

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Дослідження параметрів режиму роботи
сонячної електростанції”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Дмитро НИЖНИК
« ____ » _____ 2023 р.
Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____ Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____ 2023 р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Нижника Дмитра Володимировича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження параметрів режиму роботи сонячної електростанції

Study of the parameters of the solar power plant operation mode

2. Керівник роботи (проекту) Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук., доц.

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 20.12.2023 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є дослідження параметрів режиму роботи сонячної електростанції. Завдання роботи: 1. Аналіз існуючих систем електроживлення з використанням альтернативних джерел енергії. 2. Дослідження топологій перетворювачів постійного струму для СЕС. 3. Порівняльна оцінка ефективності інверторів СЕС. 4. Вибір силової схеми перетворювача постійного струму і інвертора. 5. Розробка імітаційної моделі СЕС. 6. Побудова ВАХ та вольт-ватних характеристик фотопанелей. 7. Аналіз роботи СЕС за допомогою комп'ютерного моделювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>10.10.2023</i>	
<i>2</i>	<i>Аналітичний огляд питання застосування сонячних електростанцій в системах електропостачання</i>	<i>13.10.2023</i>	
<i>3</i>	<i>Аналітичне дослідження схемних рішень сонячних інверторів</i>	<i>30.10.2023</i>	
<i>4</i>	<i>Аналіз режимів роботи сонячної електростанції</i>	<i>15.11.2023</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>30.11.2023</i>	
<i>7</i>	<i>Висновки</i>	<i>07.12.2023</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>11.12.2023</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>14.12.2023</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Нижник Д. В. Дослідження параметрів режиму роботи сонячної електростанції

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2023 р.

Метою роботи є дослідження параметрів режиму роботи сонячної електростанції.

Проведено аналіз існуючих систем електроживлення з використанням альтернативних джерел енергії. Встановлено, що найпоширенішими є конфігурації мережевих ФЕС без акумуляторів завдяки простоті, надійності та високому ККД перетворення енергії. Проте вони повністю залежать від наявності мережевого живлення. Застосування гібридних схем з акумуляторами та автономними інверторами дає можливість створення систем безперебійного живлення споживачів, ефективного використання та балансування всіх джерел енергії.

Проведений в роботі аналіз показав, що існує велика різноманітність топологій та модифікацій перетворювачів постійного струму для систем альтернативної енергетики. Їх класифікація базується на низці структурних, схемотехнічних та режимних характеристик. Ключовими особливостями при виборі та застосуванні перетворювачів є коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт підсилення напруги, динамічні показники, рівень пульсацій тощо.

Розроблена комп'ютерна модель системи електропостачання з сонячною електростанцією дала змогу дослідити ефективність застосування сонячних інверторів.

Ключові слова: сонячна електростанція, інвертор, система електропостачання

THE SUMMARY

Nyzhnyk D. V. Study of the parameters of the solar power plant operation mode

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2023

The purpose of the work is to study the operating mode parameters of the solar power plant.

An analysis of existing power supply systems using alternative energy sources was carried out. It has been established that the most common configurations of networked solar power plants without batteries are due to their simplicity, reliability and high efficiency of energy conversion. However, they are completely dependent on the availability of mains power. The use of hybrid circuits with batteries and autonomous inverters makes it possible to create systems of uninterrupted power supply for consumers, efficient use and balancing of all energy sources.

The analysis carried out in the work showed that there is a wide variety of topologies and modifications of direct current converters for alternative energy systems. Their classification is based on a number of structural, schematic and operational characteristics. Key features when choosing and using converters are efficiency, voltage gain, dynamic performance, ripple level, etc.

The developed computer model of the power supply system with a solar power plant made it possible to investigate the effectiveness of the use of solar inverters.

Keywords: solar power plant, inverter, power supply system

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	11
1.1 Аналіз сучасних систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії	11
1.2 Аналіз схем систем електропостачання з сонячними електростанціями	22
Висновки до розділу	34
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМНИХ РІШЕНЬ СОНЯЧНИХ ІНВЕРТОРІВ	36
2.1 Класифікація сонячних інверторів систем електропостачання.....	36
2.2 Порівняльний аналіз схемних рішень DC/DC перетворювачів інверторів	45
2.3 Теоретичне дослідження принципів роботи іверторів СЕС	55
2.4 Аналіз ефективності інверторів сонячних електростанцій.....	61
Висновки до розділу	63
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	65
3.1 Розробка і аналіз принципової схеми інвертора СЕС	65
3.2 Аналіз принципової схеми DC/DC перетворювача	68
3.3 Математична модель сонячного інвертора	70
3.4 Алгоритми знаходження точки максимальної потужності	74
3.5 Комп'ютерне моделювання режимів роботи сонячної електростанції.....	76
Висновки до розділу	80

