі. Мережа формується одним великим генератором електричної енергії, а додаткові генератори синхронізуються з ним.

Коли $\sum P_{ГЕН} > \sum P_{СПОЖ}$, швидкість обертання синхронної машини в збільшується, таким чином відбувається збільшення кутової частоти мережі. Для цієї умови генерування електроенергії має бути зменшено до досягнення $\sum P_{ГЕН} = \sum P_{СПОЖ}$. Подібним чином, якщо частота зменшується через $\sum P_{ГЕН} < \sum P_{СПОЖ}$, генерування електроенергії має бути збільшено. В мережі

керування генерацією електроенергії здійснюється центральним блоком керування генерацією електроенергії через систему SCADA.

По аналогії із керуванням частотою мережі, керування напругою змінного струму в енергосистемі дозволяє підтримувати рівновагу між реактивною потужністю джерела та споживача у системі [2]. В мережі більшість навантажень мають індуктивний характер, наприклад асинхронні двигуни, вітряні турбіни з асинхронними генераторами, трансформатори та розподільні лінії.

Вони споживають реактивну потужність. З іншого боку, конденсатори корекції коефіцієнта потужності є джерелами реактивної потужності. Синхронні генератори можуть бути як споживачами, так і джерелами. У порівнянні з співвідношенням активної потужності та активного навантаження, де накопичення енергії можливе в обертовій масі під час дисбалансу, у випадку реактивного джерела та споживача накопичення є неможливим. Це означає, що навантаження споживають всю вироблену реактивну потужність, у відповідності до виразу (1.6).

$$\sum Q_{ГЕН}(V_m) - \sum Q_{СПОЖ}(V_m) = 0, \quad (1.6)$$

де $Q_{ГЕН}$ - реактивна потужність генераторів електричної енергії;

$Q_{СПОЖ}$ - реактивна потужність споживачів електричної енергії;

V_m - напруга мережі змінного струму.

Наведене вище рівняння показує, що якщо $Q_{ГЕН} > Q_{СПОЖ}$, напруга зростає порівняно з еталонним значенням і навпаки. Щоб досягти постійної напруги, реактивна потужність генераторів електричної енергії $Q_{ГЕН}$ повинна бути узгоджена із реактивною потужністю споживачів електричної енергії $Q_{СПОЖ}$.

Під'єднаний до мережі генератор показано на рисунку 1.5.

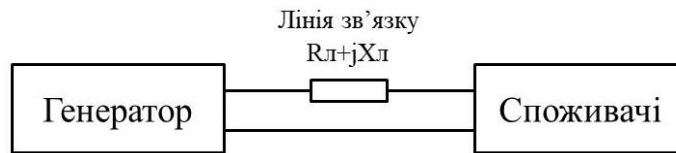


Рисунок 1.5 – Під'єднаний до мережі генератор

Після синхронізації синхронного генератора напруга на виході синхронного генератора буде такою ж, як і напруга мережі. Після цього один синхронний генератор не може змінити напругу мережі. Потік реактивної потужності регулюється зміною збудження.

Це означає, що синхронний генератор може працювати як у режимі надмірного збудження, так і в режимі недозбудження. Різниця напруг між мережею та генератором V може бути розділена на різницю активної складової напруги ΔV_a і різницю реактивної складової напруги ΔV_p . Ці падіння напруги можна представити у вигляді:

$$\frac{\Delta V_a}{V_m} = (I_c R_l - I_c X_l) = \frac{1}{V_m^2} (P_c R_l + P_c X_l), \quad (1.7)$$

$$\frac{\Delta V_p}{V_m} = (I_c R_l + I_c X_l) = \frac{1}{V_m^2} (P_c R_l - P_c X_l). \quad (1.8)$$

З наведених вище виразів випливає, що напруга в загальній точці зв'язку (ЗТЗ) залежить від потоку активної потужності та балансу реактивної потужності. У випадку ліній високої напруги, де співвідношення $\frac{R}{X}$ становить приблизно 0,1, різниця напруг в основному визначається реактивною потужністю. У випадку мережі середньої та низької напруги активна потужність відіграє важливу роль.

Стабільність напруги можна визначити як здатність енергосистеми підтримувати номінальну напругу на всіх шинах енергосистеми за нормальних

робочих умов і після завад. Якщо виникає нестабільність напруги, напруга мережі на якійсь ділянці прогресивно збільшується або зменшується, навантаження будуть відключені.

Зрештою вся система може зруйнуватися. Нестабільність напруги може виникнути через те, що через лінії електропередачі протікає більший струм, ніж вони розраховані. Це спричиняє додаткові падіння напруги на стороні навантаження. Іншою причиною може бути обмеження реактивної потужності деяких підключених генераторів.

У звичайній електромережі батареї конденсаторів або пристрої гнучкої системи передачі змінного струму, такі як статичні синхронні компенсатори (ССК) тощо, використовуються для забезпечення споживання реактивної потужності системою навантаження [30-36].

Пристрої гнучкої системи передачі змінного струму (ППЗС) - це статичні силові електронні пристрої, встановлені в мережах передачі змінного струму для підвищення можливостей передачі електроенергії, стабільності та керованості мереж через послідовну та/або шунтову компенсацію.

Завдяки стрімкому розвитку компонентів силової електроніки, систем керування (апаратне програмне забезпечення) і технології вітрових турбін; можливе застосування вітрогенераторів для підтримки мережі під час провалів напруги. Повністю відокремлені вітроелектростанції зі змінною швидкістю можуть забезпечувати контрольовану реактивну потужність в мережу.

Завдяки неперервній подачі активної потужності вітровими електростанціями, а також регулюванню вихідної напруги на затискачах вітрогенераторів, експерименти показують, що вітрові електростанції можуть певною мірою сприяти підвищенню напруги мережі.

Напруга та частота мережі повинні бути дуже близькими до номінального значення. Спілка з координації передачі електроенергії (СКПЕ) рекомендує 5-

етапний план відключення навантаження мережі для підтримки стабільної частоти мережі, який наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 - 5-етапний план відключення навантаження мережі

Частота мережі	Заходи
< 49,8 Гц	Тривожна сигналізація для всього персональну. Вмикання усіх ще не увімкнених генераторів електроенергії.
< 49,0 Гц	Відключення 10-15% навантаження із затримкою
< 48,7 Гц	Відключення ще 10-15% навантаження із затримкою
< 48,4 Гц	Відключення ще 15-20% навантаження із затримкою
< 47,5 Гц	Відключення електроенергії від мережі

Висновки до першого розділу

1. Гібридна сонячна електростанція - це установка з кількома джерелами електричної енергії (генераторами), які використовують не менше двох різних технологій виробництва електроенергії.

2. Інтелектуальне керування гібридною сонячною електростанцією гарантує, що поточна генерація та навантаження в будь-який момент будуть ідеально підібрані. Система забезпечує постійну стабільність, швидко реагуючи на стрибки генерації та навантаження, наприклад, коли включаються потужні споживачі, такі як промислові насоси, компресори, конвеєрні стрічки.

3. Гібридна сонячна електростанція є дуже нелінійною системою, оскільки вона працює зі змінними умовами, такими як навантаження, потужність генератора, топологія та робочі параметри. Коли параметри системи змінюються, наприклад, через відключення або підключення великого навантаження або відключення великого генератора, гібридна сонячна електростанція повинна досягти нового стану рівноваги, щоб залишатися стабільною.

4. Час, який необхідний системі для досягнення номінальної кутова частоти мережі, залежить від моменту інерції першого блоку генеруючого пристрою мережі. Мережа формується одним великим генератором електричної енергії, а додаткові генератори синхронізуються з ним.

5. По аналогії із керуванням частотою мережі, керування напругою змінного струму в енергосистемі дозволяє підтримувати рівновагу між реактивною потужністю джерела та споживача у системі. В мережі більшість навантажень мають індуктивний характер, наприклад асинхронні двигуни, вітряні турбіни з асинхронними генераторами, трансформатори та розподільні лінії..

6. Стабільність напруги можна визначити як здатність енергосистеми підтримувати номінальну напругу на всіх шинах енергосистеми за нормальних робочих умов і після завад. Якщо виникає нестабільність напруги, напруга мережі на якійсь ділянці прогресивно збільшується або зменшується, навантаження будуть відключені.

8. Нестабільність напруги може виникнути через те, що через лінії електропередачі протікає більший струм, ніж вони розраховані. Це спричиняє додаткові падіння напруги на стороні навантаження. Іншою причиною може бути обмеження реактивної потужності деяких підключених генераторів.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Математична модель вітрогенератора гібридної сонячної електростанції

У відповідності до будови гібридної сонячної електростанції, яка зображена на рисунку 1.1, математична модель гібридної сонячної електростанції містить математичні моделі усіх блоків, що входять до складу гібридної сонячної електростанції.

Першим блоком, який входить до складу гібридної сонячної електростанції, є вітрогенератор. В якості вітрогенератора, який входить до складу гібридної сонячної електростанції, обираються малі вітрової турбіни потужністю від 1 до 100 кВт.

Для виробництва електроенергії у вітрогенераторі можна використовувати синхронний або асинхронний генератор. Вибір синхронного або асинхронного генератора залежить від характеру навантаження. У випадку можливості під'єднання до мережа змінного струму в якості джерела електричної енергії у вітрогенераторі використовують асинхронний генератор. Якщо можливості під'єднання до мережа змінного струму немає, то в якості джерела електричної енергії у вітрогенераторі використовують синхронний генератор.

На генерування електричної енергії вітрогенератором впливає зміна швидкості вітру. У вітрогенераторі керування можливе тільки в одному напрямку, а саме, можна зменшити потужність вітрогенератора або контролювати на її певному рівні, якщо генерування електричної енергії вітрогенератором перевищує потужність навантаження.

Якщо вітрогенератор підключено до потужної мережі змінного струму, можна постійно віддавати номінальну потужність вітрогенератора до мережі. У разі невеликої ізольованої мережі потужність може бути зменшена.

Контроль потужності та швидкості обертання вітрогенератора - це основні фактори, які використовуються для керування вітрогенератором. Потужність вітрогенератора визначається виразом:

$$P_B = 0,5\rho S C_p V^3. \quad (2.1)$$

де ρ - густина повітря;

S - площа ротора;

C_p - коефіцієнт потужності;

V - швидкість вітру.

Коефіцієнт потужності C_p залежить від коефіцієнта швидкості λ і кута тангажу β лопатів. Коефіцієнт швидкості λ визначається виразом.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V}, \quad (2.2)$$

де ω - кутова частота обертання ротора;

R - радіус ротора.

Кожна система керування вітрогенератором має свій унікальний метод керування, який залежить від робочої області та задачі керування вітрогенератором. На рисунку 2.1 зображені області роботи вітрогенератора.

В області 1 відсутня генерація електроенергії від вітрогенератора. Це тому, що швидкість вітру в цій області занадто низька, щоб почати обертання ротора вітрогенератора. Обертання ротора починається лише в точці, де швидкість вітру перевищує швидкість вмикання вітрогенератора.

В області 2 вітрогенератор здатний виробляти електроенергію з різними швидкостями вітру, але не з номінальною потужністю. У цій області основна увага приділяється максимізації виробництва електроенергії.

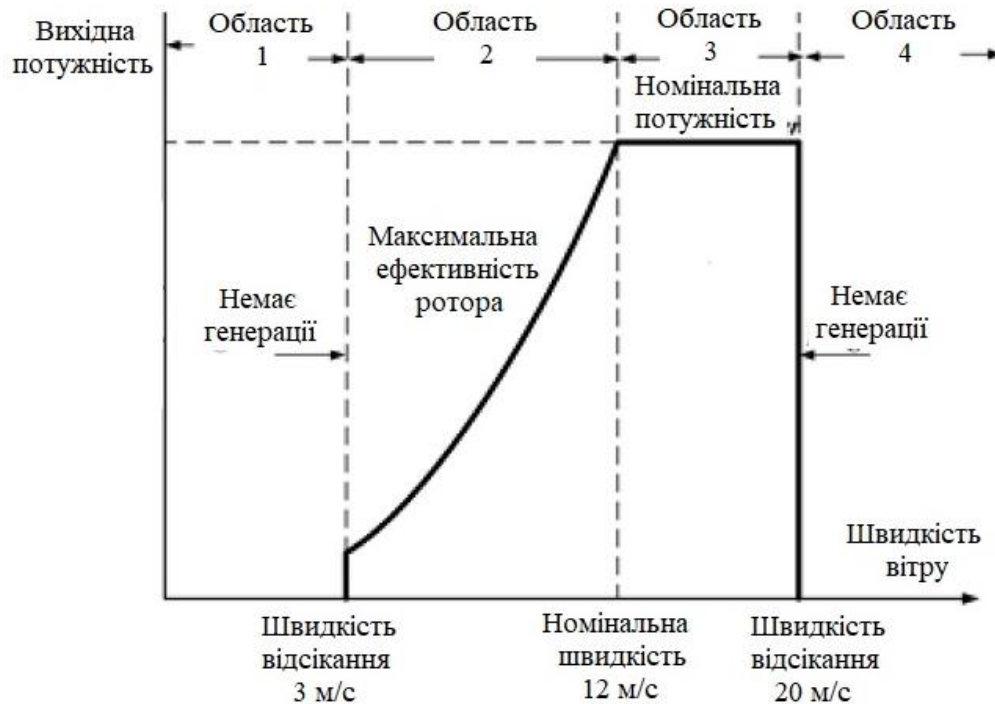


Рисунок 2.1 – Области роботи вітрогенера

Як видно з виразу (1), величина енергії вітру змінюється в залежності від куба середньої швидкості вітру. Швидкість ротора змінюється, щоб гарантувати, що λ підтримується на оптимальному рівні зі змінами швидкості вітру, щоб забезпечити виробництво максимальної потужності.

Тому можна з упевненістю сказати, що максимальна потужність може бути отримана, коли вітрогенератор працює з оптимальним співвідношенням обертів λ_{opt} та із лопатками ротора, які нахилені під оптимальним кутом β_{opt} . Таким чином, генерована потужність максимізується регулятором крутного моменту генератора τ_g , який досягає λ_{opt} і представлений як функція швидкості ротора, що описується виразом:

$$\tau_g = K\omega^2, \quad (2.3)$$

де K - аеродинамічна константа.

$$K = 0,5\rho\pi R^5 \frac{C_{p,opt}}{\lambda_{opt}^3}. \quad (2.4)$$

Коли швидкість вітру, що обертає вітрогенератор досягає номінального значення, вітрогенератор переходить до області 3. Область 3 часто розглядається як область повного навантаження. У цій області швидкість вітру знаходиться між номінальною та швидкістю відключеною, а контролер кута нахилу контролює обертання ротора на номінальній швидкості, тоді як вихід генератора видає номінальну потужність, як показано на рисунку 2.1.

На відміну від області 2, де метою керування є максимальна генерація електроенергії, бажаною метою керування в області 3 є обмеження генерації електроенергії. Це досягається шляхом обмеження як крутного моменту, так і частоти обертання ротора генератора вітрогенератора, щоб забезпечити отримання постійної номінальної потужності від вітру.

У цій області використовується пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД) керування з метою керування кроком лопаті для регулювання швидкості вітрогенератора за змінної швидкості вітру. У цьому випадку приріст $\Delta\theta$ до початкового кроку вітрогенератора визначається виразом:

$$\Delta\theta(s) = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{s\tau + 1} \right) \Delta\omega, \quad (2.5)$$

де $\Delta\omega$ - помилка швидкості обертання;

K_p - коефіцієнт пропорційної складової ПІД контролера;

K_I - коефіцієнт інтегральної складової ПІД контролера;

K_D - коефіцієнт диференційної складової ПІД контролера.

Вітрогенератори зазвичай призначені для роботи в екстремальних погодних умовах, але вони не розроблені для екстремальних швидкостей або моментів обертання. При дуже великих аеродинамічних моментах або швидкостях обертання сила, що діє на лопаті вітрогенератора, є величезною і може розірвати турбіну на частини.

Щоб уникнути цього, вітрогенератор завжди проектується з швидкістю вимикання, вище якої гальма сповільнять турбіну до зупинки. Однак, існує діапазон швидкості вітру, який обмежується швидкістю вимикання, де вітрогенератор використовує різні стратегії керування.

Ці стратегії керування використовуються, щоб вітрогенератор міг працювати при високій швидкості вітру, яка в іншому випадку може становити загрозу для вітрогенератора. Тому всі вітрогенератори розроблені з використанням методу контролю потужності.

Це може бути або контроль зриву потоку повітря із лопатів вітрогенератора, або контроль нахилу лопатів вітрогенератора. Контроль зриву потоку повітря із лопатів вітрогенератора буває як пасивним і активним.

Малі вітрогенератори розроблені для досягнення 20% номінальної потужності турбіни при 50-70% номінальній швидкості вітру. Це означає, що малий вітрогенератор може виробляти сприятливу потужність за нижчого діапазону швидкості вітру.

При вищій швидкості він може виробляти номінальну потужність, лише якщо вітрогенератор обертається з номінальною швидкістю. Система може працювати як вітрогенератор зі змінною швидкістю з перетворювачем частоти, але лише з двома фіксованими швидкостями. Цей принцип можна реалізувати шляхом підключення додаткового генератора або генератора зі зміною полюсів.

Щоб уникнути високої частоти перемикачів на межі між низькою швидкістю вітру та високою швидкістю вітру, забезпечується перекриття між двома умовами роботи.

2.2 Математична модель сонячної батареї гібридної сонячної електростанції

Фотоелектричні елементи виробляють електроенергію постійного струму безпосередньо, коли вони піддаються впливу сонячному світлу. Технічно фотоелемент - це р-п-перехід, що складається з кремнію. Ідеальний фотоелектричний елемент може виробляти 0,82 В без навантаження.

Це вказує на те, що багато таких комірок потрібно з'єднати паралельно, щоб отримати відповідну робочу напругу. Комірки з'єднують разом і розміщують на основі, яка покрита шаром скла. Така конструкція називається сонячною панеллю. На ринку доступні різні типи сонячних панелей, які характеризуються різними напругами холостого ходу (V_{oc}) та потужністю P .

Фізичні параметри фотоелектричної комірки визначають за допомогою еквівалентної схеми заміщення, яка зображена на рисунку 2.2.

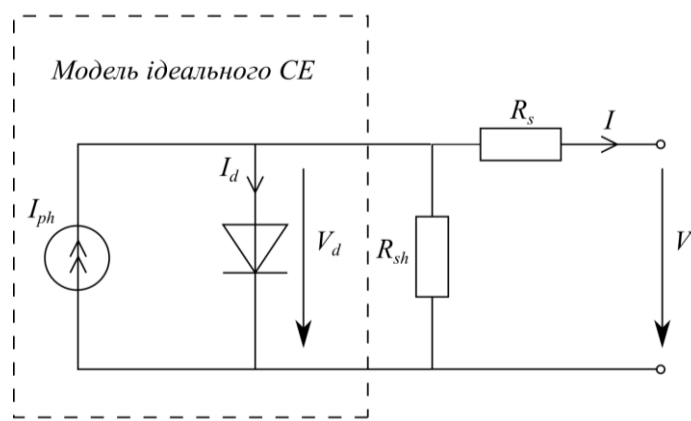


Рисунок 2.2 – Еквівалентної схеми заміщення фотоелектричної комірки

Струм, вироблений фотоелектричною коміркою I_{ph} , не повністю передається в навантаження через підключення діода паралельно комірці. Струм, який надходить від фотоелектричного елемента до навантаження, описується виразом:

$$I = I_{ph} - I_D, \quad (2.6)$$

Фотострум і струм, що протікає через діод, визначаються наступними рівняннями:

$$I_{ph} = e_0 \int_0^{\infty} \frac{Ed}{h}, \quad (2.7)$$

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{e_0 V}{KT_c}\right) - 1 \right]. \quad (2.8)$$

Замінивши значення I_D у (2.6), кінцевий вираз для струму, який надходить від фотоелектричного елемента до навантаження, можна записати у вигляді:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{e_0 V}{KT_c}\right) - 1 \right]. \quad (2.8)$$

На основі наведених вище рівнянь, співвідношення між напругою та струмом для змінного опромінення/постійної температури та постійного опромінення/змінної температури, показано на рисунку 2.3.

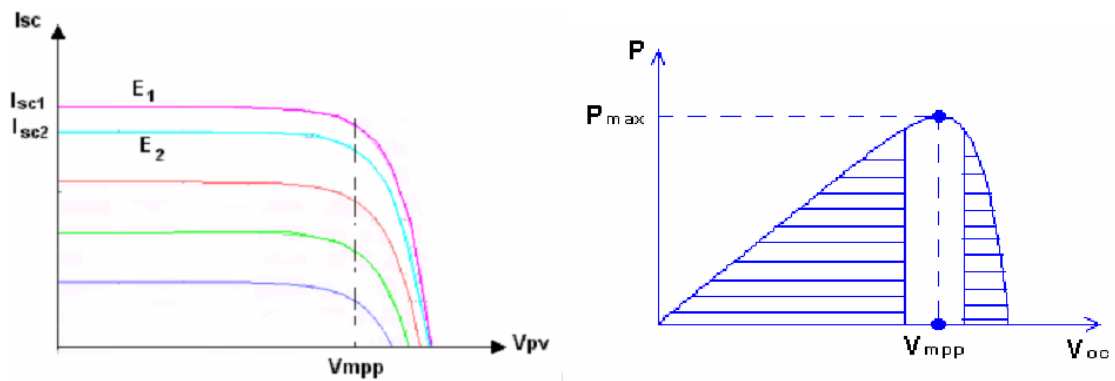


Рисунок 2.3 – Характеристики фотоелектричної комірки

2.3 Математична модель акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції

Акумуляторна батарея - це пристрій, який широко використовується майже у всіх електричних системах, де потрібне живлення або зберігання енергії. Акумуляторна батарея - це електрохімічний пристрій. Це означає, що форма енергії змінюється з електричної на хімічну і навпаки.

Енергія може накопичуватися або споживатися від акумулятора. Концепція системи електропостачання змінюється в бік децентралізованої системи. Децентралізована система складається з різних джерел енергії які постачають енергію навантаженню.

У гібридній сонячній електростанції акумуляторна батарея відіграє дуже важливу роль, іншими словами, це серце системи. Наприклад, робоча напруга фотоелектричного модуля визначається напругою акумуляторної батареї, вимикання/ввімкнення дизель-генератора визначається напругою акумуляторної батареї.

Ось чому модель акумуляторної батареї, яка буде використовуватися в такій системі, повинна бути сформульована таким чином, щоб керувати нелінійною, складною поведінкою. Складність моделі акумуляторної батареї залежить від галузі, де вона повинна бути реалізована.

Коли акумуляторна батарея заряджається або розряджається, струм протікає через внутрішній опір і конденсатори. Це спричиняє омичний спад і виділяє тепло. У той же час електроліт поляризується і викликає падіння напруги, яке називається перенапругою. В результаті напруга акумулятора буде відрізнятися від його рівноважної напруги. Ця різниця називається поляризацією. Математично поляризація - це сума двох частин: перенапруги та омичного спаду напруги.

Еквівалентна схема елемента акумуляторної батареї показана на рисунку 2.4.

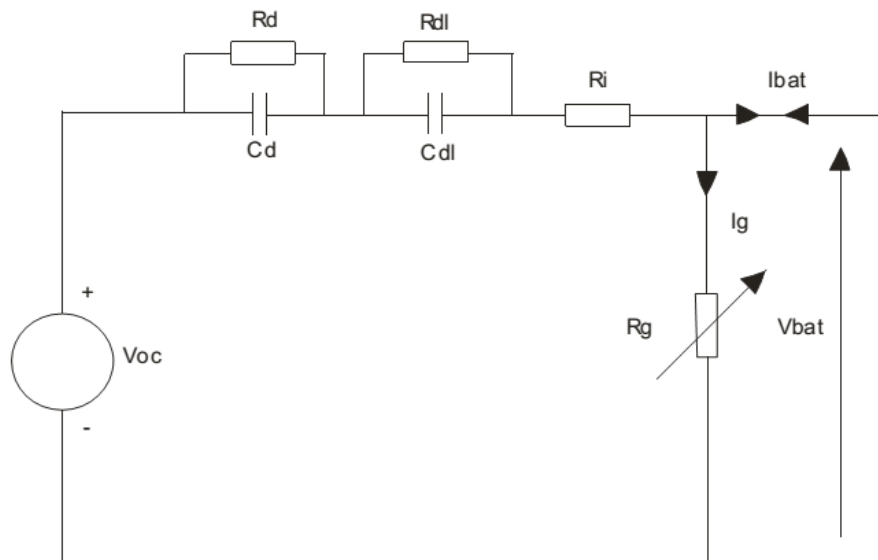


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема елемента акумуляторної батареї

На рисунку 2.4 наведені наступні позначення:

V_{oc} – напруга холостого ходу (внутрішня);

R_i – внутрішній опір;

C_{dl} – ємність подвійного електричного шару;

R_{dl} – опір подвійного електричного шару;

I_{bat} – струм акумуляторної батареї;

C_d – дифузійна ємність;

R_d – опір дифузії;

R_g – опір газоутворення;

V_{bat} – напруга акумуляторної батареї.

Внутрішній опір акумуляторної батареї R_i залежить від стану її заряду. Внутрішній опір акумуляторної батареї R_i залишається майже постійним до 90% стану її заряду, після чого експоненціально зростає.

Внутрішній опір акумуляторної батареї R_i є важливим параметром, оскільки під час процесу заряду або розряду цей параметр буде вищим і омичний спад буде більшим, тому втрати будуть більшими. Поведінка акумуляторної батареї під час заряду та розряду неоднакова, тому що внутрішній опір акумуляторної батареї R_i хімічних речовин неоднаковий. Це не омичний опір, тому його значення залежить від прикладеної напруги.

Конденсатори з подвійним електричним шаром базуються на принципі дії подвійного електричного шару, який утворюється на межі поділу між активованими металевими поверхнями (електродами) та електролітом. Принцип роботи конденсатора з подвійним електричним шаром показаний на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Принцип роботи конденсатора з подвійним електричним шаром

Електроди використовуються в твердому вигляді, а електроліт - в рідкому. Коли ці матеріали стикаються один з одним, позитивний і негативний полюси розподіляються відносно один одного на надзвичайно короткій відстані. Таке явище відоме як подвійний електричний шар. Коли прикладається зовнішнє електричне поле, утворюється подвійний електричний шар поблизу поверхні електроліту та поверхні рідини електроліту.

Фізична поведінка ємності подвійного електричного шару C_{dl} може бути описана каскадною RC-схемою, яка зображена на рисунку 2.6. Така складна структура потрібна лише для моделювання електрохімічних конденсаторів.

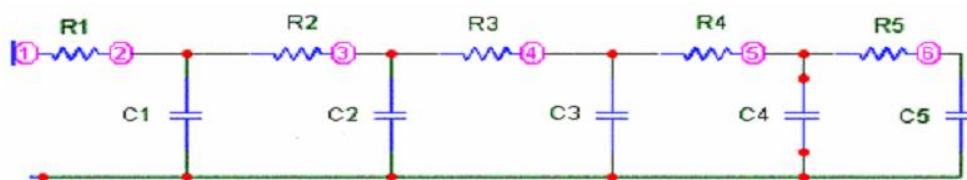


Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема заміщення ємності подвійного електричного шару C_{dl}

Одну модель ємності та опору електрохімічного конденсатора можна використовувати в багатьох програмах, як-от моделювання батареї. Для цільової батареї також була використана паралельна схема RC.

Під час процесу заряджання ємність подвійного електричного шару також заряджається експоненціально. Постійна часу RC-кола залежить від площі поверхні електрода, типу електрода, електроліту тощо. Напруга на цьому конденсаторі також впливає на напругу на клеммах акумулятора. Напруга на двошаровому конденсаторі також розряджається під час процесу розрядки. Постійна часу, яка пропорційна ємності батареї, лежить в діапазоні мс. У цій моделі параметри R і C можна змінювати відповідно до вимог.

Процес дифузії можна визначити як рух хімічних частинок (іонів або молекул) під впливом різниці концентрацій. Частинки рухатимуться із зони

високої концентрації до зони низької концентрації, поки концентрація не стане рівномірною на всій фазі. Дифузія в розчинах є найважливішим явищем в електрохімії, але дифузія також має місце в газах і твердих тілах. Швидкість дифузії (дифузійний потік) пропорційна градієнту концентрації в розчині, причому константа пропорційності називається «коефіцієнтом дифузії».

У випадку батареї розчин електроліту можна розділити на три окремі частини: основний розчин і два дифузійних шари на поверхні електродів, як показано на рисунку 2.7.

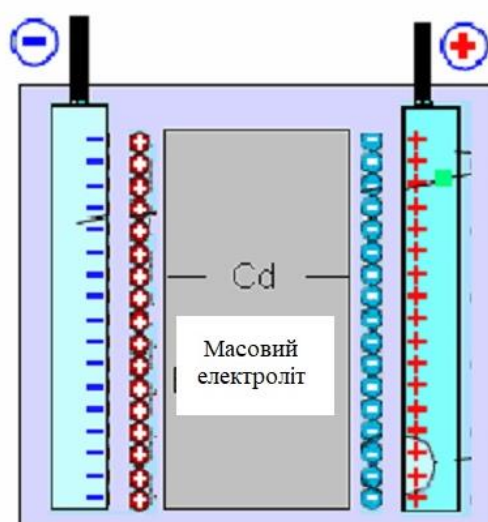


Рисунок 2.7 – Еквівалентна схема заміщення дифузійної ємності C_d

Концентрацію основного розчину можна вважати рівномірною. Перенесення речовин у цьому шарі відбувається лише через конвекцію, тоді як перенесення маси в дифузійному шарі можливе лише через дифузію. Два дифузійних шари несуть протилежні заряди (негативний і позитивний). Масовий електроліт поводить себе як діелектрик. Це означає, що комбінація трьох шарів створює ємнісний ефект, відомий як дифузійна ємність. Постійна часу RC-кола через дифузійну ємність набагато більша порівняно з ємністю подвійного шару. Постійна часу RC-кола через дифузійну ємність знаходиться в діапазоні годин.

Під час процесу перетворення енергії в акумуляторній батареї відбувається не тільки основна, але й побічні реакції. Якщо батарея заряджається швидше, ніж її номінальна швидкість заряду, батарея нагрівається сильніше, внаслідок чого на позитивній і негативній пластинах утворюються водень і кисень відповідно.

Причина газоутворення полягає в тому, що коли батарея заряджається швидше, процес перетворення енергії не може бути швидшим, ніж його ємність, тому відбуваються побічні реакції. Явище газоутворення виникає, навіть якщо батарею заряджено на номінальній швидкості.

Коли напруга на клеммах батареї перетинає початкову напругу (також відому як напруга газоутворення), процес газоутворення починається всередині батареї. У електричному еквіваленті явище газоутворення можна промодельовувати струмом, відомим як струм газоутворення. Як показано на рисунку 2.8, коли батарея заряджена, внутрішня напруга відповідно зростає, а також зростає напруга на клеммах.

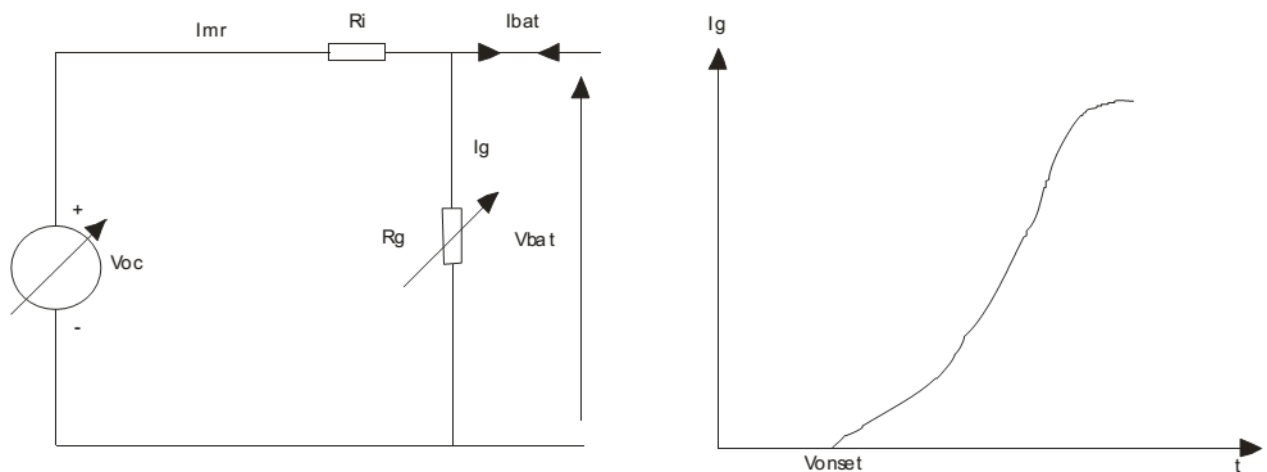


Рисунок 2.8 – Опір і струм газоутворення

Початкову напругу можна порівняти з напругою прямого зсуву діода. Якщо напруга на діоді перетинає це значення, струм газоутворення протікає

через R_g . З часом опір газоутворення експоненціально зменшується, а струм газоутворення експоненціально зростає.

Це означає, що головний струм реакції (I_{mr}), який перетворює електричну енергію в хімічну, відповідно зменшується. Нарешті струм повної зарядки стає струмом газоутворення. На цьому етапі подальше збільшення внутрішньої напруги стає неможливим.

Проста модель як накопичувач: у такій моделі акумуляторна батарея розглядається лише як накопичувач енергії з певною ефективністю. Такої моделі може бути достатньо для багатьох застосувань, але вона має багато недоліків.

Не враховуються багато умов акумуляторної батареї, критичних для сумісної роботи. Стани заряду, напруга на клеммах, виділення газу та втрати води не враховуються. Ці умови мають вирішальне значення для заряджання, розряджання або від'єднання батареї. Єдина перевага полягає в тому, що модель проста. Для аналізу балансу потужностей така модель може бути корисною.

У другому підході напруга на клеммах батареї визначається на основі струму акумуляторної батареї (який може бути позитивним або негативним) або стану заряду. Цей підхід більш складний у порівнянні з першим. Акумуляторна батарея розглядається як опір, який змінюється залежно від стану заряду акумуляторної батареї.

Зміна поведінки опору різна під час процесу заряджання та розряджання. Це пов'язано з тим, що протікають різні хімічні реакції. Різниця в опорі залежить від типу та ємності акумуляторної батареї. Таку модель можна використовувати в гібридній сонячній електростанції до певного рівня, оскільки визначені терміни, важливі для комбінованої нефункціональності.

Але у такій моделі є одна межа. Вона розглядає акумуляторну батарею як однорідний фізичний пристрій; хоча насправді поведінка акумуляторної батареї є нелінійною через багато побічних реакцій, таких як розшарування електроліту та старіння.

Модель Шеферда є найвідоміша і найчастіше використовується для моделювання акумуляторної батареї. Модель описує електрохімічну поведінку батареї безпосередньо в термінах напруги та струму.

Модель Шеферда часто використовують у поєднанні з рівнянням Пейкерта, щоб отримати напругу акумуляторної батареї та рівень заряду. Напруга на клемі акумуляторної батареї визначається виразом:

$$E_t = E_0 - R_i \cdot I - K_i \frac{Q}{Q - f}, \quad (2.9)$$

де E_t - напруга на клемі акумуляторної батареї;

E_0 - напруга холостого ходу комірки акумуляторної батареї, коли вона повністю заряджена;

R_i - внутрішній (омічний) опір акумуляторної батареї;

K_i - поляризаційний опір акумуляторної батареї;

Q - ємність акумуляторної батареї;

I - миттєвий струм акумуляторної батареї;

$f = \int IdT / Q_0$ - накопичені ампер-години, поділені на повну ємність акумуляторної батареї.

За допомогою рівняння Пейкерта можна визначити дробовий стан заряду акумуляторної батареї. Рівняння Пейкерта встановлює залежність між струмом розряду та часом розряду постійним струмом. Можливий час розряду зменшується зі збільшенням розрядного струму. Рівняння Пейкерта описується виразом:

$$Q = I^n \cdot T_i, \quad (2.10)$$

де I - розрядний струм;

n - константа акумуляторної батареї ($n=1,35$ для типових свинцево-кислотних акумуляторних батарей);

T_i - час до розряду при струмі I .

Перевагою цієї моделі є її простота і вона складається з невеликої кількості рівнянь. Недоліком є те, що вона не враховує інші параметри, які також відіграють важливу роль при роботі акумуляторної батареї. Наприклад, зміна внутрішнього опору акумуляторної батареї відносно її стану заряду не враховується.

2.4 Математична модель дизельного генератора гібридної сонячної електростанції

Дизель генератор складається з трьох основних частин: дизельного двигуна, синхронного генератора та системи збудження у відповідності до рисунка 2.9.

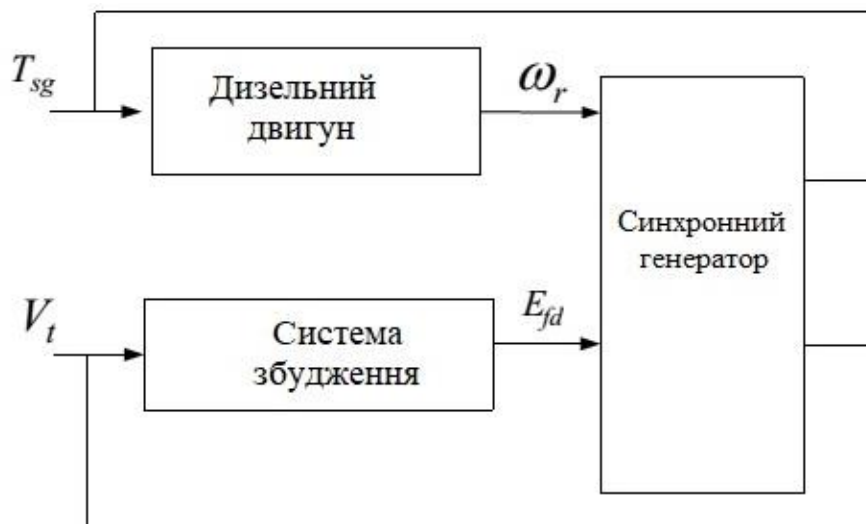


Рисунок 2.9 – Структурна схема дизель генератора

Загальна структура моделі дизельного двигуна, яка зображена на рисунку 2.10, складається з чотирьох основних підмоделей: контролера швидкості, перетворювача напруга/струм, виконавчого механізму, двигуна та маховика.

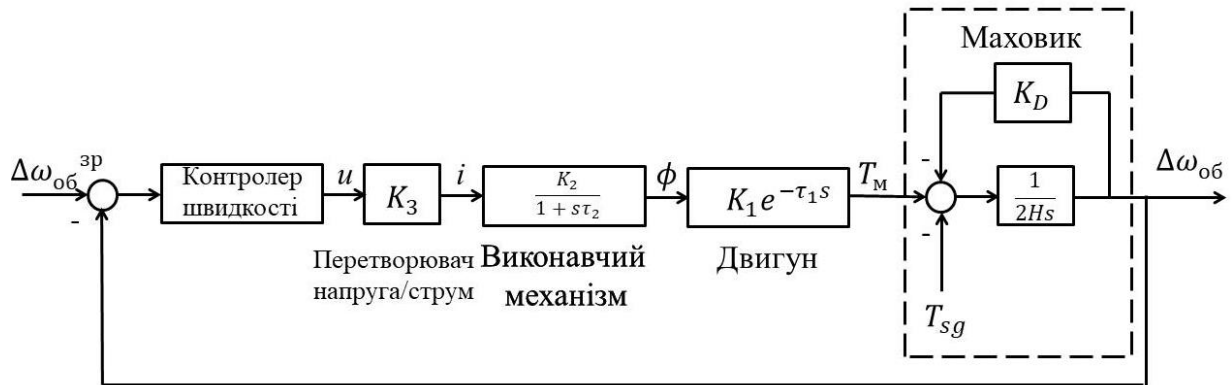


Рисунок 2.10 – Загальна структура моделі дизельного двигуна

Контролер швидкості складається зі стандартного ПІД-регулятора швидкості. Перетворювач напруга/струм перетворює напругу на виході ПІД-регулятора в значення струму, який надходить до приводу із коефіцієнтом передачі K_3 .

Блок виконавчий механізм має вигляд системи регулятора (приводу) дизеля. Регулятор можна визначити як механічний або електромеханічний пристрій для керування швидкістю двигуна автоматично, залежно від споживання палива.

Вхідний збуджувальний струм i контролює положення паливної рами, що, у свою чергу, визначає кількість палива ϕ , яке буде впорснуто в камеру згоряння. Виконавчий механізм представлений функцією фазової затримки першого порядку, яка характеризується коефіцієнтом підсилення K_2 і змінною постійною часу τ_2 .

У нашому випадку K_2 – це постійна виконавчого механізму, яка вважається фіксованою, а τ_2 – постійна часу виконавчого механізму, яка є складною

функцією температури палива. Для простоти зміна параметрів ігнорується, а τ_2 вважається постійною.

Блок двигун містить систему згоряння дизельного двигуна. Впорснуте паливо запалюється стисненим гарячим повітрям у камері згоряння, викликаючи рух поршня під час силових тактів. Ця дія приводить в рух колінчастий вал, тому створюється механічний крутний момент T_m .

Для моделювання система згоряння двигуна представлена як постійний крутний момент двигуна з елементом мертвого часу τ_1 , який є результатом наявності кількох циліндрів. Для кожного окремого циліндра це, по суті, два компоненти. Затримка займання - це час, який необхідний паливно-повітряній суміші для досягнення точки згоряння при конкретній робочій температурі та тиску; можна показати, що він має гіперболічну зміну з відхиленням швидкості.

Затримка робочого ходу - це час, який мине від збурення навантаження до моменту, коли конкретний циліндр двигуна реагує на збурення. Ця затримка є випадковою і залежить від значення кута кривошипа, при якому виникає збурення навантаження.

Його ефект можна зменшити, збільшивши кількість циліндрів. Оскільки для конкретного збурення навантаження час, після якого циліндри спрацьовують, зменшується обернено швидкості, його можна наближено визначити оберненою функцією швидкості. Мертвий час τ_1 двигуна є функцією відхилення швидкості $\Delta\omega_{об}$ через нелінійну функцію:

$$\tau_1 = \frac{A\Delta\omega_{об}^2 + B\Delta\omega_{об} + C}{\Delta\omega_{об}^2}, \quad (2.11)$$

де A , B і C - параметри, які визначаються методами підгонки кривих для відтворення емпірично визначених кривих.

Блок маховик містить систему обертання, тому він містить динаміку інерції двигуна, маховик, коефіцієнт демпфування K_D і навантажений генератор. Тоді рівняння механічного руху:

$$2H \frac{d\Delta\omega_{об}}{dt} = T_m - T_{sg} - K_D \Delta\omega_{об}, \quad (2.12)$$

де H - постійна інерції;

$\Delta\omega_{об}$ - зміна кутової швидкості обертання;

T_m - механічний крутний момент;

T_{sg} - крутний момент генератора;

K_D - коефіцієнт демпфування.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega_{об}, \quad (2.13)$$

де δ - кут обертання;

ω_0 - номінальна кутова частота генератора.

Рівняння синхронного генератора отримано з перетворення Парка. Найважливішим спрощенням є те, що перехідними процесами статора нехтують, оскільки вони набагато швидші порівняно ніж роторні. Ротор синхронного генератора складається з трьох обмоток. Поле та демпфіруюча обмотка розглядаються на прямій осі, щоб врахувати перехідну та субперехідну поведінку відповідно на цій осі.

При цьому на квадратурній осі розглядається демпфіруюча обмотка.

Фазор напруги на клемі визначається $V_t = V_d + jV_q$, який можна оцінити за допомогою:

$$V_d = E_d - R_s I_d + X_q I_q, \quad (2.14)$$

$$V_q = E_q - R_s I_q + X_d I_d, \quad (2.15)$$

де R_s - опір арматури;

I_d, I_q - струми, які протікають в обмотці статора;

X_d, X_q - субперехідні реактивні опори d і q.

Існує додатковий елемент зворотного зв'язку від генератора до дизельного двигуна, заданий електромагнітним моментом, який у режимі маховика можна оцінити за допомогою:

$$T_{sg} = E_d I_d + E_q I_q - (X_d - X_q) I_d I_q. \quad (2.16)$$

Висновки до другого розділу

1. У відповідності до будови гібридної сонячної електростанції, математична модель гібридної сонячної електростанції містить математичні моделі усіх блоків, що входять до складу гібридної сонячної електростанції.

2. На генерування електричної енергії вітрогенератором впливає зміна швидкості вітру. У вітрогенераторі керування можливе тільки в одному напрямку, а саме, можна зменшити потужність вітрогенератора або контролювати на її певному рівні, якщо генерування електричної енергії вітрогенератором перевищує потужність навантаження.

3. Фотоелектричні елементи виробляють електроенергію постійного струму безпосередньо, коли вони піддаються впливу сонячному світлу. Технічно фотоелемент - це р-п-перехід, що складається з кремнію. Ідеальний фотоелектричний елемент може виробляти 0,82 В без навантаження.

4. У гібридній сонячній електростанції акумуляторна батарея відіграє дуже важливу роль, іншими словами, це серце системи. Наприклад, робоча напруга

фотоелектричного модуля визначається напругою акумуляторної батареї, вимикання/ввімкнення дизель-генератора визначається напругою акумуляторної батареї.

5. Загальна структура моделі дизельного двигуна складається з чотирьох основних підмоделей: контролера швидкості, виконавчого механізму, двигуна та маховика.

6. Контролер швидкості дизельного двигуна складається зі стандартного ПД-регулятора швидкості. Перетворювач напруга/струм перетворює напругу на виході ПД-регулятора в значення струму, який надходить до приводу із коефіцієнтом передачі КЗ.

3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЛОКІВ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1 Імітаційна модель вітрогенератора гібридної сонячної електростанції

Вітрогенератор гібридної сонячної електростанції під'єднується до трифазної мережі змінного струму. Вітрогенератор гібридної сонячної електростанції забезпечує активну потужність, якщо швидкість вітру перевищує швидкість вмикання $V_b=3$ м/с.

Вітрогенератор гібридної сонячної електростанції моделюється на основі способу під'єднання до мережі, який зображено на рисунку 3.1.

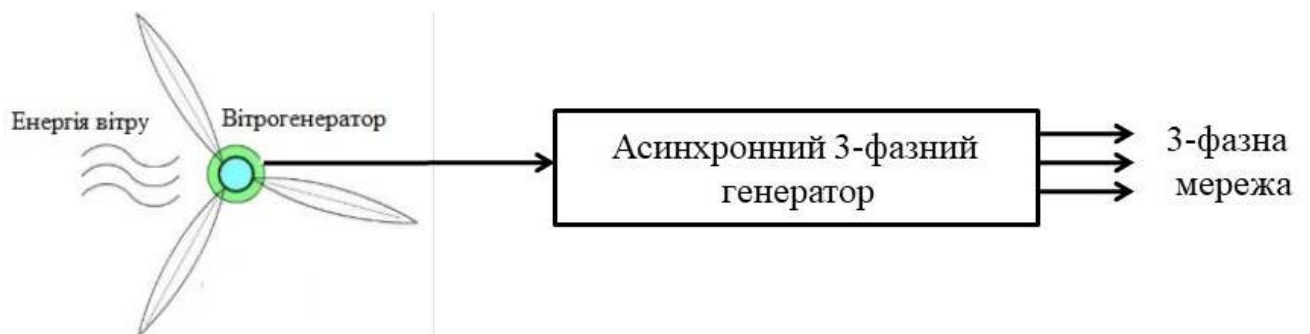


Рисунок 3.1 – Під'єднання до мережі вітрогенератора гібридної сонячної електростанції

Він складається з вітрової турбіни, 3-фазного асинхронного генератора, вітряної системи та механізму керування, як показано на рисунку 3.2.

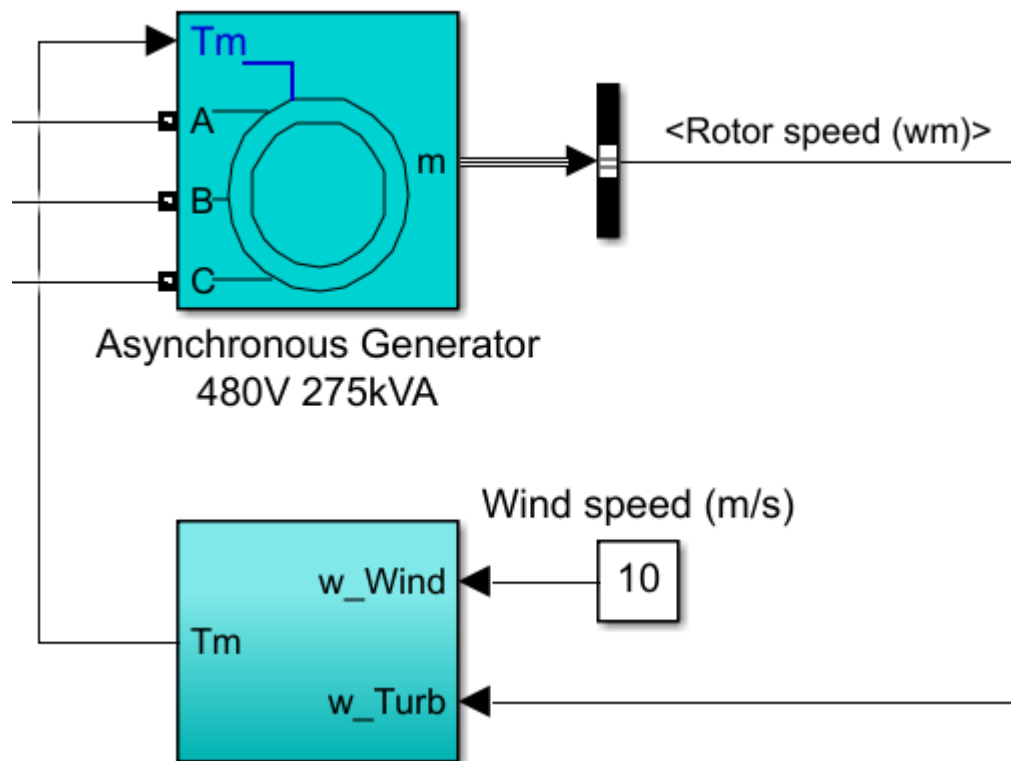


Рисунок 3.2 – Імітаційна модель вітрогенератора гібридної сонячної електростанції

Робоча поведінка моделі перевіряється шляхом підключення її до мережі при зміні швидкості вітру. Для моделювання виберемо вітрогенератор гібридної сонячної електростанції потужністю $P_{ном}=275$ кВт. Характеристики вітрогенератора гібридної сонячної електростанції наведені на рисунку 3.3.

Аналіз характеристик вітрогенератора гібридної сонячної електростанції, які зображені на рисунку 3.3 показує, що робочий діапазон швидкості вітру лежить в межах від $V_{min}=5$ м/с до $V_{max}=12$ м/с. По осі X змінюється частота

обертання 3-фазного асинхронного генератора вітрогенератора гібридної сонячної електростанції від $N_{\min}=500$ об/хв до $N_{\max}=3000$ об/хв.