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	82
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ВСТУП

Актуальність теми. Поновлювані джерела енергії, такі як сонячна та вітрова, демонструють стрімке зростання останніми роками. З-поміж них сонячна енергетика стає все більш привабливою завдяки своїй екологічності, тихій роботі та можливості отримання чистої енергії. Під час генерації електроенергії з сонячних батарей важливу роль відіграють DC-DC перетворювачі, котрі дозволяють підвищити ефективність та стабільність роботи фотоелектричних систем.

Згідно з аналітиками, частка сонячної генерації в загальному енергобалансі України сягає лише близько 1%, тоді як у країнах ЄС цей показник значно вищий. Проте Україна має гарні передумови для розвитку сонячної енергетики завдяки сприятливим кліматичним умовам та наявності необхідних ресурсів.

Експерти прогнозують подальше зростання частки сонячних електростанцій в енергосистемі України. Це дозволить не лише диверсифікувати джерела енергії, але й сприятиме енергонезалежності та екологічності країни. Тому уряду варто стимулювати інвестиції у цю галузь шляхом запровадження спеціальних тарифів та податкових пільг.

Ефективне використання енергії сонячних панелей потребує застосування систем відстеження точки максимальної потужності (точки MPPT), що дозволяють отримувати максимум енергії за певних умов. У даній роботі розглядаються основні характеристики DC-DC перетворювачів, які є ключовими компонентами фотоелектричних установок.

Здійснено детальний аналіз різних топологій інверторів постійного струму, включаючи ізольовані та неізольовані. Оцінено порівняльну ефективність стратегій їх модуляції. Крім цього, коротко висвітлено останні тенденції та перспективні напрями розвитку інверторів наступного покоління.

За прогнозами аналітиків, попит на високоефективні інвертори для сонячної енергетики найближчими роками значно зросте. Це пов'язано як із загальним збільшенням частки сонячних електростанцій, так і з потребами модернізації вже наявних потужностей. Тож подальші дослідження в цій сфері залишаються надзвичайно актуальними.

Поновлювана енергетика на основі сонячних та вітрових установок є перспективним напрямом розвитку енергопостачання завдяки екологічності та невичерпності джерел. Зокрема, фотоелектричні перетворювачі знаходять все більше застосування – від автономних пристроїв до потужних електростанцій.

Незважаючи на вищу вартість сонячних електроустановок порівняно з традиційними, відсутність потреби в паливі робить їх економічно привабливими. Проте постає питання передачі максимально можливої кількості енергії від сонячних панелей до електромереж. Цього можна досягти шляхом розробки ефективних алгоритмів керування роботою перетворювачів.

За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, до 2030 року глобальні потужності сонячної генерації зростуть удвічі. А отже, дослідження у цій сфері триватимуть, аби максимально реалізувати потенціал сонячної енергії.

Метою роботи є дослідження параметрів режиму роботи сонячної електростанції.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- аналіз існуючих систем електроживлення з використанням альтернативних джерел енергії;
- дослідження топологій перетворювачів постійного струму для СЕС;
- порівняльна оцінка ефективності інверторів СЕС;
- вибір силової схеми перетворювача постійного струму і інвертора;
- розробка імітаційної моделі СЕС;

- побудова ВАХ та вольт-ватних характеристик фотопанелей;
- аналіз роботи СЕС за допомогою комп'ютерного моделювання.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в перетворювачах постійного струму для сонячних електростанцій.

Предмет дослідження – інвертори потужністю до 20 кВт для фотоелектричних установок.

Методи дослідження ґрунтувалися на використанні апарату теорії електричних кіл та систем автоматичного керування. Цифрове моделювання здійснювалося за допомогою програмного пакета Matlab.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Здійснено аналіз існуючих схемотехнічних рішень перетворювачів постійного струму та інверторів для фотоелектричних сонячних станцій.
2. Розроблено цифрову імітаційну модель сонячної електростанції з DC/DC перетворювачем і інвертором, система керування якими базується на MPPT алгоритмі для підвищення енергоефективності.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблене в роботі схемотехнічне рішення перетворювача постійного струму з інвертором може бути використане при проектуванні сонячних електростанцій.
- створена імітаційна модель фотоелектричної станції дозволяє досліджувати режими роботи різних типів сонячних панелей та оптимізувати системи керування перетворювачами.

Структура роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 88 сторінок. Основна частина викладена на 78 сторінках друкованого тексту, містить 39 рисунків. Список використаних джерел містить 21 джерело та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1 Аналіз сучасних систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії

Система безперебійного електроживлення призначена для надійного забезпечення споживачів першої категорії електроенергією під час тривалих перерв у її постачанні з зовнішньої мережі. Сонячна електростанція гарантує споживачам електроенергію високої якості навіть за умови значних коливань напруги, короткочасних чи тривалих відключень електропостачання в зонах нестабільного енергозабезпечення. Зовнішня електромережа в таких системах може використовуватися як основне чи додаткове джерело живлення, залежно від якості підключеної електроенергії та конкретного призначення даної енергосистеми.

Сонячну електростанцію також можна застосувати для отримання додаткової потужності у разі встановлення лімітів на електропостачання окремої лінії навантаження. Крім того, надлишки виробленої сонячної електроенергії можуть продаватися енергопостачальній компанії з метою отримання додаткового прибутку.

Сонячні електростанції є ефективним джерелом екологічно чистої енергії. Вони дозволяють підвищити енергетичну безпеку та незалежність окремих об'єктів та регіонів. При правильному проектуванні та використанні сонячна енергетика може стати суттєвим доповненням до традиційних джерел електроживлення.

На рис. 1.1 зображено типову схему сонячної електростанції.

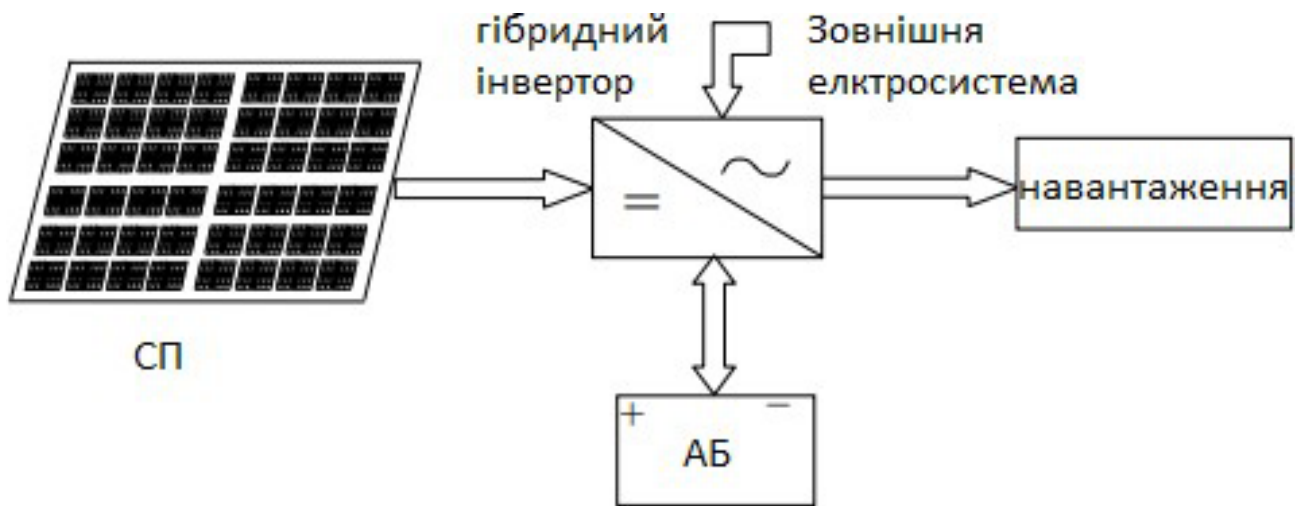


Рис. 1.1. Схема системи гарантованого електропостачання об'єктів

Вона складається з наступних основних елементів:

- сонячна батарея (СБ) - виробляє електроенергію з сонячного випромінювання за допомогою фотоелектричного ефекту;
- акумуляторна батарея (АБ) - накопичує електроенергію, вироблену сонячними батареями та забезпечує безперебійне електропостачання споживачів;
- гібридний інвертор (ГІ) - перетворює постійний струм акумуляторів і сонячних батарей на змінний струм 220В для живлення споживачів. До його складу вбудовано 2 зарядних пристрої:

- 1) від мережі 220В - для заряджання АБ від зовнішньої електромережі;
- 2) від сонячних батарей - для заряджання АБ струмом, що виробляється безпосередньо СБ.