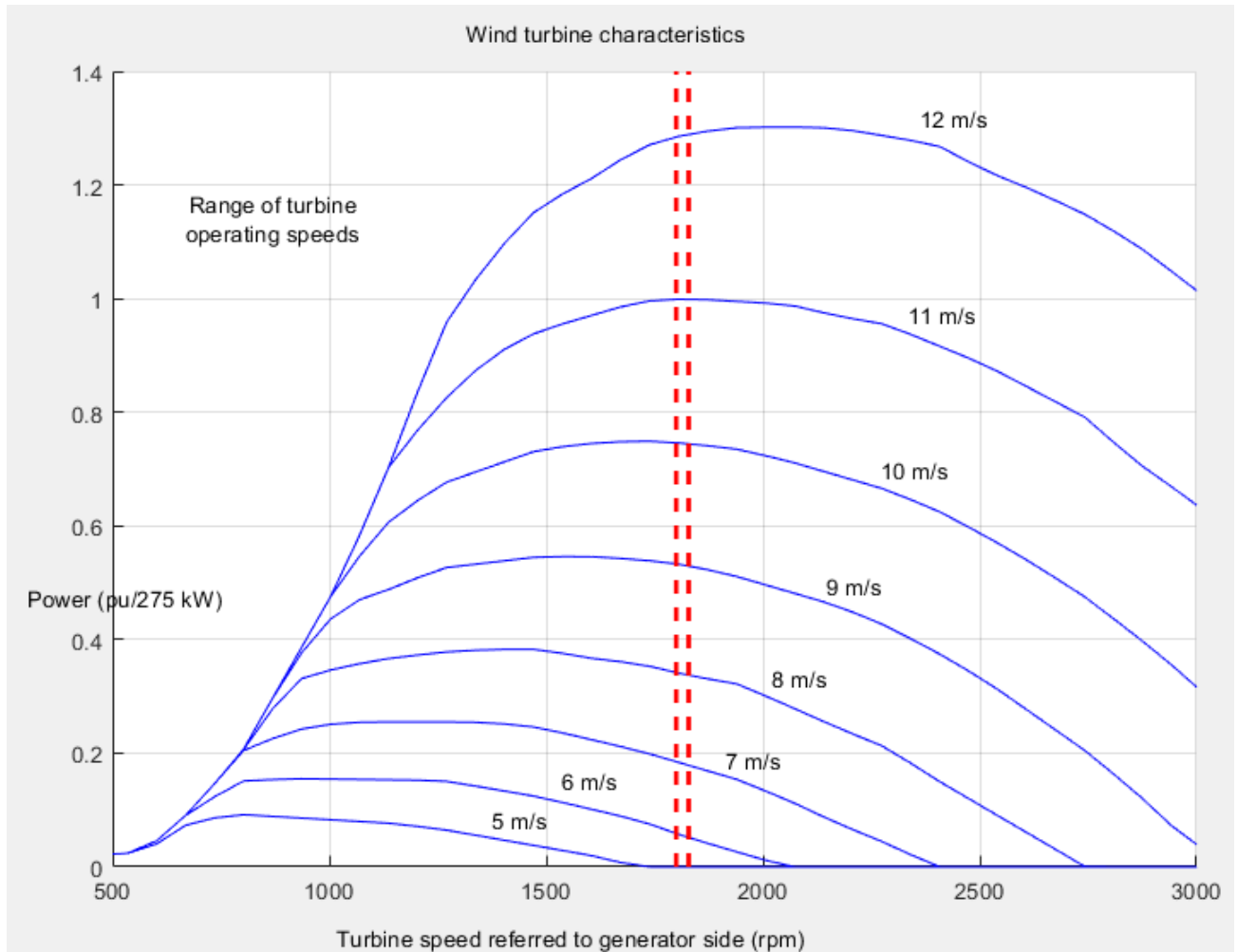


Рисунок 3.3 – Характеристики вітрогенератора гібридної сонячної електростанції

По осі Y змінюється співвідношення потужності на виході 3-фазного асинхронного генератора вітрогенератора гібридної сонячної електростанції до номінальної його потужності $P_{\text{ном}}=275$ кВт від $P/P_{\text{ном}}=0,1$ (при $P=27,5$ кВт) до $P/P_{\text{ном}}=1,3$ (при $P=357,5$ кВт).

У відповідності до імітаційної моделі вітрогенератора гібридної сонячної електростанції, яка зображена на рисунку 3.2, на вхід блоку вітрогенератора

гібридної сонячної електростанції поступає два параметри: швидкість вітру $w_{Wind}=10$ м/с та частота обертання 3-фазного асинхронного генератора вітрогенератора гібридної сонячної електростанції w_{Turb} .

На рисунку 3.4 зображена структура блоку вітрогенератора гібридної сонячної електростанції.

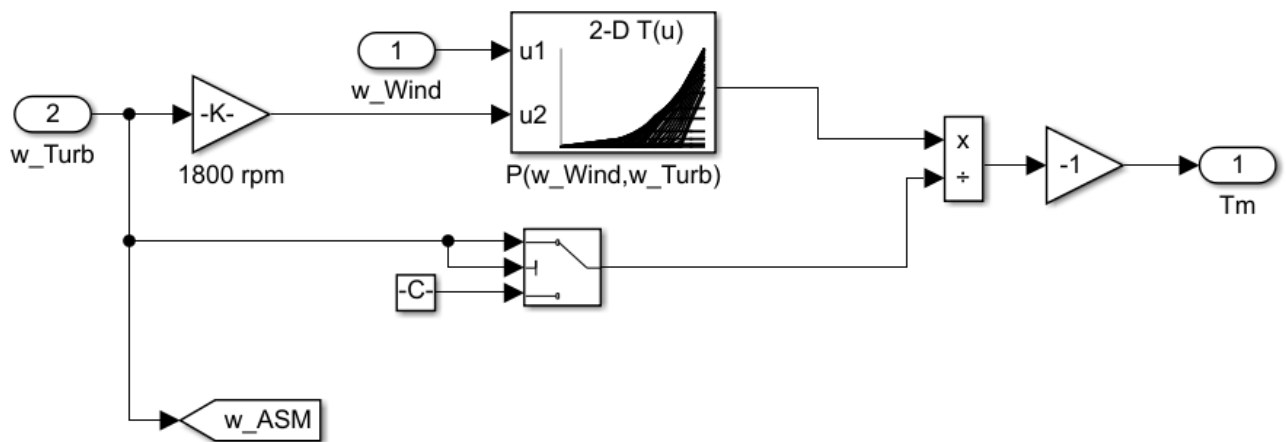


Рисунок 3.4 – Структура блоку вітрогенератора гібридної сонячної електростанції

Основою блоку вітрогенератора гібридної сонячної електростанції є функція $P(w_{Wind}, w_{Turb})$, яка здійснює апроксимацію характеристик вітрогенератора гібридної сонячної електростанції (рисунок 3.3). На виході блоку вітрогенератора гібридної сонячної електростанції отримуємо механічний момент T_m , який поступає на вхід 3-фазного асинхронного генератора потужністю $P_{ном}=275$ кВт та номінальною напругою $U_{ном}=480$ В.

В якості імітаційної моделі 3-фазного асинхронного генератора виберемо стандартну імітаційну модель асинхронної машини, яка знаходиться в бібліотеці Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Electrical Machines програмного забезпечення Matlab Simulink і зображена на рисунку 3.5.

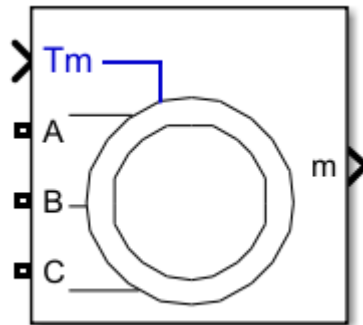


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель трифазної асинхронної машини (асинхронна машина) із бібліотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Electrical Machines

Імітаційна модель асинхронної машини моделює трифазну асинхронну машину з короткозамкненим ротором. Обмотки статора і ротора з'єднані зіркою з внутрішньою нейтральною точкою.

Імітаційна модель працює в режимі генератора або двигуна. Режим роботи визначається знаком механічного крутного моменту: якщо механічний крутний момент T_m додатній, машина працює як двигун, а якщо механічний крутний момент T_m від'ємний, машина працює як генератор.

У випадку вітрогенератора гібридної сонячної електростанції механічний крутний момент T_m є від'ємним і машина працює як генератор.

Імітаційна модель асинхронної машини реалізована у вигляді моделі простору станів четвертого порядку, а механічна частина реалізована системою другого порядку. Параметри імітаційної моделі асинхронної машини для моделювання 3-фазного асинхронного генератора потужністю $P_{ном}=275$ кВт та номінальною напругою $U_{ном}=480$ В, показані на рисунку 3.6.

Block Parameters: Asynchronous Generator 480V 275kVA

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]: [275e3, 480, 60]

Stator resistance and inductance [Rs,Lls] (pu): [0.016,0.06]

Rotor resistance and inductance [Rr',Llr'] (pu): [0.015,0.06]

Mutual inductance Lm (pu): 3.5

Inertia constant, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]: [2,0,2]

Initial conditions

[slip, th(deg), ia,ib,ic(pu), pha,phb,phc(deg)]:

[-8.89496e-048 0 0.280896 0.280896 0.280896 -89.7425 150.258 30.2575]

Simulate saturation Plot

[i; v] (pu): [0 0 ; 0 0]

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.6 – Параметри імітаційної моделі асинхронної машини для моделювання 3-фазного асинхронного генератора потужністю $P_{ном}=275$ кВт та номінальною напругою $U_{ном}=480$ В

3.2 Імітаційна модель сонячної батареї гібридної сонячної електростанції

В якості імітаційної моделі сонячної батареї гібридної сонячної електростанції виберемо стандартну імітаційну модель PV масив, яка знаходиться в бібліотеці Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources програмного забезпечення Matlab Simulink і зображена на рисунку 3.7.

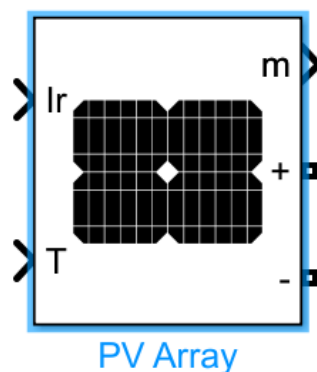


Рисунок 3.7 – Стандартна імітаційна модель PV масив із бібліотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources

Блок PV Array реалізує масив фотоелектричних (PV) модулів. Масив складається з рядків модулів, з'єднаних паралельно, кожен рядок складається з модулів, з'єднаних послідовно. Цей блок дозволяє моделювати попередньо встановлені фотоелектричні модулі з моделі System Advisor Національної лабораторії відновлюваної енергії (NREL), а також фотоелектричні модулі, які може визначити користувач.

Блок PV Array - це п'ятипараметрична модель, яка використовує джерело фотоструму (I_L), діод, послідовний опір (R_s) і шунтовий опір (R_{sh}) для представлення залежних від опромінення та температури ВАХ модулів.

Стандартна імітаційна модель PV масив із бібліотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources має два входи: на вхід один I_g подається величина сонячного опромінювання, а на вхід два T подається величина температури PV масиву.

Для моделювання задамо PV масив, який складається з 88 паралельних рядків. Кожний рядок складається з 7 послідовно з'єднаних модулів SunPower SPR-415E, як зображено на рисунку 3.8.

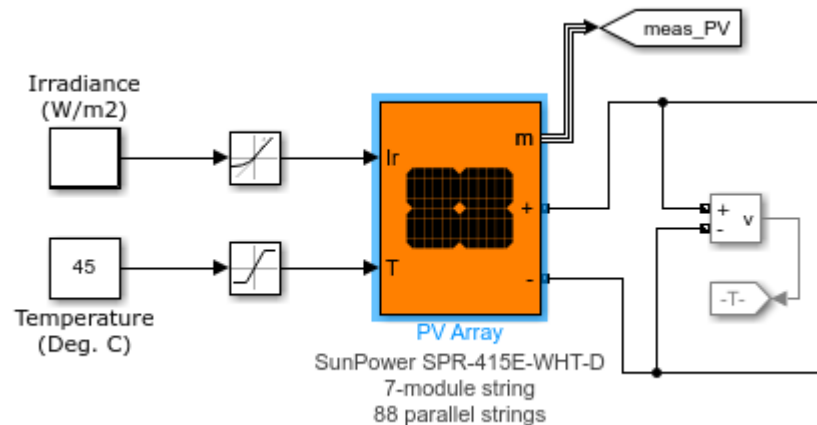


Рисунок 3.8 – Імітаційна модель PV масив із 88 паралельних рядків та 7 послідовно з'єднаних модулів SunPower SPR-415E у кожному рядку

Початкове вхідне опромінення моделі PV масив становить 1000 Вт/м^2 , а робоча температура становить $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Коли досягається усталений режим

(приблизно $t=0,15$ с), отримуємо напругу PV (V_{dc_mean}) 481 В, а потужність (P_{dc_mean}) PV масив становить 236 кВт. Ці значення дуже добре відповідають очікуваним значенням із специфікацій виробника фотоелектричних модулів.

Параметри імітаційної моделі сонячної батареї гібридної сонячної електростанції, показані на рисунку 3.9.

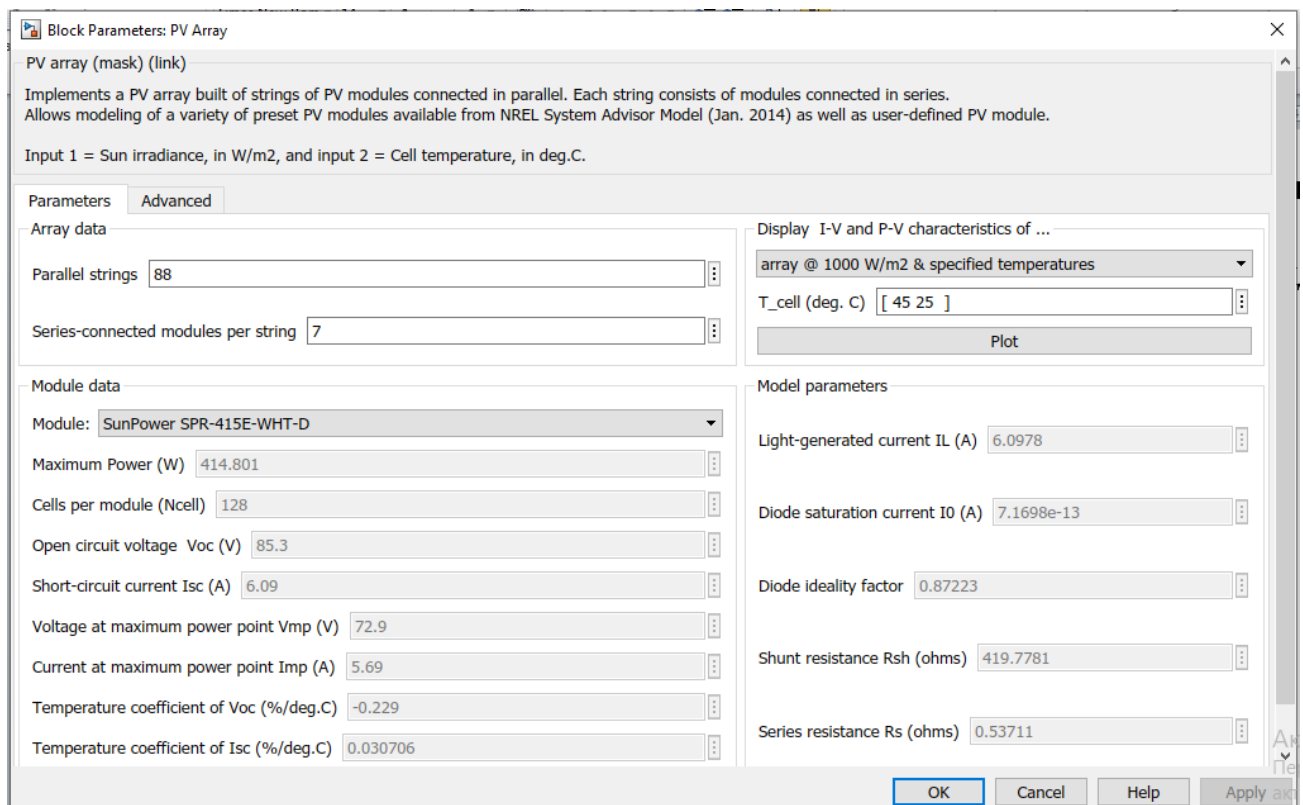


Рисунок 3.9 – Параметри імітаційної моделі сонячної батареї гібридної сонячної електростанції

Вольт-амперні та вольт-ватні характеристики імітаційної моделі сонячної батареї гібридної сонячної електростанції зображені на рисунку 3.10.

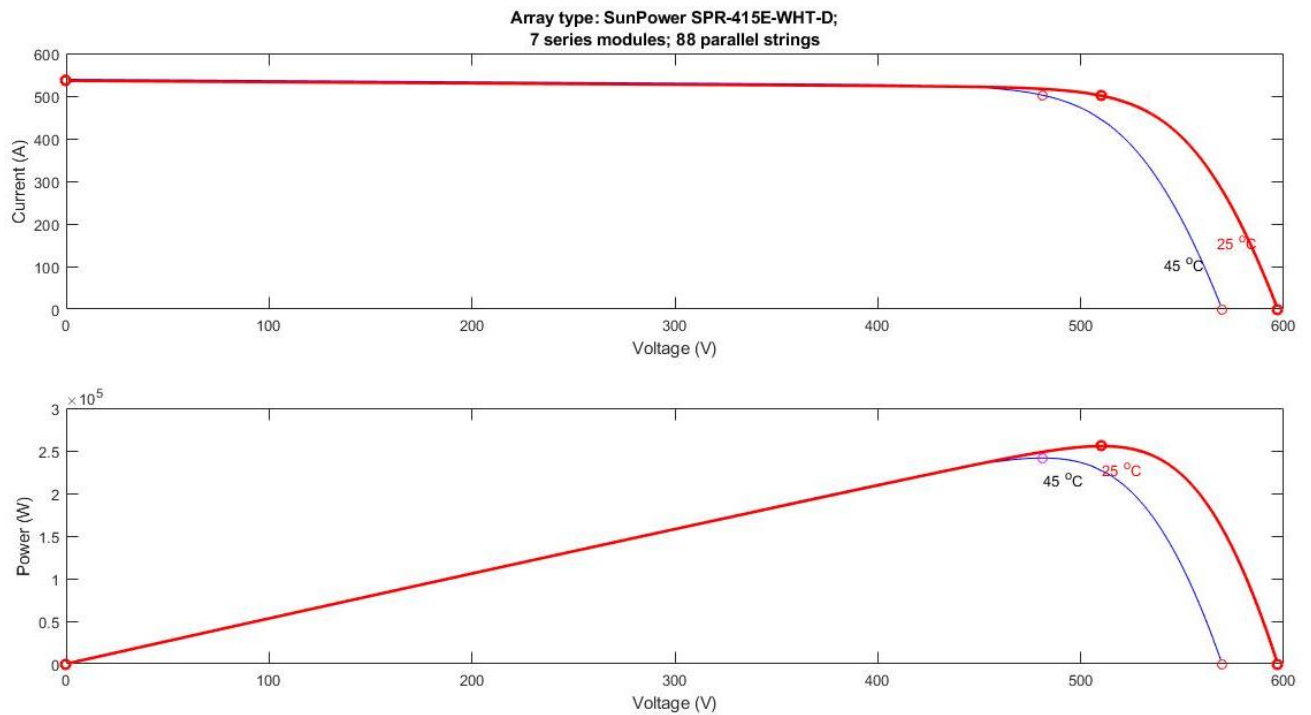


Рисунок 3.10 – Вольт-амперні та вольт-ватні характеристики імітаційної моделі сонячної батареї гібридної сонячної електростанції

Результати імітаційного моделювання сонячної батареї гібридної сонячної електростанції при двох рівнях сонячного опромінення PV масиву 1000 Вт/м^2 та 200 Вт/м^2 , а також температурі $45 \text{ }^\circ\text{C}$, зображені на рисунку 3.11.

Аналізуючи графіки зміни рівнях сонячного опромінення, напруги та потужності PV масиву, які зображені на рисунку 3.11, можна зробити висновок, що при рівні сонячного опромінення PV масиву 1000 Вт/м^2 отримуємо напругу PV (V_{dc_mean}) 481 В та потужність (P_{dc_mean}) PV масиву 236 кВт.

Коли рівень сонячного опромінення PV масиву зменшується до 200 Вт/м^2 , напругу PV (V_{dc_mean}) зменшується до 464 В, а потужність (P_{dc_mean}) PV масиву зменшується до 46,7 кВт.

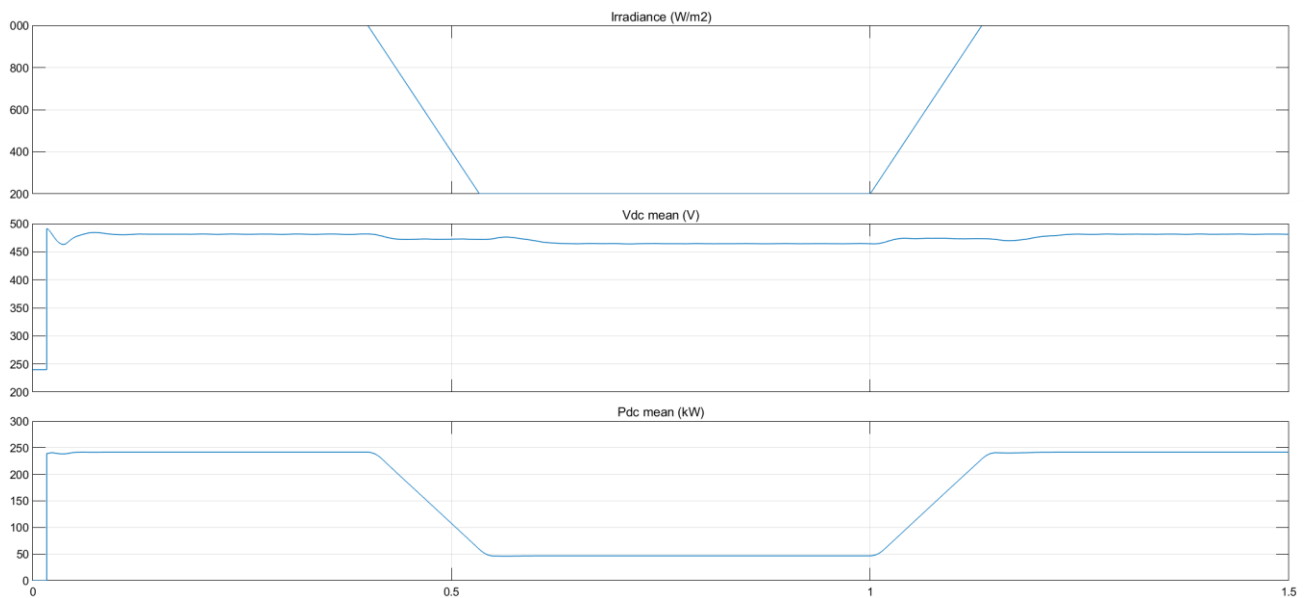


Рисунок 3.11 – Результати імітаційного моделювання сонячної батареї гібридної сонячної електростанції при двох рівнях сонячного опромінення PV масиву 1000 Вт/м^2 та 200 Вт/м^2 , а також температурі $45 \text{ }^\circ\text{C}$

3.3 Імітаційна модель акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції

В якості імітаційної моделі акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції виберемо стандартну імітаційну модель Battery (батарея), яка знаходиться в бібліотеці Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources програмного забезпечення Matlab Simulink і зображена на рисунку 3.12.

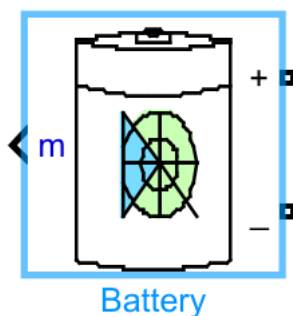


Рисунок 3.12 – Стандартна імітаційна модель Battery (батарея) із бібліотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources

Блок Battery (батарея) моделює найпопулярніші типи акумуляторних батарей: свинцево-кислотні, літій-іонні, нікель-кадмієві та нікель-метал-гідридні батареї. Розглянемо еквівалентну схему заміщення блоку Battery (батарея), яка зображена на рисунку 3.13.

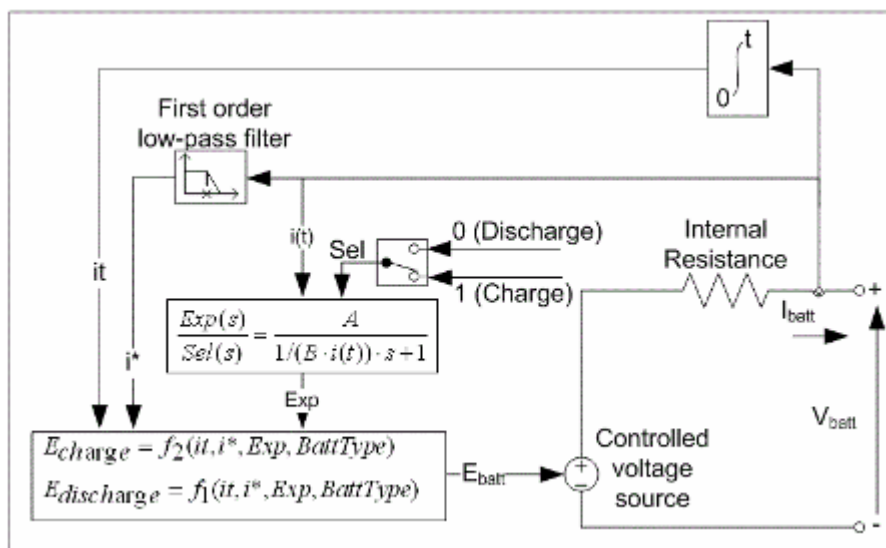


Рисунок 3.13 – Еквівалентна схема заміщення блоку Battery (батарея)

В процесі використання блоку Battery (батарея), параметри її еквівалентної схеми заміщення можуть бути змінені для моделювання конкретного типу батареї та її характеристик розряду. Відомо, що типова розрядна крива батареї складається з трьох ділянок, які зображені на рисунку 3.14.

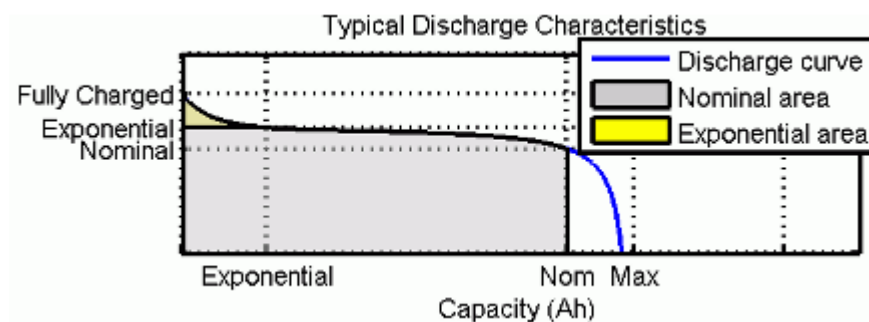


Рисунок 3.14 – Типова розрядна крива батареї

Перша ділянка відображає експоненціальне падіння напруги під час заряджування батареї. Ширина цієї ділянки залежить від типу батареї. Друга ділянка відображає заряд, який можна отримати від батареї, поки напруга не впаде нижче номінальної напруги батареї.

Третя ділянка відображає повний розряд батареї, коли напруга швидко падає. Коли струм батареї від'ємний, батарея перезаряджається відповідно до характеристики заряду. На рисунку 3.15 зображено зарядні характеристики свинцево-кислотної та літій-іонної батареї, а також нікель-метал-гідридної батареї.