Така схема дозволяє максимально ефективно використовувати сонячну енергію для виробництва електрики. Надлишки сонячної електроенергії накопичуються в акумуляторах, а в темний час доби та за несприятливих погодних умов споживання електроенергії забезпечується за рахунок накопиченої в АБ. Таким чином досягається цілодобове автономне безперебійне електроживлення об'єктів.

Для ефективного використання енергії в алгоритмі роботи системи гарантованого електроживлення передбачено режим енергозбереження. За умови достатньої кількості сонячного випромінювання живлення об'єктів здійснюється безпосередньо від сонячних батарей, а надлишки енергії спрямовуються на заряд акумуляторів. При цьому підключення до зовнішньої електромережі тимчасово від'єднується і система працює в автономному режимі.

Для запобігання надмірному розряду акумуляторів, що скоротить термін їх служби, встановлюється граничний рівень розряду на позначці 25-30%. Це дозволяє зберегти достатній запас ємності на випадок раптового обриву зовнішнього електропостачання.

Після зниження заряду акумуляторів нижче встановленого рівня, автоматично підключається електромережа для безперебійного живлення споживачів та одночасного дозаряджання акумуляторів. За наявності генерації сонячної електростанції в цей час відбувається комбіноване підживлення акумуляторів від двох джерел.

У разі повного обриву електропостачання з мережі, уся потужність, необхідна для забезпечення споживачів, виробляється акумуляторами. Їх ємність розраховується з урахуванням часу повної автономної роботи системи за найгірших погодних умов в зимовий період.

Потужність сонячної електростанції підбирається з розрахунку можливості повністю заряджати акумулятори не більше ніж за 2 дні в міжсезоння. Проте тривалі відключення електроенергії взимку можуть унеможливити заряд від сонячних батарей. В такому разі потрібне резервне джерело живлення - оптимально у вигляді вітрогенератора, в гіршому випадку - бензинового, дизельного або газового генератора.

На сьогодні існують технічні рішення сонячних енергосистем на базі високоякісного силового обладнання SMA Solar Technology AG, які дозволяють

створити власну автономну електромережу з гарантованим безперебійним живленням споживачів.

Такі системи призначені для надійного забезпечення електроенергією високої якості об'єктів будь-якої потужності за умови низької якості параметрів електропостачання зовнішньої мережі, включаючи значні перепади напруги або її відключення.

В них використовується інверторне обладнання останнього покоління з максимально ефективним алгоритмом перетворення енергії сонця та вітру в електрику. Застосовуються сучасні технології підвищення ККД і можливості роботи при великих перевантаженнях без втрати працездатності.

Такі характеристики дають змогу оптимально використовувати поновлювані джерела енергії для надійного енергопостачання автономних об'єктів в складних умовах експлуатації.

Виробником створено спеціальний інтернет-портал для моніторингу та керування сонячними енергосистемами в режимі реального часу. Він дозволяє відстежувати поточні показники роботи системи, а також накопичувати дані про обсяги генерації та споживання електроенергії.

Аналіз цієї інформації надає можливість оптимізувати алгоритми функціонування системи для максимально ефективного використання сонячної енергії в конкретних умовах експлуатації.

Крім того, при відкритті вільного ринку електроенергії з'являється можливість вибору режиму роботи для продажу надлишків виробленої сонячної електроенергії в загальну мережу за спеціальним "зеленим" тарифом. Це дозволяє підвищити окупність системи та отримувати додатковий дохід від інвестицій в альтернативну енергетику.

Отже, завдяки сучасним інформаційним технологіям сонячні електростанції можуть працювати ще ефективніше, автоматично оптимізуючи

використання енергії сонця та надаючи користувачам додаткові переваги.

Сонячна енергосистема з власною внутрішньою електромережею включає в себе інвертори І1 та І2, зворотній інвертор ОІ з вбудованим потужним зарядним пристроєм акумуляторних батарей від мережі 220В (див. рис. 1.2).