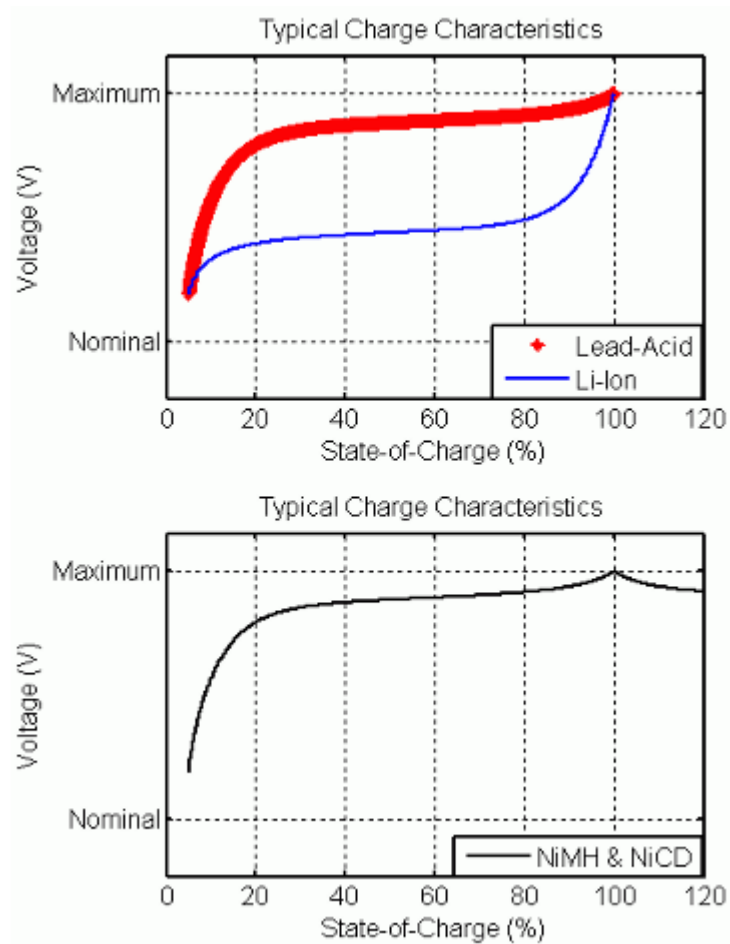


Рисунок 3.15 – Типова зарядні характеристики свинцево-кислотних, літій-іонних та нікель-метал-гідридних батарей

З характеристик розряду отримують параметри моделі блоку Battery (батарея). Розрядні та зарядні характеристики блоку Battery (батарея) вважаються однаковими.

Для відображення явища гістерезису для свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих (NiCD) та нікель-метал-гідридних (NiMH) батарей під час циклів заряджання та розряджання, використовується передавальна характеристика $Exp(s)$.

Якщо батареї заряджається, то її експоненційна напруга зростає, незалежно від стану заряду батареї. А якщо батарея розряджається, експоненціальна напруга миттєво зменшується у відповідності до рисунка 3.16.

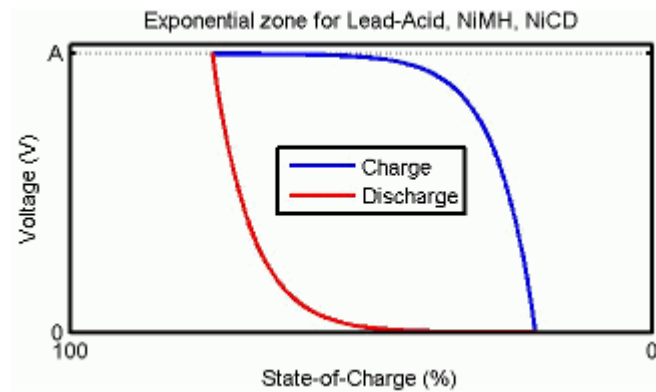


Рисунок 3.16 – Експоненційна ділянка свинцево-кислотних, нікель-метал-гідридних та нікель-кадмієвих батарей

Міра заряду батареї, яка виражена у відсотках від повного заряду, називають ступінню заряду батареї (SOC). Глибина розряду (DOD) є чисельним доповненням SOC, таким чином, що $DOD = 100\% - SOC$.

Наприклад:

- якщо $SOC = 100\%$, то батарея повністю заряджена, а $DOD = 0\%$;
- якщо $SOC = 75\%$, то батарея заряджена на $3/4$, а $DOD = 25\%$;
- якщо $SOC = 50\%$, то батарея заряджена на $1/2$, а $DOD = 50\%$;
- якщо $SOC = 0\%$, то акумулятор має 0 заряду, а $DOD = 100\%$.

В якості напруги гібридної сонячної електростанції була обрана напруга 480 В. Розрахуємо кількість свинцево-кислотних акумуляторів на номінальну

напругу $U_{ак}=12$ В, що б загальна напруга акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції дорівнювала $U_{б}=480$ В.

$$N = \frac{U_{б}}{U_{ак}} = \frac{480}{12} = 40. \quad (3.1)$$

У відповідності до виразу (3.1), необхідна кількість акумуляторів для досягнення загальної напруги акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції $U_{б}=480$ В дорівнює $N=40$. Оберемо акумулятори із ємністю окремого акумулятора $C_{ак} = 100 \text{ А} \cdot \text{год}$. Тоді загальна ємність всієї акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції визначається виразом:

$$C_{б} = N \cdot C_{ак} = 40 \cdot 100 = 4000 \text{ А} \cdot \text{год}. \quad (3.2)$$

Задамо параметри імітаційної моделі акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції у відповідності до рисунку 3.17. Враховуючи, що були обрані акумулятори із ємністю окремого акумулятора $C_{ак} = 100 \text{ А} \cdot \text{год}$, задамо розрядний струм для імітаційної моделі акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції $I_p = 100 \text{ А}$, як показано на рисунку 3.18.

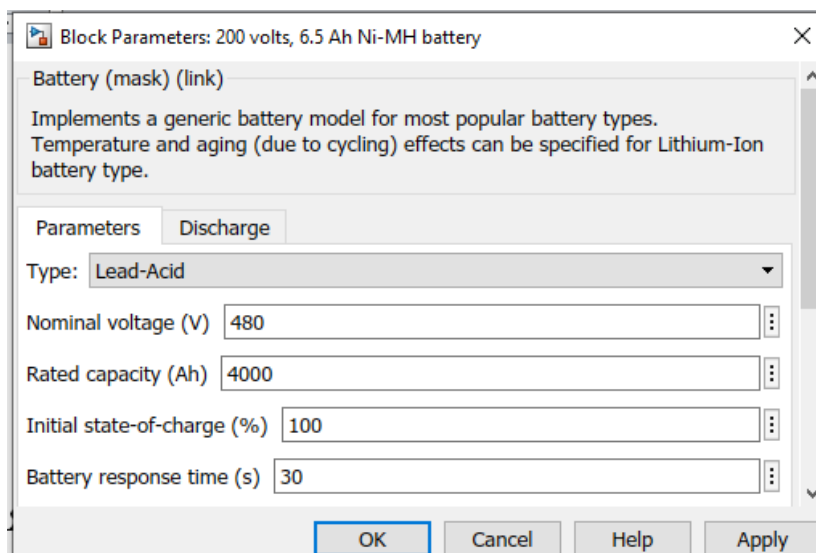


Рисунок 3.17 – Параметри імітаційної моделі акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції

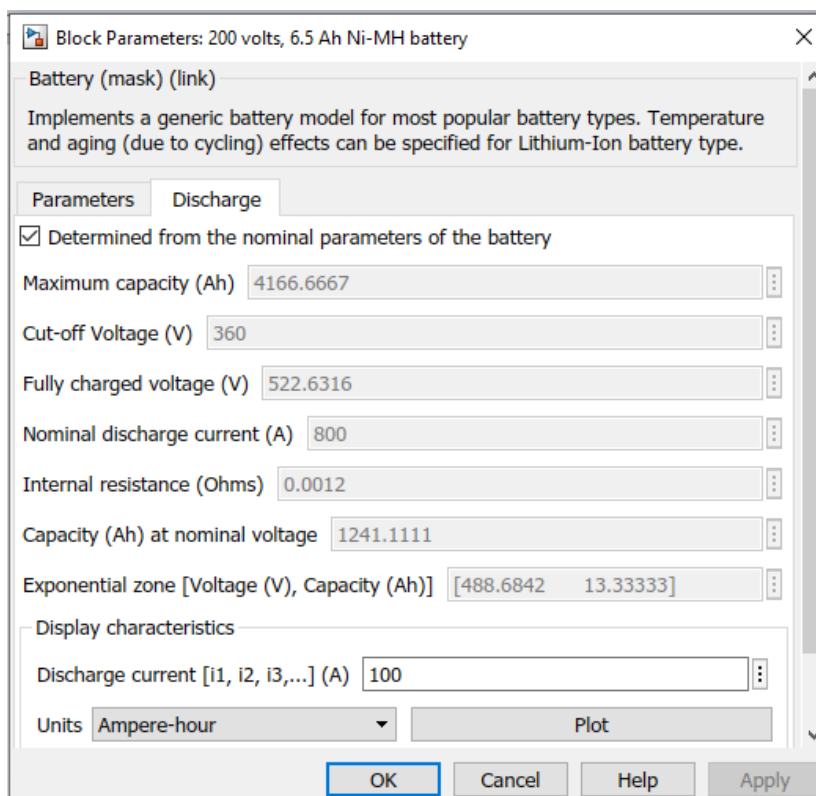


Рисунок 3.18 – Параметри імітаційної моделі акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції в режимі розряду

Розрядні характеристики акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції зображені на рисунку 3.19.

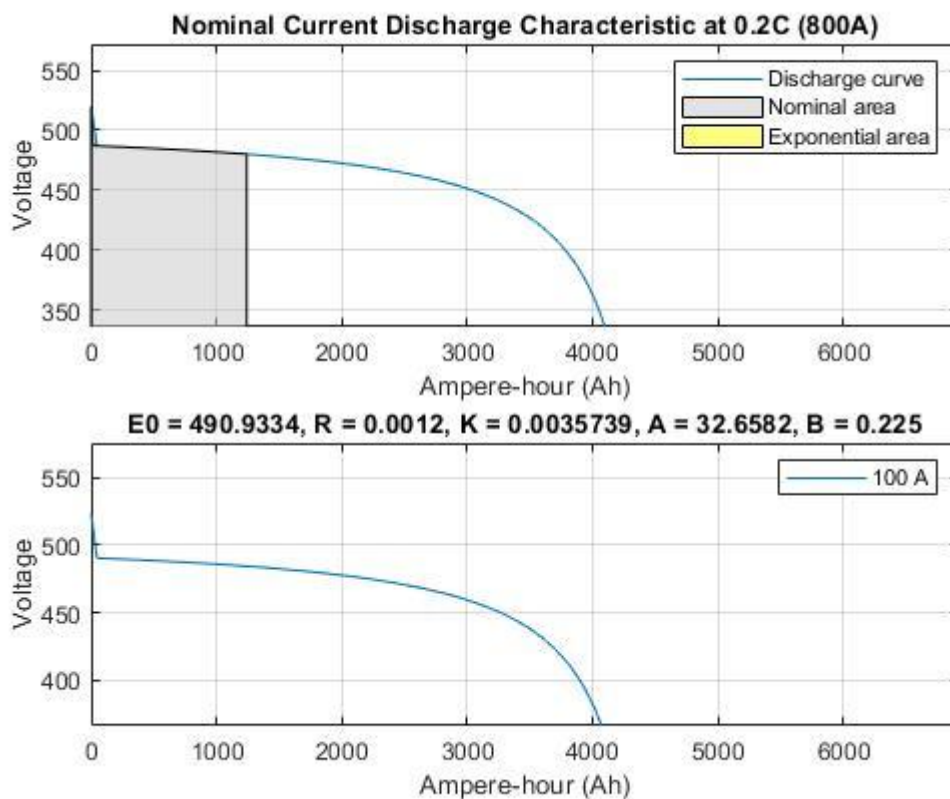


Рисунок 3.19 – Розрядні характеристики акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції

3.4 Імітаційна модель дизельного генератора гібридної сонячної електростанції

Імітаційна модель дизельного генератора гібридної сонячної електростанції зображена на рисунку 3.20 та складається з регулятора дизельного

двигуна, три-фазного синхронного генератора та системи збудження три-фазного синхронного генератора IEEE AC1A.

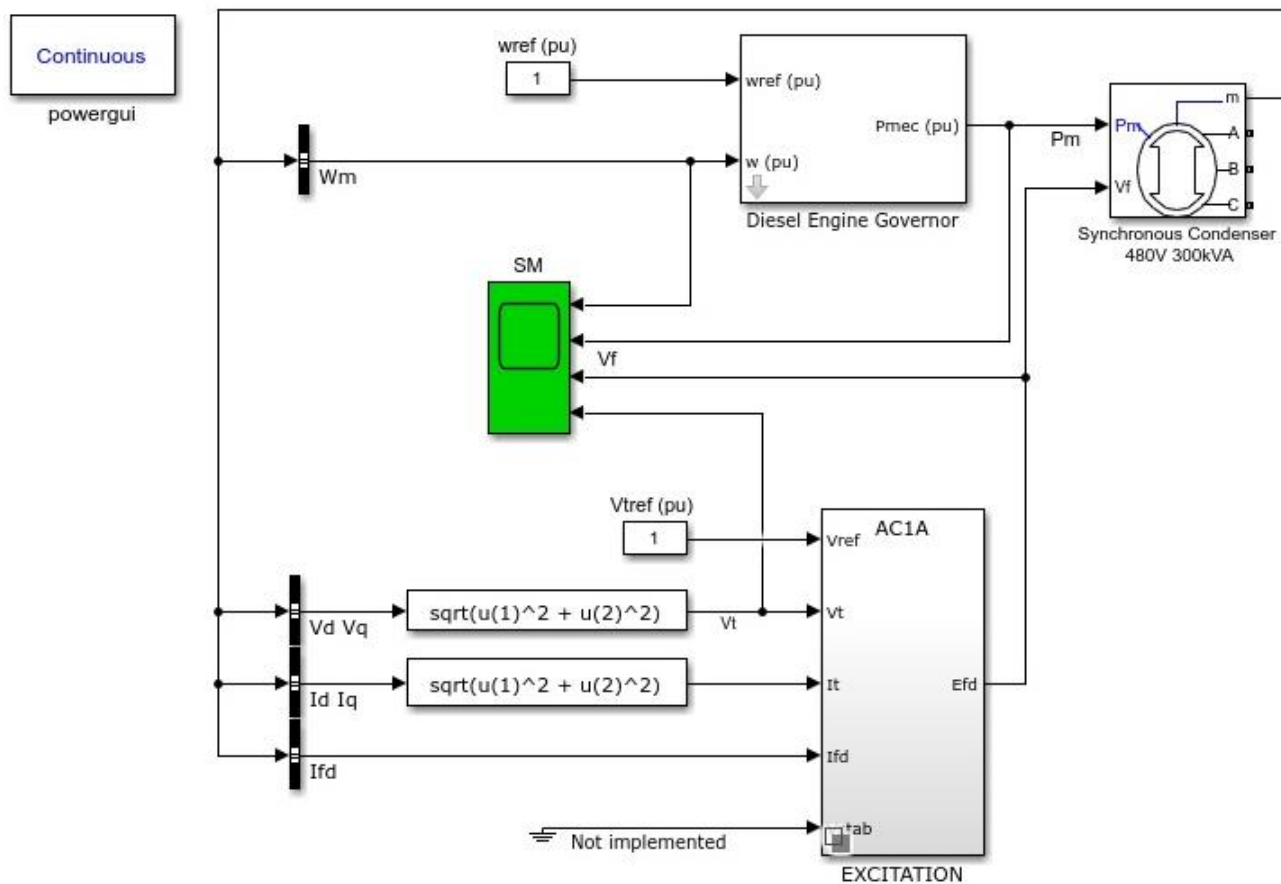


Рисунок 3.20 – Імітаційна модель дизельного генератора гібридної сонячної електростанції

Імітаційна модель регулятора дизельного двигуна зображена на рисунку 3.21. Імітаційна модель регулятора дизельного генератора складається із системи керування (Control system), приводу дросельної заслінки (Actuator) та дизельного двигуна (Engine). Імітаційна модель регулятора дизельного генератора має два входи та один вихід.

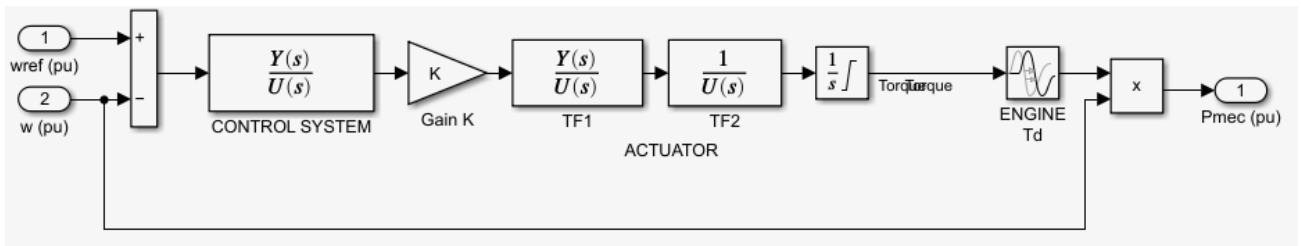


Рисунок 3.21 – Імітаційна модель регулятора дизельного двигуна

На перший вхід вхід імітаційної моделі регулятора дизельного двигуна подається зразкова частота обертання дизельного двигуна $\omega_{зр}$. На другий вхід імітаційної моделі регулятора дизельного двигуна подається виміряна частота обертання дизельного двигуна.

На виході імітаційної моделі регулятора дизельного двигуна отримуємо механічну потужність дизельного двигуна. Інерція двигуна повинна поєднуватися з інерцією генератора.

Система керування регулятора дизельного двигуна описується передавальною функцією:

$$H_c(s) = K \frac{1 + T_3 s}{1 + T_1 s + T_1 T_2 s^2}. \quad (3.3)$$

Привід дросельної заслінки регулятора дизельного двигуна описується передавальною функцією:

$$H_a(s) = \frac{1 + T_4 s}{s(1 + T_5 s)(1 + T_6 s)}. \quad (3.4)$$

Дизельний двигун описується функцією затримки часу T_d . Коефіцієнт підсилення K і постійні часу T_1 , T_2 та T_3 системи керування регулятором, постійні часу T_4 , T_5 та T_6 приводу дросельної заслінки, обмеження крутного моменту T_{\min} та T_{\max} , затримка часу T_d та початкове значення механічної потужності P_{m0} системи керування регулятором дизельного двигуна задаються в у таблиці параметрів, яка наведена на рисунку 3.22.

Block Parameters: Diesel Engine Governor

Diesel Engine Governor (mask) (link)

This block implements a diesel engine and governor system. The first input is the reference speed and the second input is the measured speed. The output is the diesel engine mechanical power. The motor inertia should be combined with the generator inertia.

The model consist of a regulator represented by the following transfer function:

$$H_c = K \cdot (1 + T_3 s) / (1 + T_1 s + T_1 \cdot T_2 \cdot s^2)$$

The trotte actuator is implemented as :

$$H_a = (1 + T_4 s) / [(s (1 + T_5 s)(1 + T_6 s)]$$

The motor engine is represented by a Time delay T_d function.

Parameters

Regulator gain K:

Regulator time constants [T1 T2 T3] (s) :

Actuator time constants [T4 T5 T6] (s) :

Torque limits [Tmin Tmax] (pu) :

Engine time delay T_d (s) :

Initial value of mechanical power P_{m0} (pu) :

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.22 – Таблиця параметрів імітаційної моделі дизельного двигуна

В якості імітаційної моделі три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції виберемо стандартну імітаційну модель Synchronous Machine Standard (стандартна синхронна машина), яка знаходиться в бібліотеці Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Electrical Machines і зображена на рисунку 3.23.

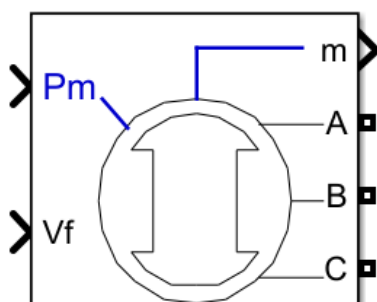


Рисунок 3.23 – Стандартна імітаційна модель Synchronous Machine Standard (стандартна синхронна машина) бібліотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Electrical Machines

На вхід імітаційної моделі три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції подається механічна потужність P_m та напруга збудження V_f . Параметри імітаційної моделі три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції задаються у відповідності до рисунку 3.24.

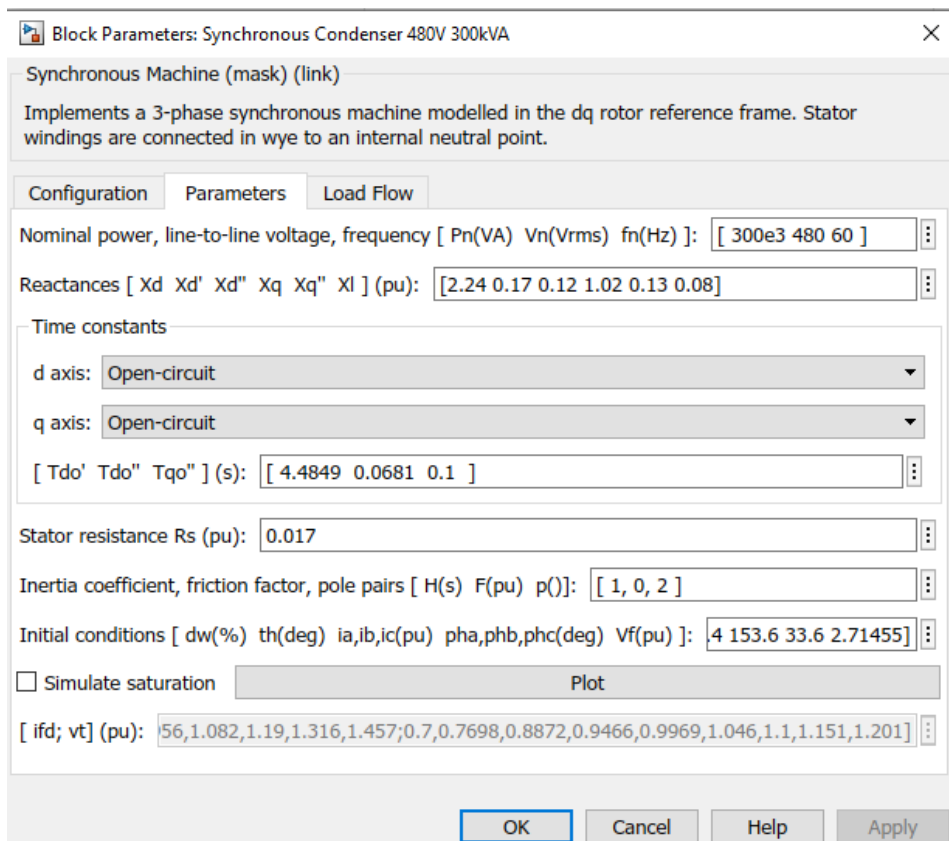


Рисунок 3.24 – Параметри імітаційної моделі три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції

В якості імітаційної моделі системи збудження три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції виберемо стандартну імітаційну модель AC1A Excitation System (AC1A система збудження), яка знаходиться в бібліотеці Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Electrical Machines/Synchronous Machine Control і зображена на рисунку 3.25.

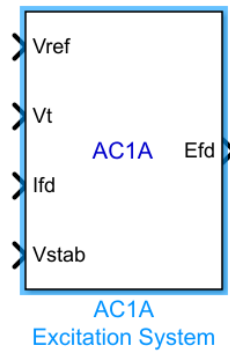


Рисунок 3.25 – Стандартна імітаційна модель AC1A Excitation System (AC1A система збудження) бібліотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Electrical Machines/Synchronous Machine Control

Ця система збудження складається з головного генератора збудження змінного струму з некерованим випрямлячем. генератора збудження не використовує самозбудження, а потужність регулятора напруги береться від джерела, на яке не впливають зовнішні перехідні процеси.

Діюча характеристика на виході генератора збудження обмежена нижньою межею вихідну напругу, яка дорівнює нулю. Блок схема стандартної імітаційної моделі AC1A Excitation System (AC1A система збудження) зображена на рисунку 3.26.

Імітаційна модель системи збудження три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції формує на виході напруженість електричного поля, яка подається на вхід V_f три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції.

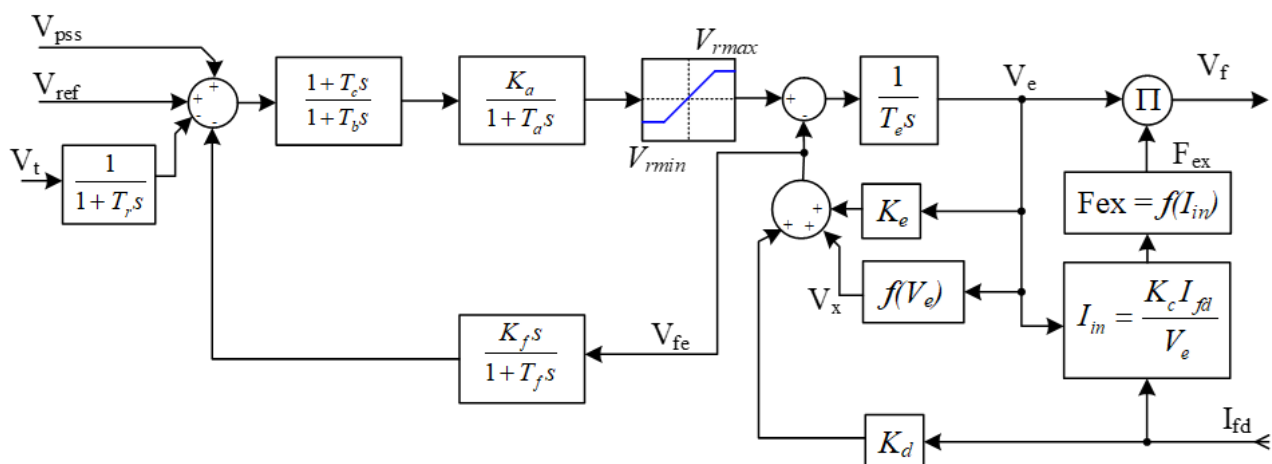


Рисунок 3.26 – Блок схема стандартної імітаційної моделі AC1A Excitation System (AC1A система збудження)

Параметри імітаційної моделі системи збудження три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції задаються у відповідності до рисунку 3.27.

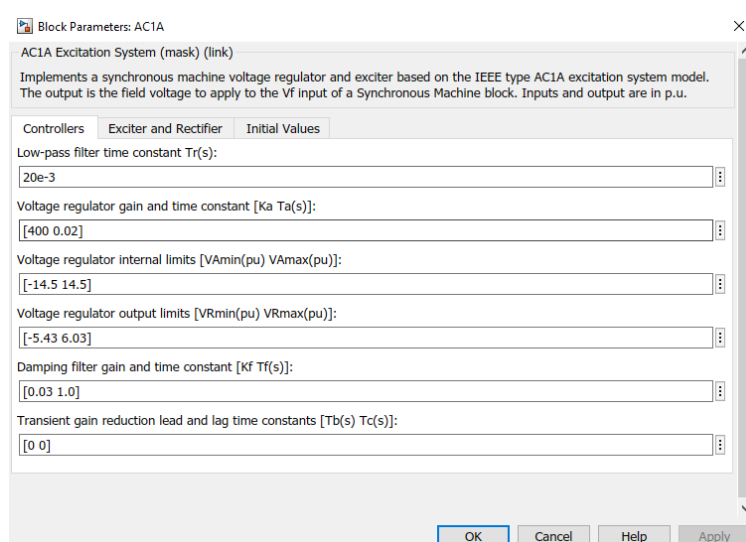


Рисунок 3.27 – Параметри імітаційної моделі системи збудження три-фазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції

Висновки до третього розділу

1. В результаті імітаційного моделювання вітрогенератора гібридної сонячної електростанції встановлено, що робочий діапазон швидкості вітру лежить в межах від $V_{min}=5$ м/с до $V_{max}=12$ м/с, а частота обертання 3-фазного асинхронного генератора вітрогенератора гібридної сонячної електростанції змінюється від $N_{min}=500$ об/хв до $N_{max}=3000$ об/хв.

2. В результаті імітаційного моделювання сонячної батареї гібридної сонячної електростанції встановлено, що при рівні сонячного опромінення PV масиву 1000 Вт/м² отримуємо напругу PV (V_{dc_mean}) 481 В та потужність (P_{dc_mean}) PV масиву 236 кВт, а коли рівень сонячного опромінення PV масиву зменшується до 200 Вт/м², то напругу PV (V_{dc_mean}) зменшується до 464 В, а потужність (P_{dc_mean}) PV масиву зменшується до $46,7$ кВт.

3. В результаті імітаційного моделювання акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції встановлено, що необхідна кількість акумуляторів для досягнення загальної напруги акумуляторної батареї $U_b=480$ В дорівнює $N=40$. Тоді загальна ємність всієї акумуляторної батареї гібридної сонячної електростанції $C_{zag}=4000$ Агод при ємності кожного акумулятора $C_a=100$ Агод.

4. Проведено дослідження імітаційної моделі регулятора дизельного генератора, яка складається із системи керування (Control system), приводу дросельної заслінки (Actuator) та дизельного двигуна (Engine).

5. Проведено дослідження імітаційної моделі системи збудження трифазного синхронного генератора гібридної сонячної електростанції, яка складаються з головного генератора збудження змінного струму з некерованим випрямлячем. генератора збудження не використовує самозбудження, а потужність регулятора напруги береться від джерела, на яке не впливають зовнішні перехідні процеси.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ГІБРИДНОЮ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

4.1. Особливості методу керування гібридною сонячною електростанцією

Стабільність роботи гібридної сонячної електростанції залежить від співвідношення активної потужності активного навантаження та реактивної потужності реактивного навантаження. Стабільність роботи гібридної сонячної електростанції порушується, якщо підключене навантаження перевищує доступну потужність гібридної сонячної електростанції.

Структура гібридної сонячної електростанції наведена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Структура гібридної сонячної електростанції

Відновлювані джерела енергії, а саме фотоелектрична система та генератор вітровий генератор, об'єднані в загальну шину змінного струму. Батарея також

під'єднана до тієї ж шини через двонаправлений інвертор. Дизель-генератор використовується як резервна система.

Система керування гібридною сонячною електростанцією повинна гарантувати безперебійну роботу при змінному навантаженні та зміні умов навколишнього середовища. До умов навколишнього середовища відносяться параметри: рівень освітлення, температура та швидкість вітру.

Ці параметри поступають на вхід системи керування гібридною сонячною електростанцією. Також на вхід системи керування гібридною сонячною електростанцією поступає частота та напруга мережі змінного струму.

На основі вхідних параметрів параметрів система керування гібридною сонячною електростанцією формує сигнали керування, які поступають на блоки керування (БК) сонячної електростанції, акумуляторної батареї, вітрового генератора та дизельного генератора.

Особливістю методу керування гібридною сонячною електростанцією є максимальне використання енергії сонця і вітру, а також економічне використання дизельного пального дизельним генератором. Для забезпечення цих вимог використовується потужна акумуляторна батарея, яка здатна накопичувати надлишок електроенергії при високих рівнях освітлення та швидкості вітру.

У випадку недостатнього рівня освітлення та швидкості вітру, а також недостатнього заряду акумуляторної батареї, система керування гібридною сонячною електростанцією запускає дизельний генератор і компенсує недостатню потужність відновлюваних джерел енергії. В цьому і полягає особливість запропонованого методу керування гібридною сонячною електростанцією.

У відповідності до запропонованого методу керування гібридною сонячною електростанцією, введемо принцип розподілу навантаження, який базується на визначенні віртуального навантаження в мережі через частоту і

напругу мережі, а також а також поточні значення рівня освітлення, швидкості вітру та температури.

Система керування гібридною сонячною електростанцією базується на використанні ПД регулятора, на вхід якого поступає сигнал помилки частоти Δf :

$$\Delta f = f_m - f_{zp}, \quad (4.1)$$

де f_m - поточне значення частоти мережі;

f_{zp} - зразкове значення частоти мережі.

Максимальна доступна потужність сонячної електростанції визначається за допомогою поточних значень рівня освітлення та температури. А максимальна доступна потужність вітрового генератора визначається за допомогою поточного значення швидкості вітру.

Якщо $\Delta f > 0$, то це означає, що сонячна електростанція та вітровий генератор виробляють більше електроенергії, ніж потрібно для навантаження в мережі. Цю надлишкову потужність можна зберігати в акумуляторній батареї.

Якщо $\Delta f < 0$, то це означає, що сонячна електростанція та вітровий генератор виробляють менше електроенергії, ніж потрібно для навантаження в мережі. Цю недостатню потужність можна отримати із акумуляторної батареї, якщо в ній накопичено достатню кількість електроенергії.

Якщо кількість електроенергії, яка накопичена в акумуляторній батареї, є недостатня, система керування гібридною сонячною електростанцією запускає дизельний генератор, який компенсує недостачу електроенергії.

Якщо $\Delta f = 0$, то це означає, що сонячна електростанція та вітровий генератор виробляють рівно стільки електроенергії, скільки потрібно для навантаження в мережі. Недостачі потужності немає і система збалансована.

Для реалізації запропонованого методу керування гібридною сонячною електростанцією розроблено алгоритм керування, блок схема якого наведена на рисунку 4.2.

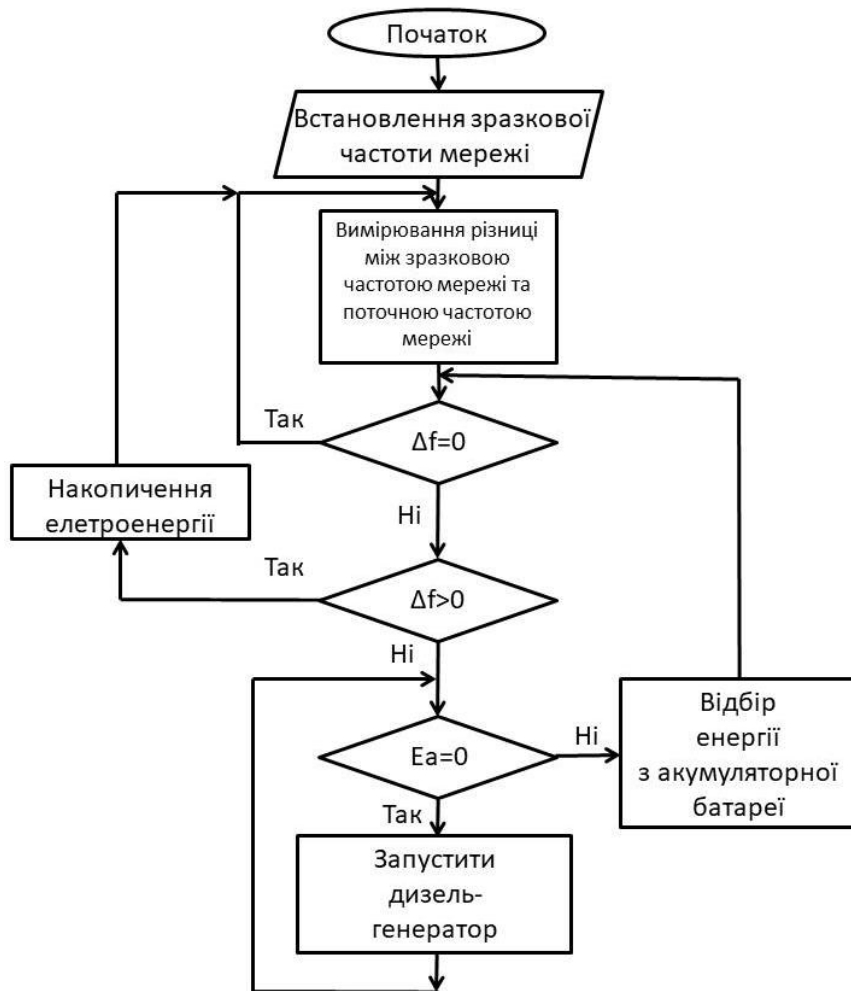


Рисунок 4.2 – Блок схема алгоритму керування гібридною сонячною електростанцією

4.2. Імітаційне моделювання методу керування гібридною сонячною електростанцією

З метою експериментального дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією розроблено імітаційну модель гібридної сонячної електростанції, яка зображена на рисунку 4.3.

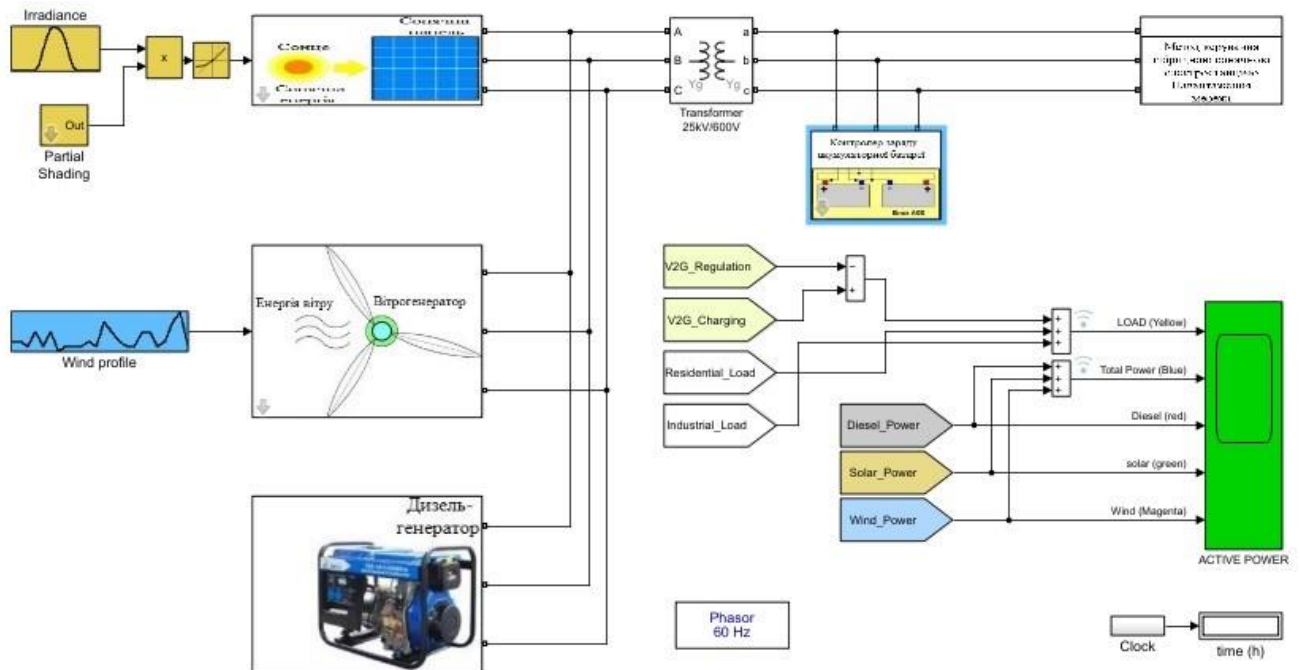


Рисунок 4.3 – Імітаційна модель дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією

До складу імітаційної моделі дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією входить імітаційна модель сонячних панелей, імітаційна модель вітрогенератора, імітаційна модель дизель-генератора, імітаційна модель акумуляторної батареї разом із контролером заряду та імітаційна модель блоку керування гібридною сонячною електростанцією у якому реалізовано запропонований метод керування гібридною сонячною електростанцією.

У відповідності до запропонованого методу керування гібридною сонячною електростанцією, вимірюється відхилення частоти мережі змінного струму, в залежності від величини навантаження, рівня сонячного освітлення, температури та швидкості вітру.

Коли швидкість вітру досягає номінального значення, вітрогенератор виробляє номінальну потужність. Вітрогенератор відмикається від мережі, коли швидкість вітру перевищує максимальне значення вітру. Доки швидкість вітру не повернеться до свого номінального значення, вітрогенератор буде відімкнутий від мережі.

Контролер заряду акумуляторної батареї контролює її заряд і використовує доступну потужність для регулювання мережі. Імітаційна модель навантаження складається з житлового навантаження та асинхронної машини, яка використовується для моделювання впливу промислового індуктивного навантаження (наприклад, системи вентиляції) на мережу змінного струму.

Житлове навантаження відповідає профілю споживання із заданим коефіцієнтом потужності. Асинхронна машина керується квадратичним співвідношенням між частотою обертання ротора та механічним моментом.

В процесі імітаційного моделювання інтенсивність сонячної енергії відповідає нормальному розподілу, де найвища інтенсивність досягається опівдні. Вітер сильно змінюється протягом дня і має кілька піків і мінімумів. Житлове навантаження дотримується типової схеми, подібної до звичайного домашнього споживання. Споживання низьке вдень і зростає до піку ввечері, і повільно знижується вночі. Протягом дня на частоту мережі впливатимуть три події.

1. Запуск асинхронної машини.
2. Часткове затінення опівдні, яке впливає на виробництво сонячної енергії.

3. Вимкання вітрогенератора, коли швидкість вітру перевищує максимально допустиме значення.

На рисунку 4.4 зображено імітаційну модель навантаження, яке складається із житлового навантаження та асинхронної машини, яка використовується для моделювання впливу промислового індуктивного навантаження (наприклад, системи вентиляції) на мережу змінного струму.

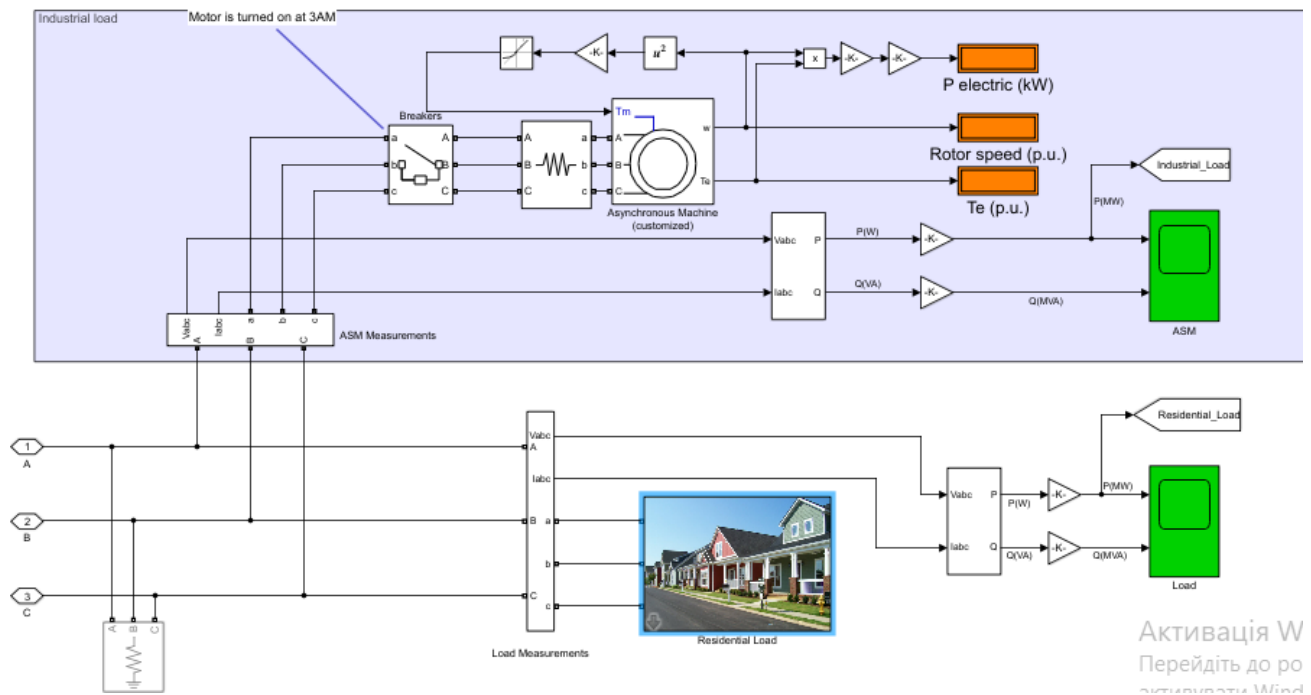


Рисунок 4.4 – Імітаційна модель навантаження гібридної сонячної електростанції

На рисунку 4.5 зображено результати імітаційного моделювання навантаження асинхронної машини, яка використовується для моделювання впливу промислового індуктивного навантаження. На графіках активної P та реактивної потужності Q індуктивного навантаження зафіксовано момент вмкання асинхронної машини, яка використовується для моделювання впливу промислового індуктивного навантаження.

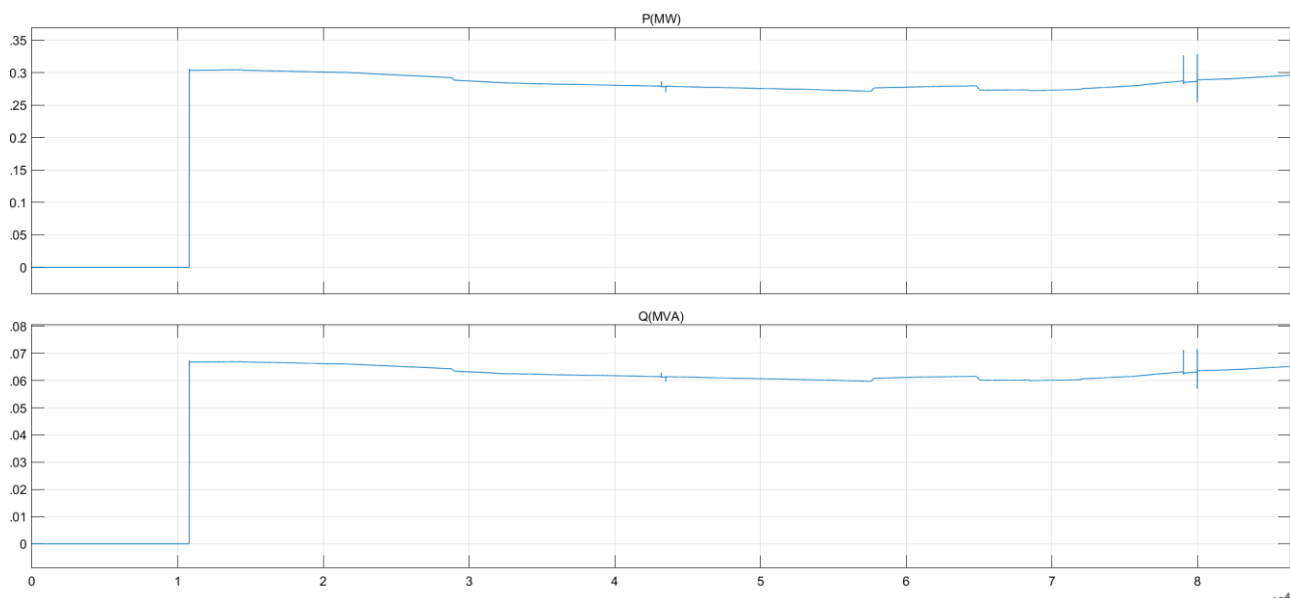


Рисунок 4.5 – Результати імітаційного моделювання навантаження асинхронної машини

На рисунку 4.6 зображено результати імітаційного моделювання житлового навантаження. Аналіз графіків житлового навантаження показує, що споживання низьке вдень і зростає до піку ввечері, і повільно знижується вночі.

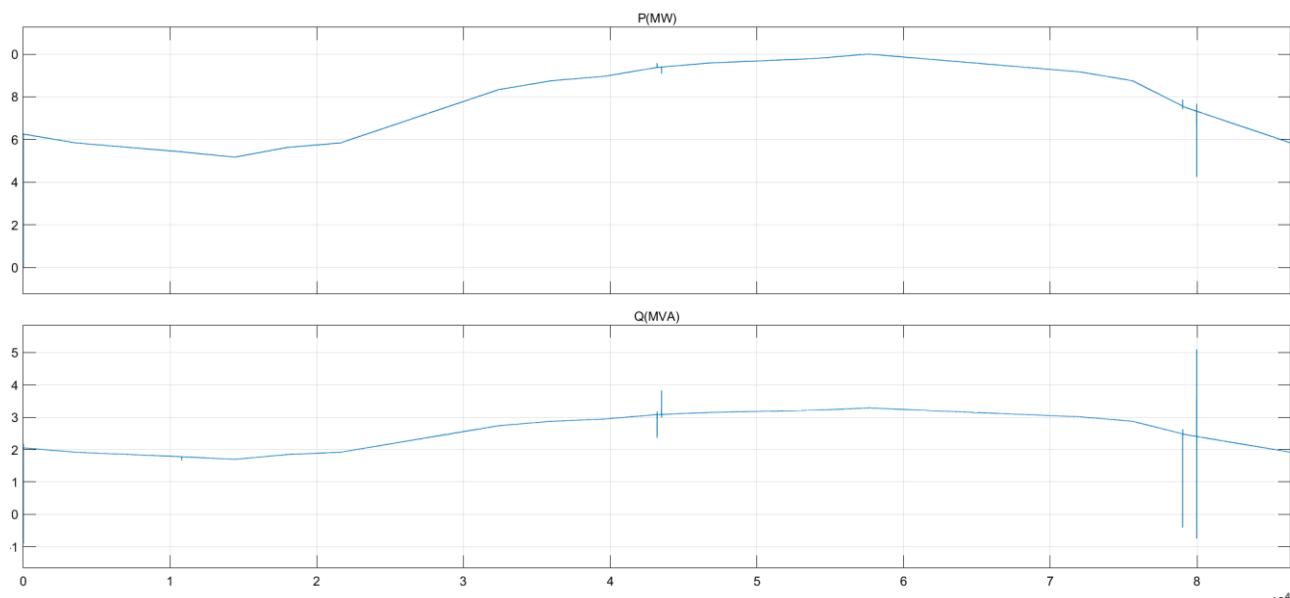


Рисунок 4.6 – Результати імітаційного моделювання житлового навантаження

На рисунку 4.7 зображено імітаційну модель дизель-генератора, яка складається із дизельного двигуна та синхронного генератора.

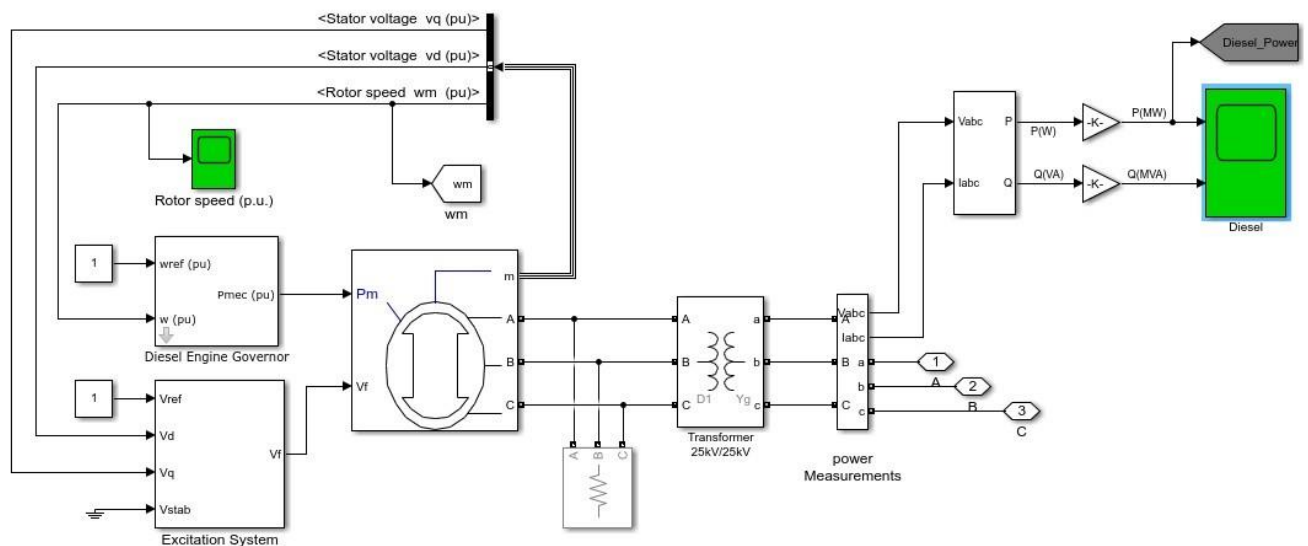


Рисунок 4.7 – Імітаційна модель дизель-генератора гібридної сонячної електростанції

На рисунку 4.8 зображено результати імітаційного моделювання дизель-генератора гібридної сонячної електростанції. На графіках активної P та реактивної потужності Q дизель-генератора гібридної сонячної електростанції зафіксовано моменти компенсації недостатньої потужності сонячної електростанції, вітрогенератора та енергії, яка була накопичена в акумуляторній батареї.

На рисунку 4.9 зображено результати імітаційного моделювання методу керування гібридною сонячною електростанцією. Аналіз графіків активної P потужності гібридною сонячною електростанцією, яка зображена синьою кривою, показує, що крива активної потужності гібридної сонячної електростанції співпадає з кривою активної потужності споживання навантаження, яка зображена червоною лінією.

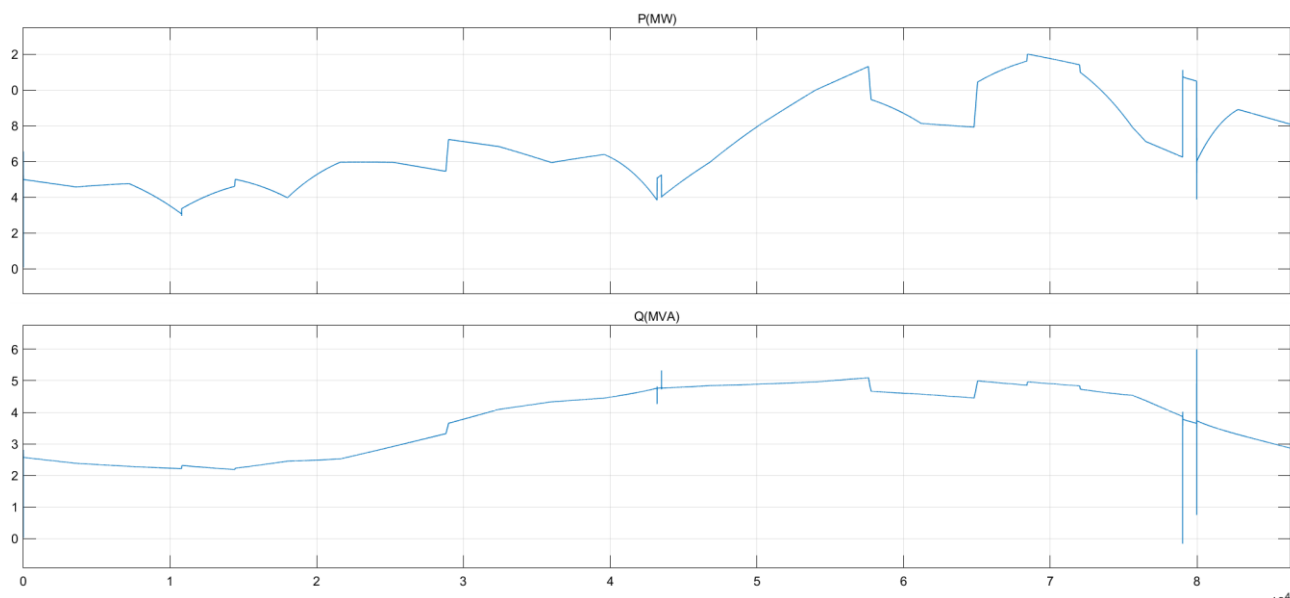


Рисунок 4.8 – Результати імітаційного дизель-генератора гібридної сонячної електростанції

На риснку 4.9 зображено помаранчева крива - потужності дизель-генератора; бузкова крива - потужності сонячної електростанції; зелена крива - вітрогенератора.

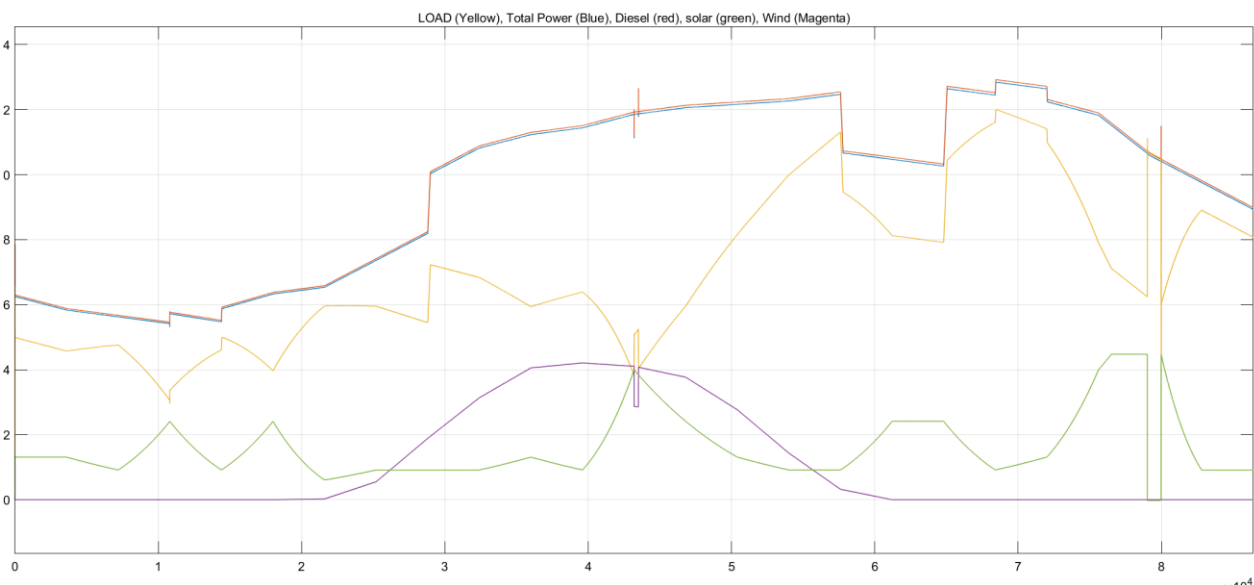


Рисунок 4.9 – Результати імітаційного методу керування гібридною сонячною електростанцією

Висновки до четвертого розділу

1. Особливістю методу керування гібридною сонячною електростанцією є максимальне використання енергії сонця і вітру, а також економічне використання дизельного пального дизельним генератором. Для забезпечення цих вимог використовується потужна акумуляторна батарея, яка здатна накопичувати надлишок електроенергії при високих рівнях освітлення та швидкості вітру.

2. У випадку недостатнього рівня освітлення та швидкості вітру, а також недостатнього заряду акумуляторної батареї, система керування гібридною сонячною електростанцією запускає дизельний генератор і компенсує недостатню потужність відновлюваних джерел енергії.

3. З метою експериментального дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією розроблено імітаційну модель гібридної сонячної електростанції, до складу якої входить імітаційна модель сонячних панелей, імітаційна модель вітрогенератора, імітаційна модель дизель-генератора, імітаційна модель акумуляторної батареї разом із контролером заряду та імітаційна модель блоку керування гібридною сонячною електростанцією, у якому реалізовано запропонований метод керування гібридною сонячною електростанцією.

4. Аналіз графіків активної P потужності гібридною сонячною електростанцією, показує, що крива активної потужності гібридної сонячної електростанції співпадає з кривою активної потужності споживання навантаження, яка зображена червоною лінією. Звідси можна зробити висновок, що запропонований метод керування гібридною сонячною електростанцією дозволяє ефективно використовувати відновлювані джерела електроенергії, що є досить актуальним для України.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано та досліджено будову гібридної сонячної електростанції, яка складається із вітрогенератора, сонячної панелі, акумуляторної батареї, контролеру заряду, дизель-генератора та система керування.

2. Інтелектуальне керування гібридною сонячною електростанцією гарантує, що поточна генерація та навантаження в будь-який момент будуть ідеально підібрані. Система забезпечує постійну стабільність, швидко реагуючи на стрибки генерації та навантаження.

3. У відповідності до будови гібридної сонячної електростанції, обрано математичні моделі усіх блоків, що входять до складу гібридної сонячної електростанції, проаналізовано їх переваги та недоліки. Розроблено імітаційні моделі усіх блоків, що входять до складу гібридної сонячної електростанції, проаналізовано їх переваги та недоліки.

4. Розроблено імітаційну модель гібридної сонячно електростанції до складу якої входить імітаційна модель сонячних панелей, імітаційна модель вітрогенератора, імітаційна модель дизель-генератора. імітаційна модель акумуляторної батареї разом із контролером заряду та імітаційна модель блоку керування гібридною сонячною електростанцією, у якому реалізовано запропонований метод керування гібридною сонячною електростанцією.

5. Аналіз результатів імітаційного моделювання, показує, що активна потужність гібридної сонячної електростанції співпадає з активною потужністю споживання навантаження,. Звідси можна зробити висновок, що запропонований метод керування гібридною сонячною електростанцією дозволяє ефективно використовувати відновлювані джерела електроенергії, що є досить актуальним для України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. O. Erdinc and M. Uzunoglu, “Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches,” *Renewable Sustainable Energy Rev.* 16(3), 1412–1425 (2012).
2. S. M. Shaahid and M. A. Elhadidy, “Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for commercial loads in desert environments,” *Renewable Sustainable Energy Rev.* 11(8), 1794–1810 (2007).
3. W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, and H. Yang, “Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems,” *Appl. Energy* 87(2), 380–389 (2010).
4. M. A. Elhadidy and S. M. Shaahid, “Parametric study of hybrid (wind & solar & diesel) power generating systems,” *Renewable Energy* 21(2), 129–139 (2000).
5. M. Sharafi and T. Y. Elmekawy, “Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO simulation based approach,” *Renewable Energy* 68, 67–79 (2014).
6. T. Tezer, R. Yaman, and G. Yaman, “Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems,” *Renewable Sustainable Energy Rev.* 73, 840–853 (2017).
7. M. D. A. Al-falahi, S. D. G. Jayasinghe, and H. Enshaei, “A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system,” *Energy Convers. Manage.* 143, 252–274 (2017).
8. P. Nema, R. K. Nema, and S. Rangnekar, “A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review,” *Renewable Sustainable Energy Rev.* 13(8), 2096–2103 (2009).
9. A. Mahesh and K. S. Sandhu, “Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings,” *Renewable Sustainable Energy Rev.* 52,

1135–1147 (2015).

10. B. J. Saharia and M. Manas, “Viability analysis of photovoltaic/wind hybrid distributed generation in an isolated community of Northeastern India,” *Distrib. Gener. Altern. Energy J.* 32(1), 49–80 (2017).

11. A. Hepbasli, “A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future,” *Renewable Sustainable Energy Rev.* 12(3), 593–661 (2008).

12. R. Karki and R. Billinton, “Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems,” *IEEE Trans. Energy Convers.* 16(4), 368–373 (2001).

13. M. S. Okundamiya, J. O. Emagbetere, and E. A. Ogujor, “Design and control strategy for a hybrid green energy system for mobile telecommunication sites,” *J. Power Sources* 257, 335–343 (2014).

14. S. Upadhyay and M. P. Sharma, “Selection of a suitable energy management strategy for a hybrid energy system in a remote rural area of India,” *Energy* 94, 352–366 (2016).

15. M. Kalantar and S. M. Mousavi G, “Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage,” *Appl. Energy* 87(10), 3051–3064 (2010).

16. S. M. Mousavi G, “An autonomous hybrid energy system of wind/tidal/microturbine/battery storage,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 43(1), 1144–1154 (2012).

17. A. E.-S. A. Nafeh, “Optimal economical sizing of a PV-wind hybrid energy system using genetic algorithm,” *Int. J. Green Energy* 8(1), 25–43 (2011).

18. K. Benmouiza, M. Tadj, and A. Cheknane, “Classification of hourly solar radiation using fuzzy c-means algorithm for optimal stand-alone PV system sizing,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 82, 233–241 (2016).

19. D. Magnor and D. U. Sauer, “Optimization of PV battery systems using

genetic algorithms,” *Energy Proc.* 99, 332–340 (2016).

20. A. F. Crossland, D. Jones, and N. S. Wade, “Planning the location and rating of distributed energy storage in LV networks using a genetic algorithm with simulated annealing,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 59, 103–110 (2014).

21. D. Gomez-Lorente, I. Triguero, C. Gil, and A. Esp in Estrella, “Evolutionary algorithms for the design of grid-connected PV-systems,” *Expert Syst. Appl.* 39(9), 8086–8094 (2012).

22. S. M. Moosavian, M. Modiri-Delshad, N. A. Rahim, and J. Selvaraj, “Imperialistic competition algorithm: Novel advanced approach to optimal sizing of hybrid power system,” *J. Renewable Sustainable Energy* 5(5), 053141 (2013).

23. M. Paulitschke, T. Bocklisch, and M. Böttiger, “Sizing algorithm for a PV-battery-H₂-hybrid system employing particle swarm optimization,” *Energy Proc.* 73, 154–162 (2015).

24. A. Fathy, “A reliable methodology based on mine blast optimization algorithm for optimal sizing of hybrid PV-wind-FC system for remote area in Egypt,” *Renewable Energy* 95, 367–380 (2016).

25. S. M. Hakimi, S. M. Moghaddas-Tafreshi, and H. HassanzadehFard, “Optimal sizing of reliable hybrid renewable energy system considered various load types,” *J. Renewable Sustainable Energy* 3(6), 062701 (2011).

26. A. Yahiaoui, K. Benmansour, and M. Tadjine, “Control, analysis and optimization of hybrid PV-diesel-battery systems for isolated rural city in Algeria,” *Sol. Energy* 137, 1–10 (2016).

27. C. Shang, D. Srinivasan, and T. Reindl, “An improved particle swarm optimisation algorithm applied to battery sizing for stand-alone hybrid power systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 74, 104–117 (2016).

28. P. Paliwal, N. P. Patidar, and R. K. Nema, “Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using particle swarm optimization,” *Renewable Energy* 63, 194–204 (2014).

29. A. El-Zonkoly, "Optimal placement and schedule of multiple grid connected hybrid energy systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 61, 239–247 (2014).
30. H. Wu, X. Liu, and M. Ding, "Dynamic economic dispatch of a microgrid: Mathematical models and solution algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 63, 336–346 (2014).
31. M. Sarvi and I. N. Avanaki, "An optimized fuzzy logic controller by water cycle algorithm for power management of stand-alone hybrid green power generation," *Energy Convers. Manage.* 106, 118–126 (2015).
32. Y.-S. Cheng, M.-T. Chuang, Y.-H. Liu, S.-C. Wang, and Z.-Z. Yang, "A particle swarm optimization based power dispatch algorithm with roulette wheel re-distribution mechanism for equality constraint," *Renewable Energy* 88, 58–72 (2016).
33. S. M. Hakimi and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Optimization of smart microgrid considering domestic flexible loads," *J. Renewable Sustainable Energy* 4(4), 042702 (2012).
34. R. Dufo-Lopez, L. A. Fernandez-Jimenez, I. J. Ramirez-Rosado, J. S. Artal-Sevil, J. A. Dominguez-Navarro, and J. L. Bernal-Agustin, "Daily operation optimisation of hybrid stand-alone system by model predictive control considering ageing model," *Energy Convers. Manage.* 134, 167–177 (2017).
35. M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. M. I. Mahlia, "Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems," *Energy Convers. Manage.* 85, 120–130 (2014).
36. R. Kaur, V. Krishnasamy, K. Muthusamy, and P. Chinnamuthan, "A novel proton exchange membrane fuel cell based power conversion system for telecom supply with genetic algorithm assisted intelligent interfacing converter," *Energy Convers. Manage.* 136, 173–183 (2017).

Додаток А

Стаття у фаховому журналі

УДК 621.315

В.В. МАРТИНЮК
Хмельницький національний університет
О.В. РУДЕНКО
Хмельницький національний університет

МЕТОД КЕРУВАННЯ ГІБРИДНОЮ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

В роботі на основі проведеного аналізу особливості будови гібридної сонячної електростанції. Встановлено вимоги до забезпечення стабільної роботи гібридної сонячної електростанції. Запропоновано метод керування гібридною сонячною електростанцією. Розроблено імітаційну модель гібридної сонячної електростанції, до складу якої входить модель сонячних панелей, модель вітрогенератора, модель дизель-генератора, модель акумуляторної батареї разом із контролером заряду та модель блоку керування гібридною сонячною електростанцією, у якому реалізовано запропонований метод керування гібридною сонячною електростанцією.

Keywords: метод керування гібридною сонячною електростанцією, сонячна панель, вітрогенератор, дизель-генератор, акумуляторна батарея.

V.V. MARTYNYUK
Khmelnitsky national university
O.V. Rudenok
Khmelnitsky national university

HYBRID SOLAR POWER PLANT CONTROL METHOD

The work is based on the analysis of the features of the structure of the hybrid solar power plant. The requirements for ensuring the stable operation of the hybrid solar power plant have been established. A method of controlling a hybrid solar power plant is proposed. A simulation model of a hybrid solar power plant was developed, which includes a model of solar panels, a model of a wind generator, and a model of a diesel generator, a model of a battery pack together with a charge controller and a model of a hybrid solar power plant control unit in which the proposed hybrid solar power plant control method is implemented..

Keywords: hybrid solar power plant control method, solar panel, wind generator, diesel generator, storage battery.

1. Вступ

Гібридна сонячна електростанція - це електростанція з кількома джерелами електричної енергії (генераторами), які використовують не менше двох різних технологій виробництва електроенергії [1-3]. Для такої системи висувають наступні технічні завдання.

1. Виробництво та накопичення енергії економічно вигідним способом.
2. Якщо використовуються відновлювальні джерела електроенергії, то:
 - надавати перевагу використанню відновлювальним джерелам електроенергії, де це локально доступно;
 - накопичувати енергію від відновлювальних джерел електроенергії, коли вони доступні;
 - використовувати резервні джерела енергії (генератори) для досягнення зазначеного рівня сервісу, коли відновлювальні джерела електроенергії є недоступними чи недостатніми.

На рис. 1 зображена будова гібридної сонячної електростанції. До складу гібридної сонячної електростанції входять наступні блоки.

1. Вітрогенератор.
2. Сонячна панель.
3. Двовходова електрична машина-генератор.
4. Блок акумуляторної батареї.
5. Контролер заряду.
3. Дизель-генератор.
4. Система керування дизель-генератором.
5. Інвертор.

У більшості районів надходження сонячної випромінювання та наявність вітру знаходяться в протифазі (тобто коли світить яскраве сонце, найчастіше відсутній вітер, або коли дме сильний вітер, то є нестача сонячного випромінювання). Для забезпечення безперебійного електропостачання автономного об'єкта, зменшення необхідної потужності вітрогенератора та сонячної батареї та ємності акумуляторної батареї,

покращення режимів роботи станції у багатьох випадках доцільне використання гібридної вітро-сонячної електростанції [4-6].

Особливо значні переваги гібридних станцій при її використанні протягом року. При цьому в зимовий час основне виробництво електроенергії припадає на вітроелектричну установку, а влітку - на сонячні фотоелектричні модулі.

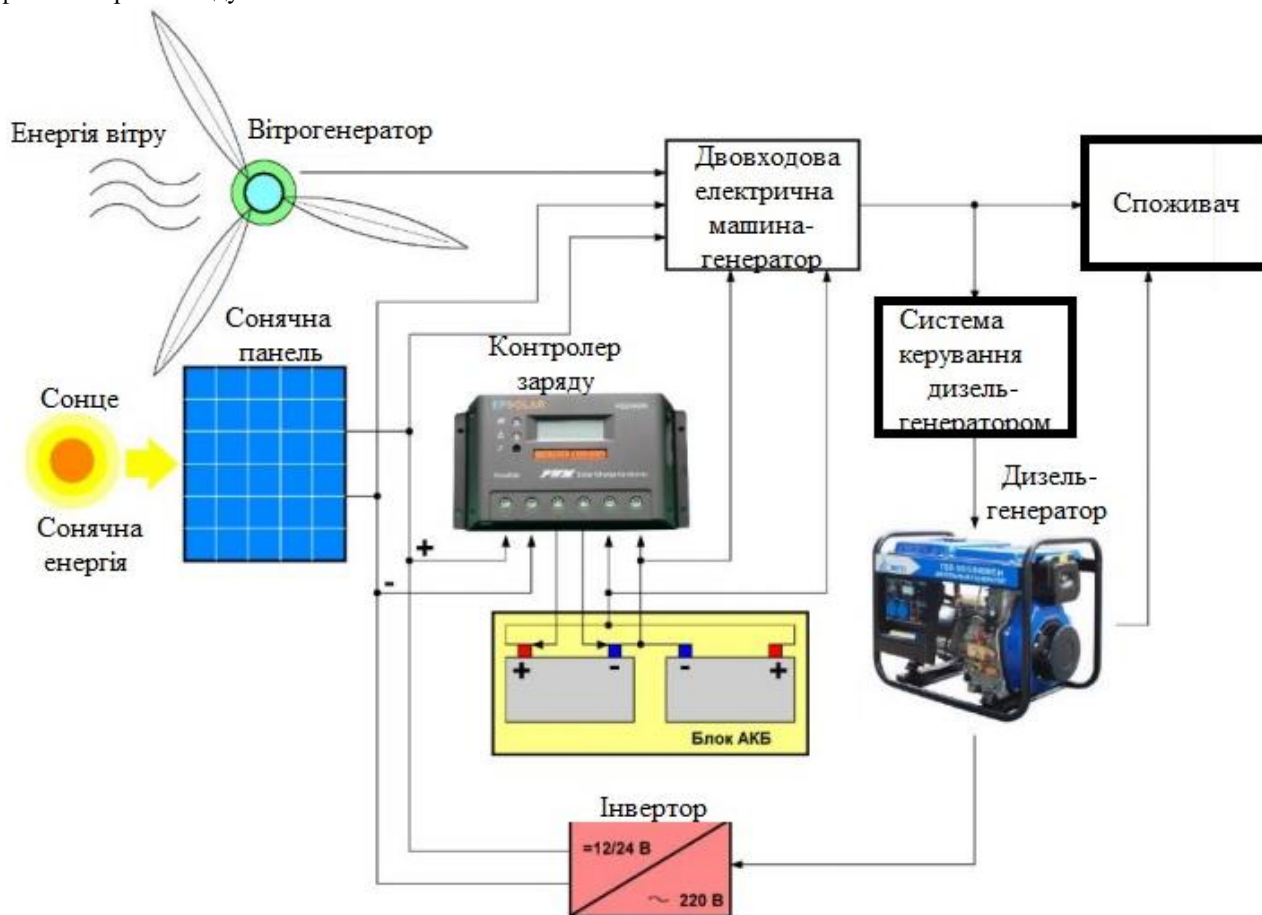


Рис. 1. Будова гібридної сонячної електростанції

Сонячні та вітрові енергетичні технології, екологічно чисті та доступні, можуть замінити або доповнити традиційні способи отримання енергії, пов'язані з використанням автономних генераторів [7-9]. Перед гібридною сонячною електростанцією встановлюються наступні технічні завдання.

1. Виробництво та накопичення енергії економічно вигідним способом.

2. Якщо використовуються відновлювальні джерела електроенергії, то:

- надавати перевагу використанню відновлювальним джерелам електроенергії, де це локально доступно;
- накопичувати енергію від відновлювальних джерел електроенергії, коли вони доступні;
- використовувати резервні джерела енергії (набори генераторів) для досягнення зазначеного рівня сервісу, коли відновлювальні джерела електроенергії є недоступними чи недостатніми.

2. Метод керування гібридною сонячною електростанцією

Особливістю керування гібридною сонячною електростанцією є забезпечення частоти електричної мережі в умовах зміни рівня сонячного випромінювання, температури та швидкості вітру. В процесі генерування електроенергії різними генераторами потужність генерування завжди повинна відповідати підключеним навантаженням.

У випадку, якщо потужність навантаження менша, ніж потужність генерування електроенергії, частота електричної мережі зростає. Коли потужність навантаження більша, ніж потужність генерування електроенергії, частота електричної мережі зменшується. Для забезпечення підтримки балансу між потужністю навантаження та

потужністю генерування електроенергії доцільно використовувати системи накопичення електричної енергії та дизельного генератора.

Відновлювані джерела електричної енергії є нестабільними джерелами потужності електричної енергії. Керувати відновлюваними джерелами електричної енергії складно та неможливо, коли їх потужності недостатньо для живлення навантаження. Компенсувати недостачу потужності, яку необхідно віддати у навантаження, можна двома способами: збільшити кількість подачі палива у дизельний генератор або взяти додаткову кількість електричної енергії від системи накопичення.

В основі запропонованого методу керування гібридною сонячною електростанцією є вимірювання різниці між частотою електричної мережі та опорною частотою електричної мережі в режимі реального часу. В залежності від значення вимірної різниці частот, здійснюється або накопичення надлишку електричної енергії в системі накопичення у випадку малої потужності навантаження, або відбір електричної енергії з системи накопичення у випадку великої потужності навантаження.

У випадку недостатньої кількості електричної енергії, яка накопичена у системі накопичення електричної енергії, необхідно запустити дизельний генератор, щоб виробити додаткову кількість електричної, яка необхідна для живлення навантаження.

Для реалізації запропонованого методу керування гібридною сонячною електростанцією розроблено алгоритм керування, блок схема якого наведена на рис. 2.

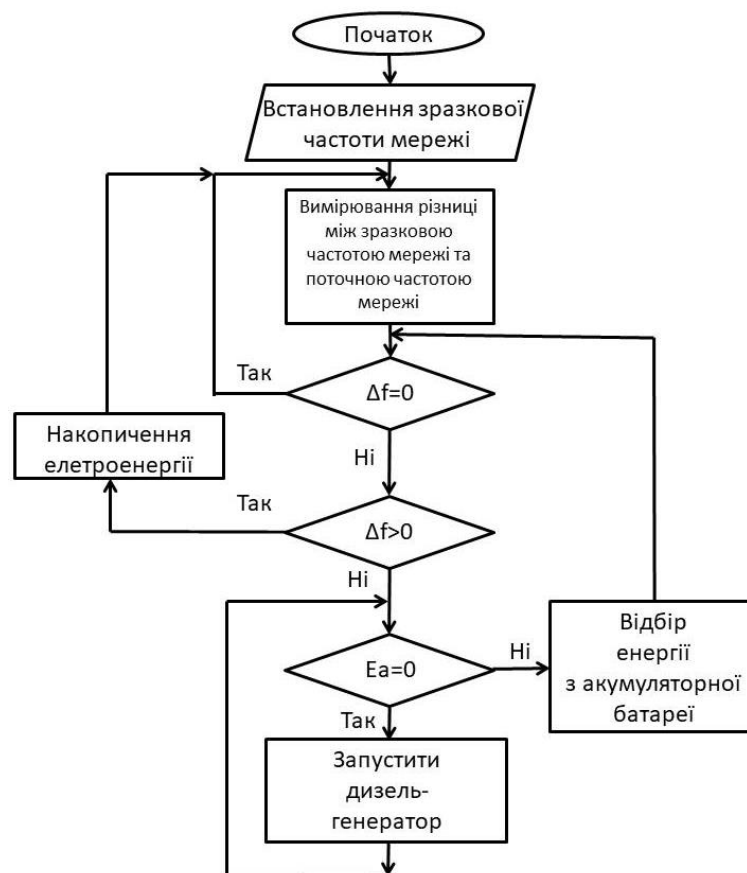


Рис. 2. Блок схема алгоритму керування гібридною сонячною електростанцією

У відповідності до рисунку 2 на початку алгоритму здійснюється встановлення зразкової частоти мережі. Далі здійснюється вимірювання різниці між зразковою частотою мережі та поточною частотою мережі. У випадку, якщо різниця між зразковою частотою мережі та поточною частотою мережі $\Delta f=0$, регулювання не відбувається, тому що в мережі кількість виробленої електричної енергії дорівнює кількості спожитої електричної.

У випадку, якщо різниця між зразковою частотою мережі та поточною частотою мережі $\Delta f>0$, відбувається процес накопичення енергії в акумуляторній батареї. У випадку, якщо різниця між зразковою частотою мережі та поточною частотою мережі $\Delta f<0$, здійснюється перевірка стану заряду акумуляторної батареї. Якщо кількість енергії в акумуляторній батареї $E_a=0$, це означає, що акумуляторна батарея розряджена. У цьому випадку необхідно запустити дизель-генератор і забезпечити недостачу електричної енергії в навантаженні.

3. Висновки

В роботі розглянуто інтелектуальне керування гібридною сонячною електростанцією. Встановлено, що інтелектуальне керування гібридною сонячною електростанцією гарантує, що поточна генерація та навантаження в будь-який момент будуть ідеально підібрані. Система забезпечує постійну стабільність, швидко реагуючи на стрибки генерації та навантаження.

Особливістю методу керування гібридною сонячною електростанцією є максимальне використання енергії сонця і вітру, а також економічне використання дизельного пального дизельним генератором. Для забезпечення цих вимог використовується потужна акумуляторна батарея, яка здатна накопичувати надлишок електроенергії при високих рівнях освітлення та швидкості вітру.

Час, який необхідний системі для досягнення номінальної кутова частоти мережі, залежить від моменту інерції першого блоку генеруючого пристрою мережі. Мережа формується одним великим генератором електричної енергії, а додаткові генератори синхронізуються з ним.

Література

1. S.M. Shaahid and M.A. Elhadidy, Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for commercial loads in desert environments. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 11(8), 2007
2. M.A. Elhadidy and S.M. Shaahid, Parametric study of hybrid (wind+solar+diesel) power generating systems. *Renewable Energy*, vol. 21(2), pp. 129–139, 2000.
3. T. Tezer, R. Yaman, and G. Yaman, Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 73, pp. 840–853, 2017.
4. M.D.A. Al-falahi, S.D.G. Jayasinghe, and H. Enshaei, A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy Convers. Manage.*, vol. 143, pp. 252–274, 2017.
5. B.J. Saharia and M. Manas, Viability analysis of photovoltaic/wind hybrid distributed generation in an isolated community of Northeastern India. *Distrib. Gener. Altern. Energy J.*, vol. 32(1), pp. 49–80, 2017.
6. A. Yahiaoui, K. Benmansour and M. Tadjine, Control, analysis and optimization of hybrid PV-diesel-battery systems for isolated rural city in Algeria. *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 1–10, 2016.
7. R. Bouchebbat and S. Gherbi, A novel optimal control and management strategy of stand-alone hybrid PV/wind/diesel power system. *J. Control Autom. Electr. Syst.*, vol. 28(2), pp. 284–296, 2017.
8. B. Ould Bilal, V. Sambou, P. A. Ndiaye, C.M.F. Kebe, and M. Ndong, Study of the Influence of load profile variation on the optimal sizing of a standalone hybrid PV/wind/battery/diesel system. *Energy Proc.*, vol. 36, pp. 1265–1275, 2013.
9. L.W. Chong, Y.W. Wong, R.K. Rajkumar and D. Isa, An optimal control strategy for standalone PV system with battery-supercapacitor hybrid energy storage system. *J. Power Sources*, vol. 331, pp. 553–565, 2016.

ДИПЛОМНА РОБОТА НА ТЕМУ:

Метод керування гібридною сонячною електростанцією

Виконав

ст. гр. АКПМ-21-1

Олександр РУДЕНОК

Науковий керівник

д.т.н., проф.

Валерій МАРТИНЮК

Додаток Б
Презентація

Актуальність теми. Станом на сьогоднішній день стаціонарними джерелами енергопостачання є дизель-генератори, які працюють на вуглеводневій сировині. В умовах роботи зі змінним графіком навантаження на електромережу, дизель-генератори не ефективні, у зв'язку з високими показниками питомої витрати палива при роботі в режимі з низьким ККД, що призводить до збільшення витрат на паливо та загострення екологічних проблем. Також важливим недоліком дизель-бензогенераторів є проблема доставки палива. Тому дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією є актуальним завданням в Україні та у світі цілому.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності гібридної сонячної електростанцією шляхом розробки методу керування гібридною сонячною електростанцією в реальному масштабі часу.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати будову гібридної сонячної електростанції;
 - проаналізувати і обрати математичні моделі складових блоків гібридної сонячної електростанції;
 - розробити імітаційні моделі складових блоків гібридної сонячної електростанції;
 - розробити імітаційну модель гібридної сонячної електростанції;;
 - розробити метод керування гібридною сонячною електростанцією із джерелами та споживачами електричної напруги у реальному масштабі часу.
- **Об'єкт дослідження** – процес керування гібридною сонячною електростанцією.
 - **Предмет дослідження** – метод керування гібридною сонячною електростанцією.
 - **Методи досліджень.** При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, теорії автоматичного керування, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.
 - **Наукова новизна одержаних результатів.** У результаті проведеного дослідження:
 - 1. Розроблено метод керування гібридною сонячною електростанцією, який відрізняється від існуючих методів тим, що запропоновано аналізувати похибку частоти мережі змінного струму системою керування і за результатами аналізу здійснювати збільшення потужності джерел та споживачів електричної енергії у реальному масштабі часу. Це забезпечує підвищення енергетичної ефективності генерування електричної енергії.

- **Практична значимість отриманих результатів:**

У роботі розроблена система керування гібридною сонячною електростанцією у реальному масштабі часу на основі використання інформації про похибку частоти мережі змінного струму в реальному масштабі часу. Використання такої системи дозволяє підвищити ефективність гібридної сонячної електростанції

Будова гібридної сонячної електростанції

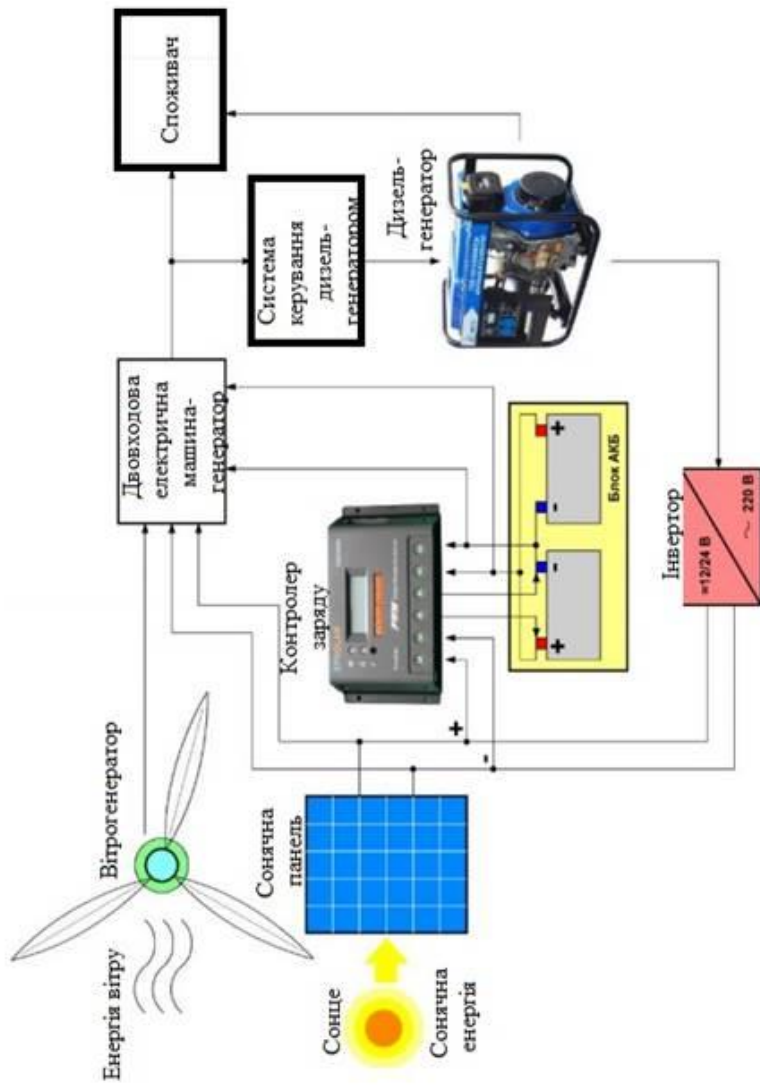


Рисунок 1 – Будова гібридної сонячної електростанції

Баланс активної та реактивної потужності в мережі

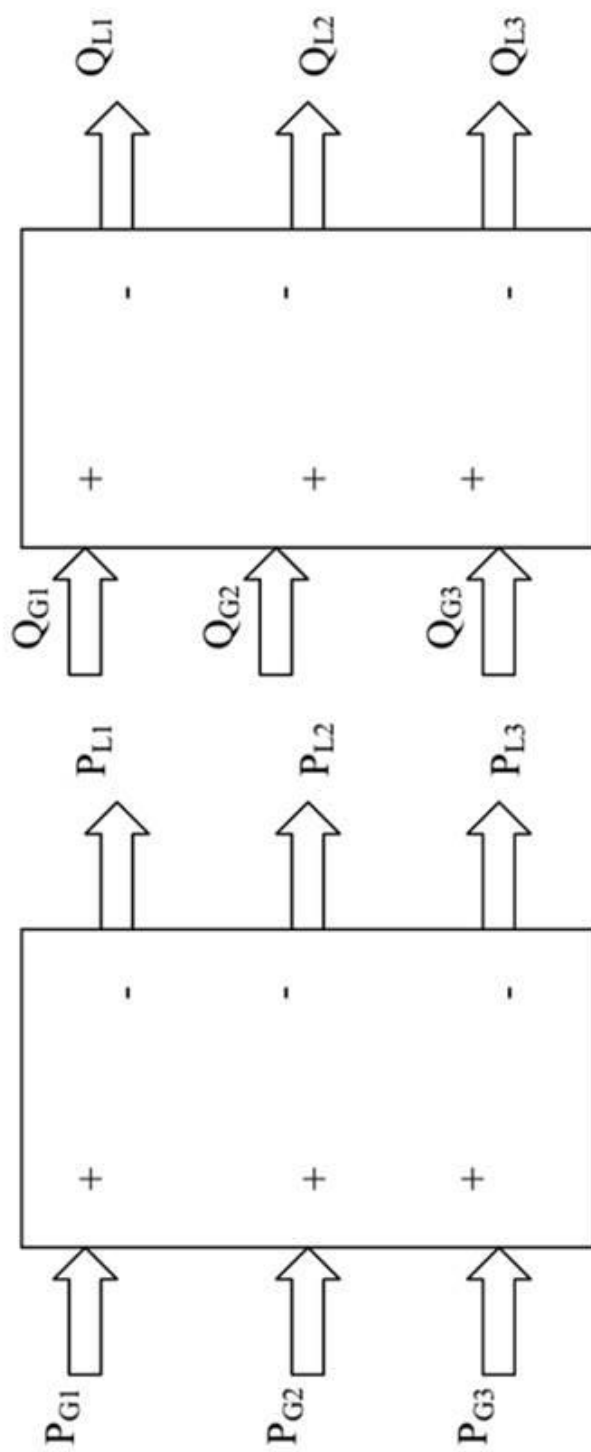


Рисунок 2 - Баланс активної та реактивної потужності в мережі

Графік зміни кутової частоти мережі у часі в залежності від співвідношення загальної потужності генерації електроенергії

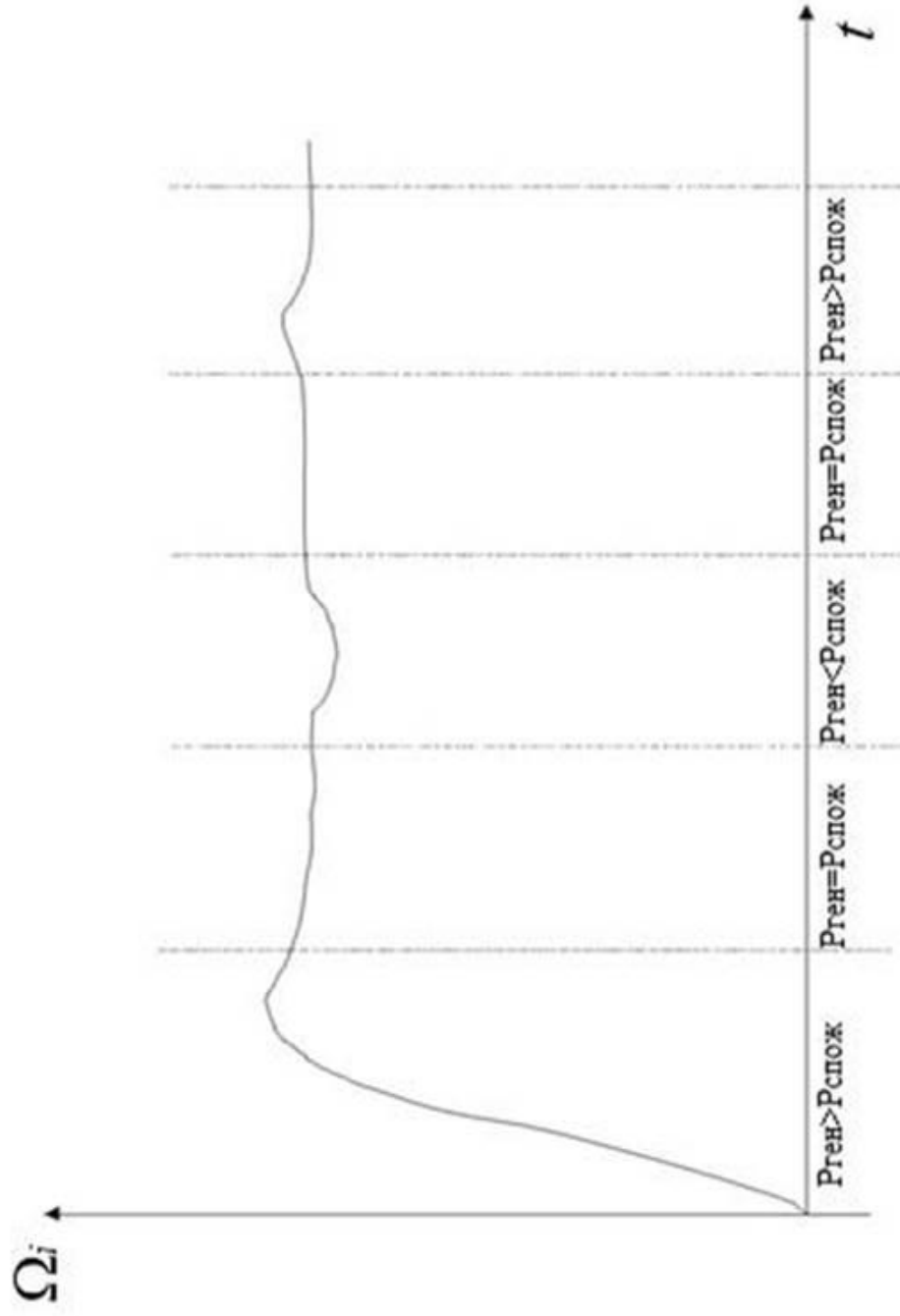


Рисунок 3 Графік зміни кутової частоти мережі у часі в залежності від співвідношення загальної потужності генерації електроенергії та загальної потужності споживання електроенергії

Області роботи вітрогенерера

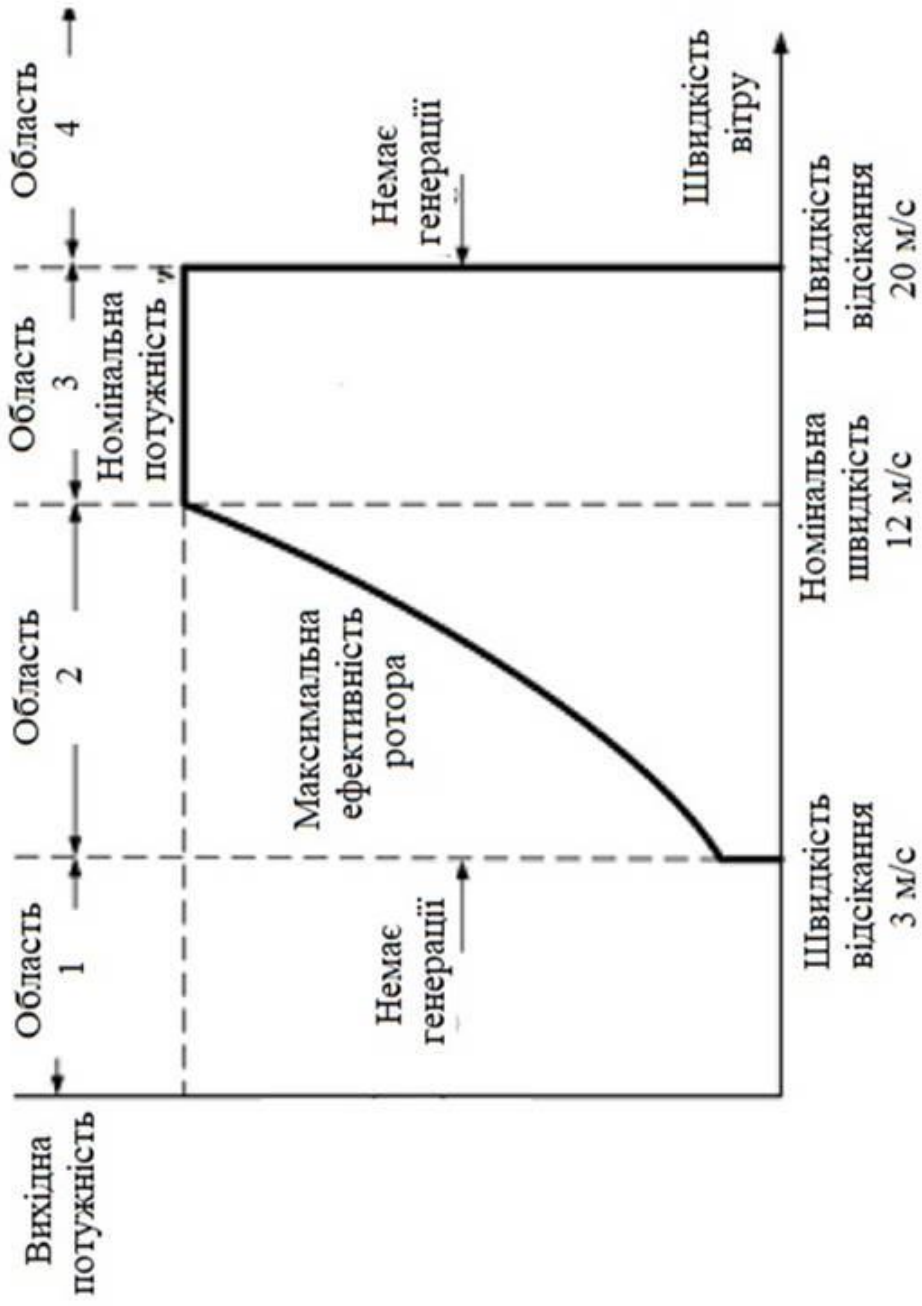


Рисунок 4 – Області роботи вітрогенерера

Еквівалентної схеми заміщення фотоелектричної комірки

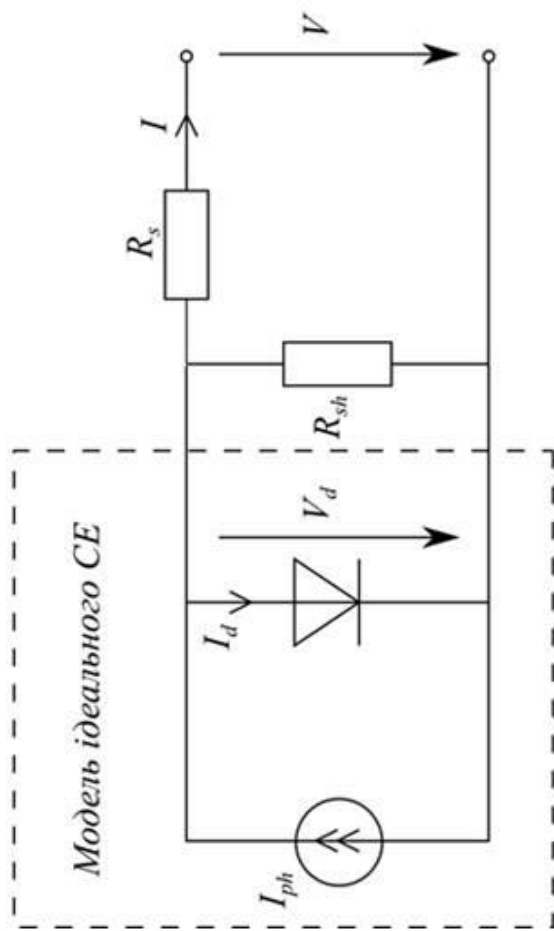


Рисунок 5 - Еквівалентної схеми заміщення фотоелектричної комірки

Характеристики фотоелектричної комірки

8

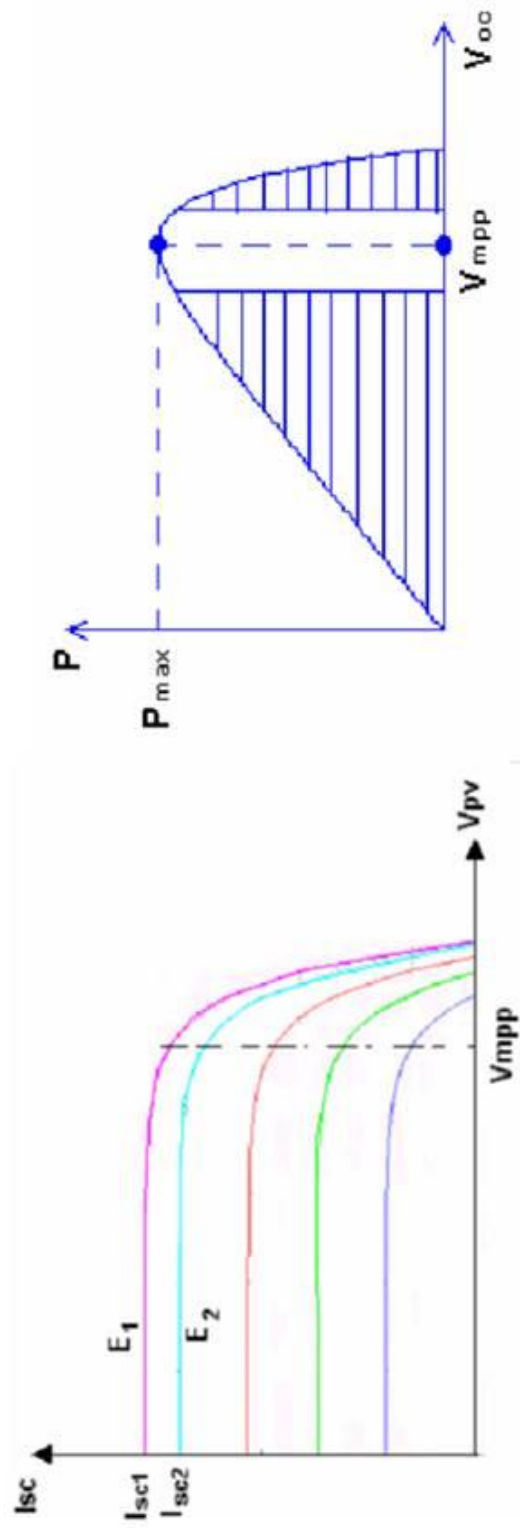


Рисунок 6 - Характеристики фотоелектричної комірки

Еквівалентна схема елемента акумуляторної батареї

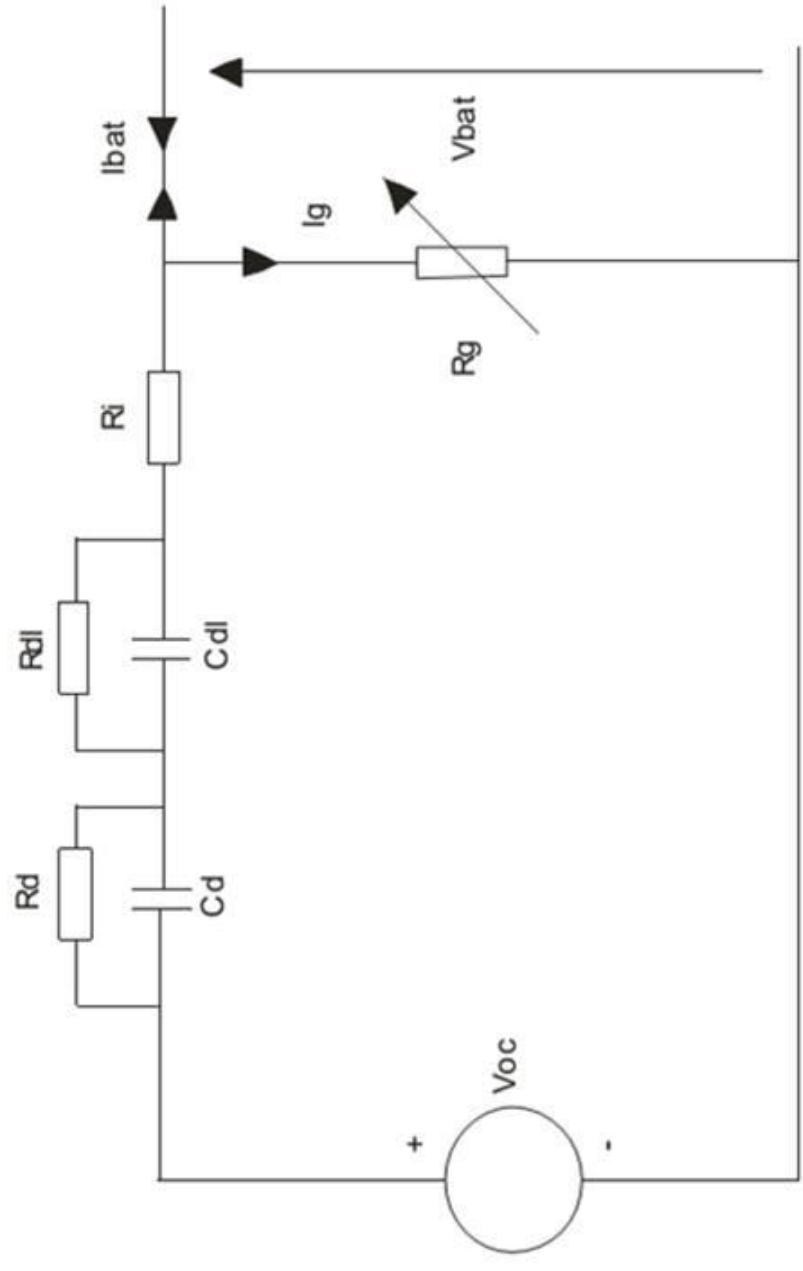


Рисунок 7 – Еквівалентна схема елемента акумуляторної батареї

Структурна схема дизель генератора

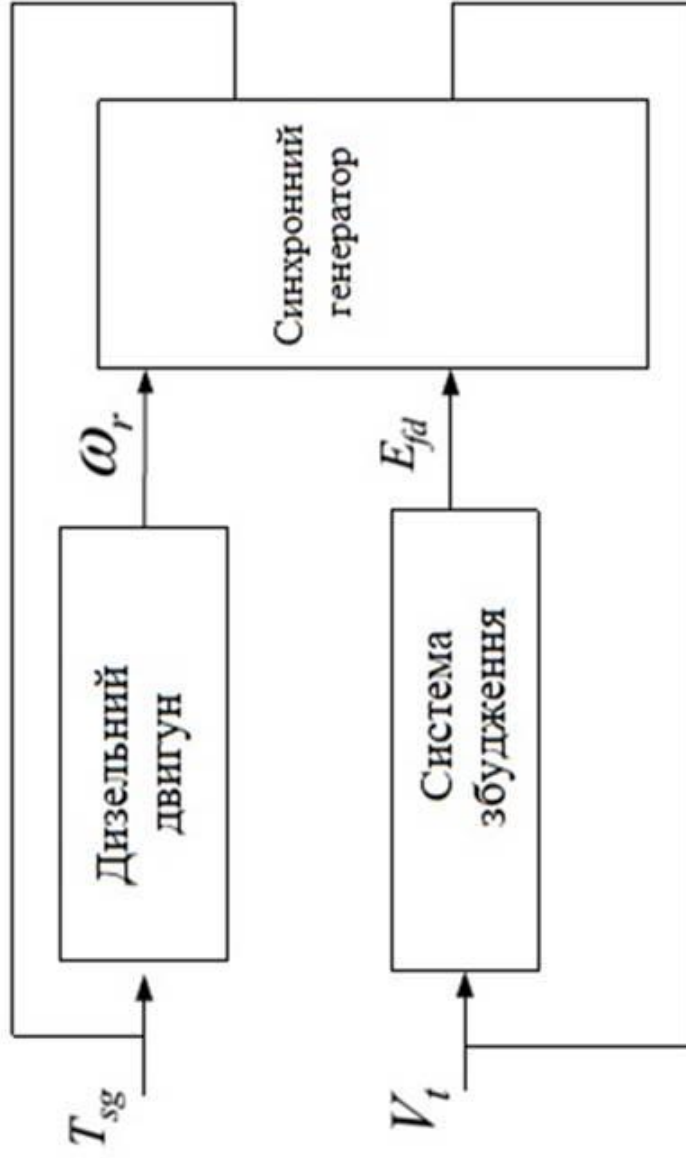


Рисунок 8 – Структурна схема дизель генератора

Загальна структура моделі дизельного двигуна

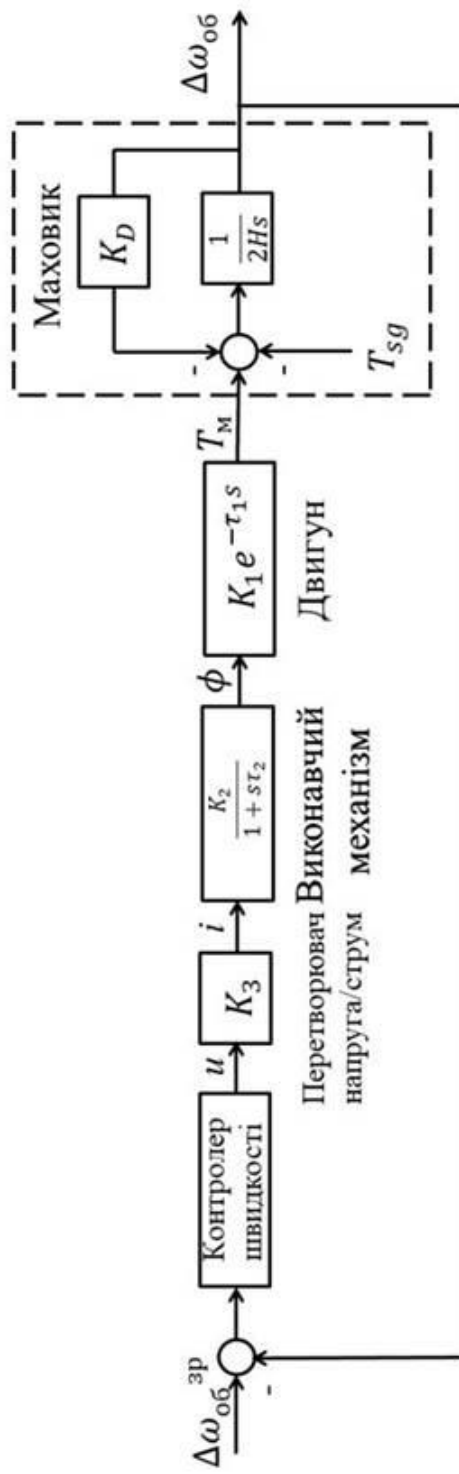


Рисунок 9 – Загальна структура моделі дизельного двигуна

Під'єднання до мережі вітрогенератора гібридної сонячної електростанції

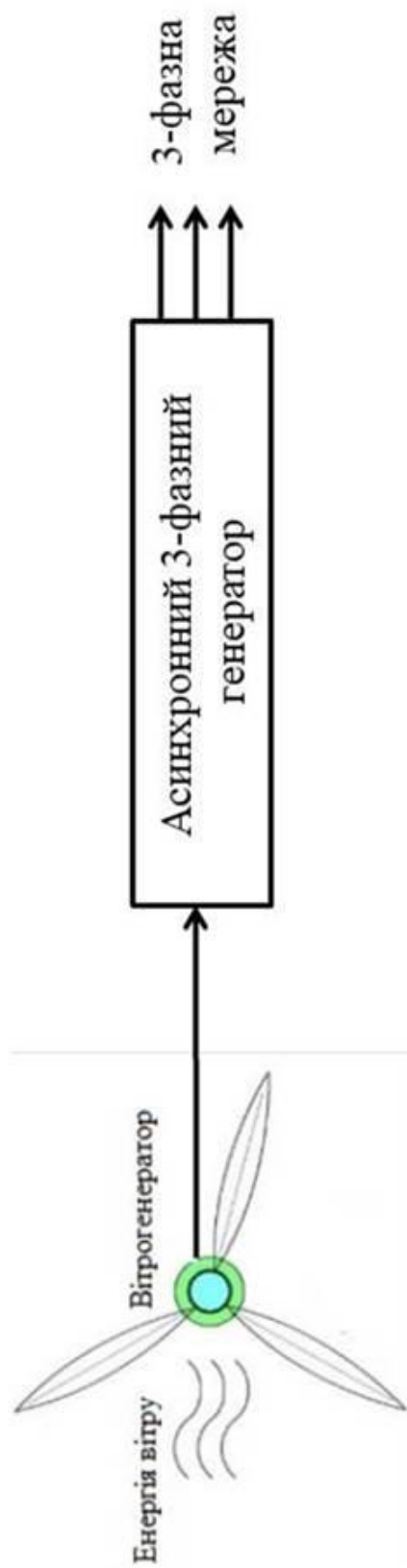
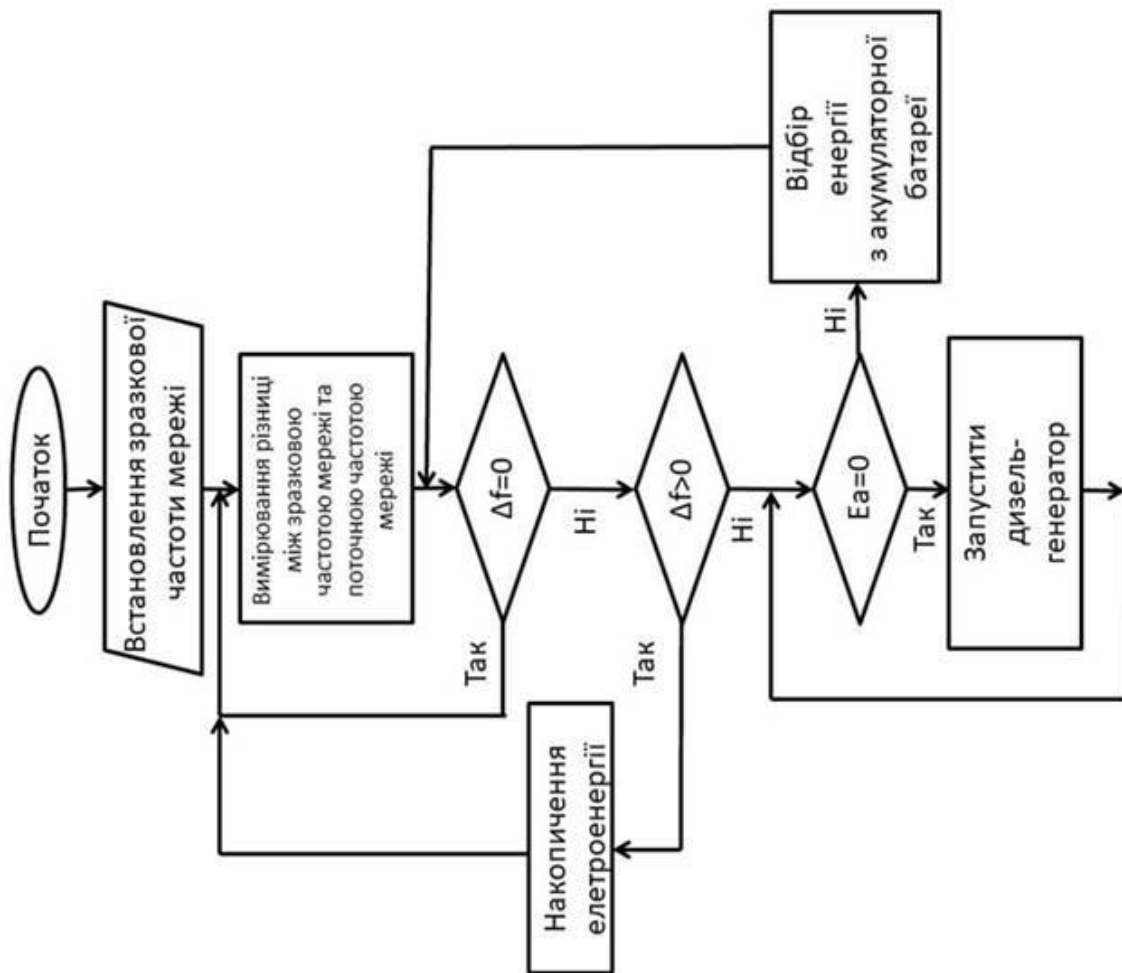
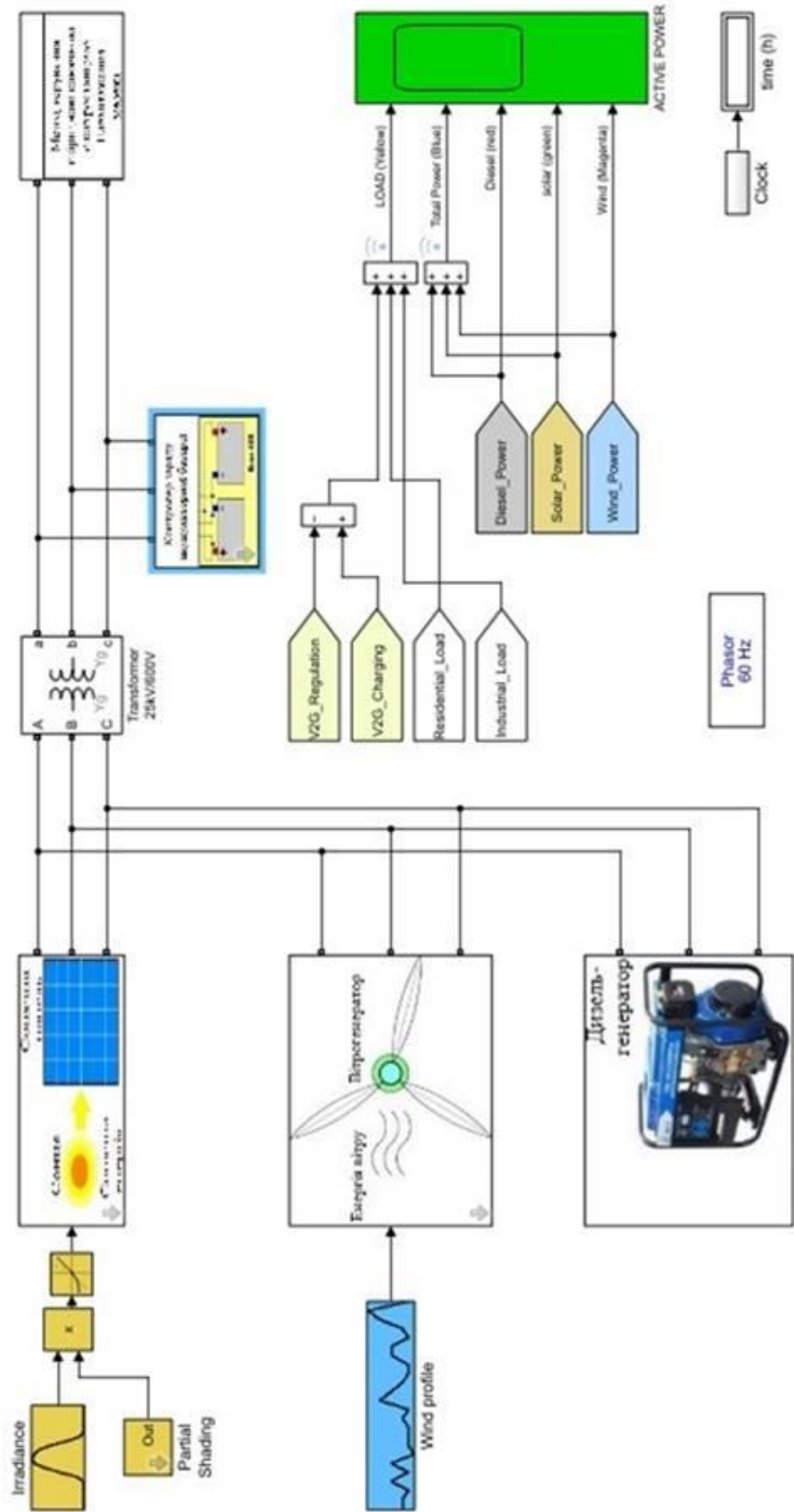


Рисунок 10 – Під'єднання до мережі вітрогенератора гібридної сонячної електростанції

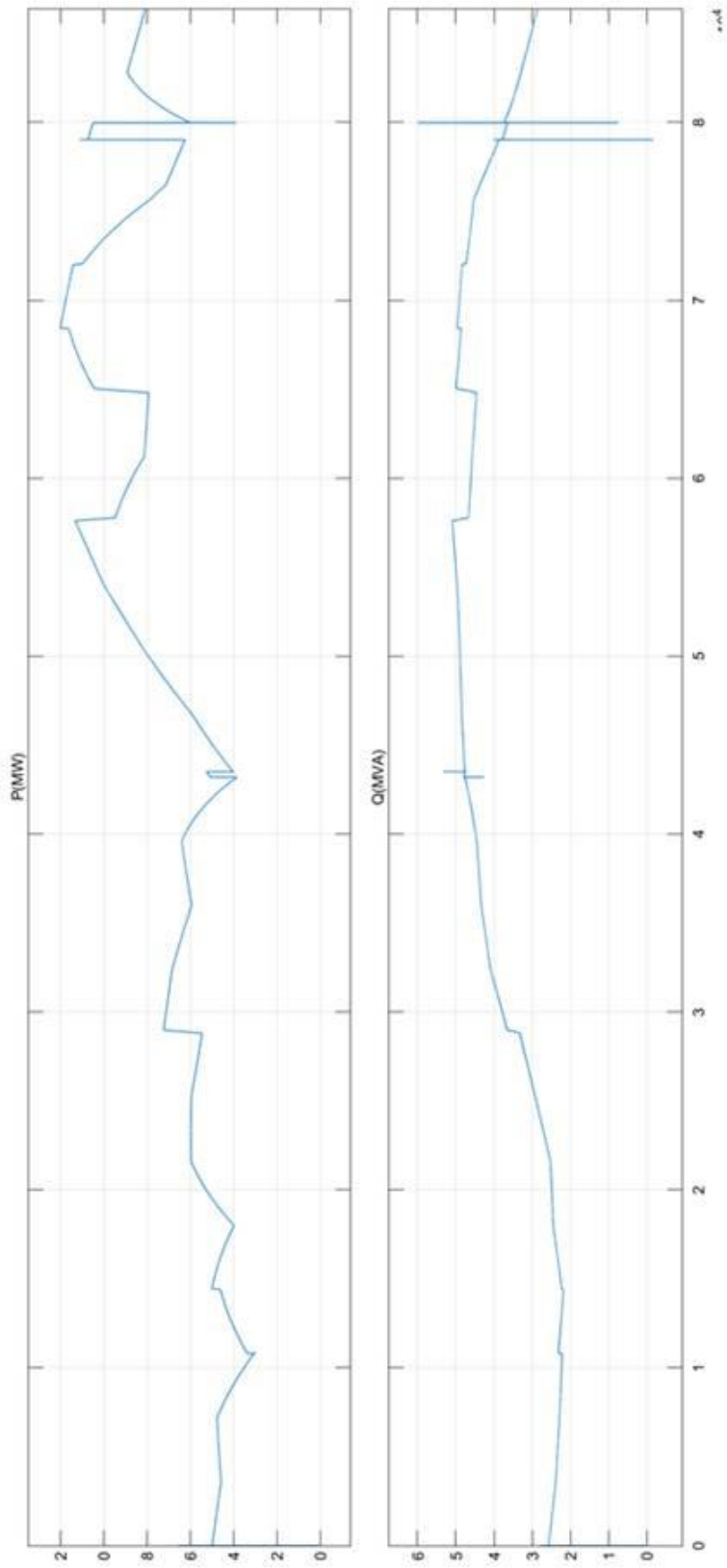
Блок схема алгоритму керування гібридною сонячною електростанцією¹³



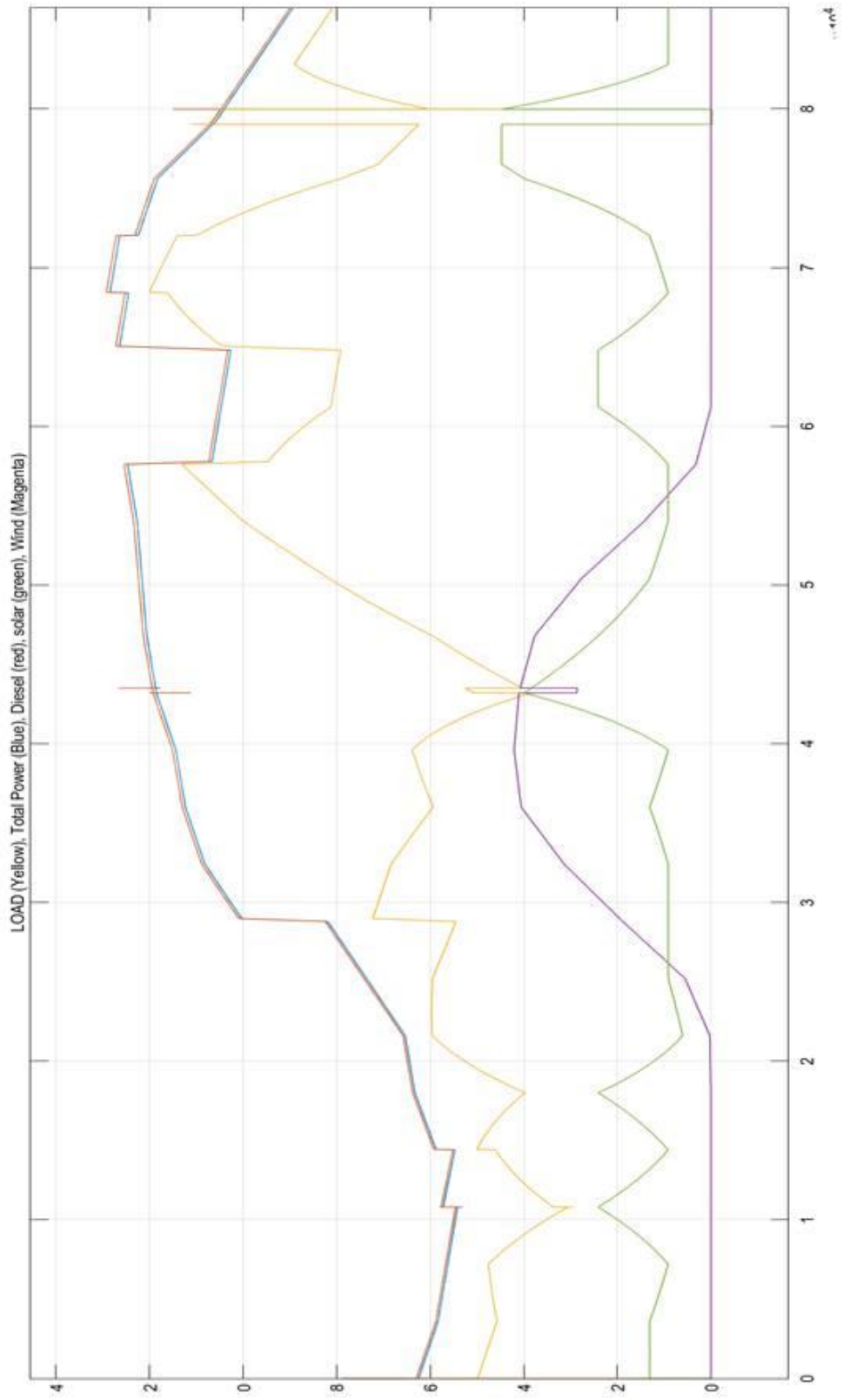
Імітаційна модель дослідження методу керування гібридною сонячною електростанцією



Результати імітаційного дизель-генератора гібридної сонячної електростанції



Результати імітаційного методу керування гібридною сонячною електростанцією



1. Проаналізовано та досліджено будову гібридної сонячної електростанції, яка складається із вітрогенератора, сонячної панелі, акумуляторної батареї, контролеру заряду, дизель-генератора та система керування.
2. Інтелектуальне керування гібридною сонячною електростанцією гарантує, що поточна генерація та навантаження в будь-який момент будуть ідеально підібрані. Система забезпечує постійну стабільність, швидко реагуючи на стрибки генерації та навантаження.
3. У відповідності до будови гібридної сонячної електростанції, обрано математичні моделі усіх блоків, що входять до складу гібридної сонячної електростанції, проаналізовано їх переваги та недоліки. Розроблено імітаційні моделі усіх блоків, що входять до складу гібридної сонячної електростанції, проаналізовано їх переваги та недоліки.
4. Розроблено імітаційну модель гібридної сонячно електростанції до складу якої входить імітаційна модель сонячних панелей, імітаційна модель вітрогенератора, імітаційна модель дизель-генератора, імітаційна модель акумуляторної батареї разом із контролером заряду та імітаційна модель блоку керування гібридною сонячною електростанцією, у якому реалізовано запропонований метод керування гібридною сонячною електростанцією.
5. Аналіз результатів імітаційного моделювання, показує, що активна потужність гібридної сонячної електростанції співпадає з активною потужністю споживання навантаження. Звідси можна зробити висновок, що запропонований метод керування гібридною сонячною електростанцією дозволяє ефективно використовувати відновлювані джерела електроенергії, що є досить актуальним для України.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Anti-Plagiarism v-15.257**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%****Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 7%**

ID: 109312 Назва: МКР Метод керування гібридною сонячною електростанцією Додано в БД: 2022-12-10 Автора: Руденко О. В. Керівники: Мартинюк В.В., д.т.н., професор Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	75736	586	890 (1%)	9 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1013235235

Дата перевірки:
07.12.2022 23:22:25 EET

Тип перевірки:
Doc vs Internet

Дата звіту:
07.12.2022 23:36:01 EET

ID користувача:
100005862

Назва документа: Руденок_антиплагіат

Кількість сторінок: 78 Кількість слів: 10252 Кількість символів: 81412 Розмір файлу: 2.52 MB ID файлу: 1012995037

0.14% Схожість

Найбільша схожість: 0.09% з Інтернет-джерелом (https://revolution.allbest.ru/pedagogics/00359878_0.html)

0.14% Джерела з Інтернету

12

Сторінка 80

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Не знайдено жодних посилань

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

46

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу магістра Олександра РУДЕНКА
на тему: "Метод керування гібридною сонячною електростанцією?"

Кваліфікаційну роботу присвячено розробці методу керування гібридною сонячною електростанцією. В ній на основі математичних моделей вітрогенератора, сонячної батареї, акумуляторної батареї та дизельного генератора розроблено метод керування гібридною сонячною електростанцією, який відрізняється від існуючих методів тим, що запропоновано аналізувати похибку частоти мережі змінного струму системою керування і за результатами аналізу здійснювати збільшення потужності джерел та споживачів електричної енергії у реальному масштабі часу. Це забезпечує підвищення енергетичної ефективності генерування електричної енергії.

Особливістю методу керування гібридною сонячною електростанцією є максимальне використання енергії сонця і вітру, а також економічне використання дизельного пального дизельним генератором. Для забезпечення цих вимог використовується потужна акумуляторна батарея, яка здатна накопичувати надлишок електроенергії при високих рівнях освітлення та швидкості вітру.

У випадку недостатнього рівня освітлення та швидкості вітру, а також недостатнього заряду акумуляторної батареї, система керування гібридною сонячною електростанцією запускає дизельний генератор і компенсує недостатню потужність відновлюваних джерел енергії.

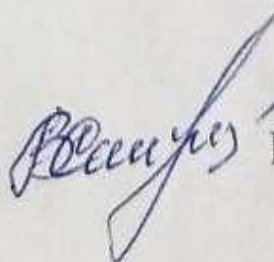
Всі розділи кваліфікаційної роботи виконанні сумлінно та на високому науковому рівні із дотриманням вимог до кваліфікаційних робіт магістрів. Результати досліджень представлені у вигляді статті у фаховому журналі «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» №4 2022р.

До недоліків роботи можна віднести неповний аналіз впливу температури на роботу дизельного генератора, але вказаний недолік не зменшує наукового рівня кваліфікаційної роботи.

Вважаю, що кваліфікаційна робота магістра Олександра РУДЕНКА заслуговує оцінки «відмінно», а магістр заслуговує присвоєння кваліфікації магістра з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Рецензент:

к.т.н., професор, завідувач
кафедри фізики і електротехніки



Володимир КОСЕНКОВ

Завідувачу кафедри АКІТ
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Руденка Олександра Валерійовича
ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи АКІТм-21-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2022 (зі змінами від 26.11.2022), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

08.12.2022

дата

Корсун

підпис

РІШЕННЯ КАФЕДРИ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод керування гібридною сонячною електростанцією

Автор: Руденок Олександр Валерійович

Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Науковий керівник: д.т.н, проф. Мартинюк Валерій Володимирович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 0,14%, виявлені в роботі відповідають тексту стандартних бланків та списку літератури, решта запозичень є випадковими, або на них є посилання, тому ці запозичення не є плагіатом, бо вони не стосуються наукової новизни і практичної значущості роботи.

08.12.2022р.

Науковий керівник роботи:

Валерій МАРТИНЮК

Зав. каф. АКІТ

Валерій МАРТИНЮК