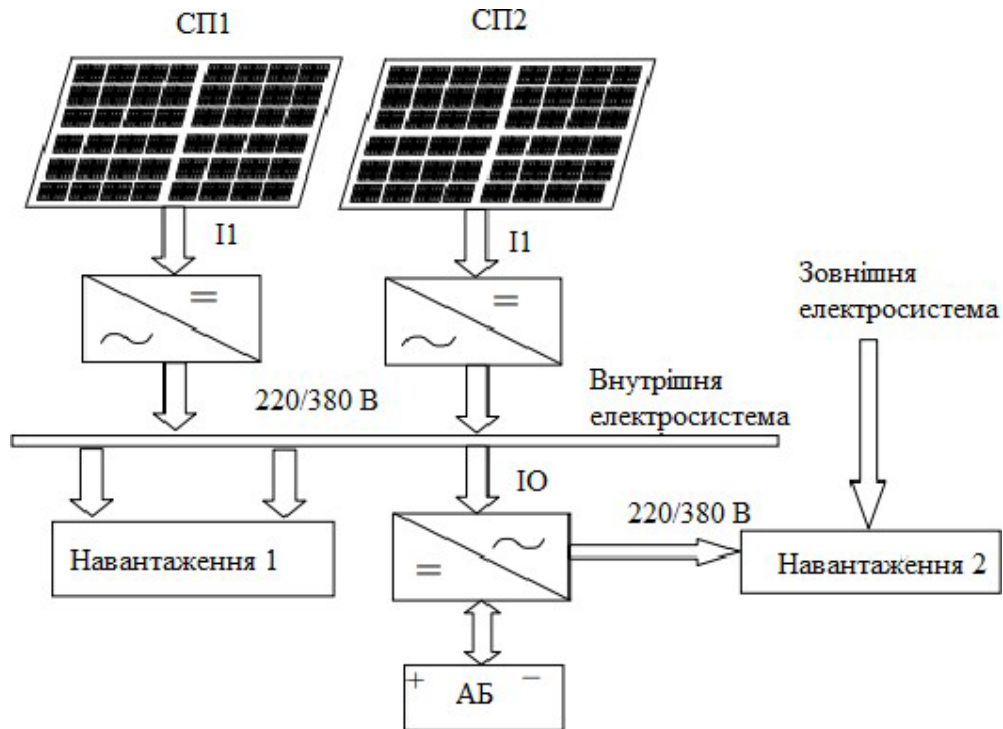


Рис. 1.2. Структурна схема сонячної енергосистеми

В алгоритмі роботи такої системи реалізовано режим енергозбереження наступним чином. Споживачі умовно поділяються на три групи:

1. Група безперебійного живлення (1-ї категорії) - пристрої, що потребують цілодобового електропостачання в будь-якому режимі.
2. Додаткові споживачі - можуть працювати як від мережі, так і автономно від сонячної електростанції за наявності надлишків сонячної енергії.
3. Силкові споживачі - живляться тільки від зовнішньої електромережі.

Такий розподіл дає змогу раціонально використовувати наявні джерела енергопостачання та значно економити споживання в разі обмежених

можливостей сонячної генерації.

Споживачі першої категорії можуть житися від чотирьох джерел: сонячних батарей, акумуляторів, зовнішньої електромережі або резервного генератора (бензинового, газового чи дизельного) за його відсутності.

В такій енергосистемі в першу чергу забезпечується максимальне використання сонячної енергії для живлення пріоритетних споживачів та заряду акумуляторів. За наявності надлишків від сонячних батарей можливе автоматичне підключення додаткових споживачів, а також передача енергії через зворотній інвертор ОІ для живлення силових навантажень або постачання в загальну мережу з отриманням доходу.

За відсутності зовнішнього електропостачання зворотній інвертор ОІ переходить на живлення навантажень не лише від акумуляторів, але і напряду від інверторів І1, І2 за умови денного освітлення. В цьому режимі акумулятори лише доповнюють сонячну генерацію при потребі.

За наявності мережі вдень зворотній інвертор споживає з мережі лише різницю між заданою потужністю навантаження та поточною генерацією сонячної електростанції. Таким чином реалізується максимальна економія зовнішньої електроенергії.

Розглянуті сонячні енергосистеми працюють в автоматичному режимі за задалегідь запрограмованим алгоритмом:

1. Вся електроенергія, що виробляється сонячними батареями, спрямовується на забезпечення живлення пріоритетних споживачів першої категорії. За недостатньої сонячної генерації, необхідна потужність добирається з зовнішньої мережі. При цьому також можливе підзаряджання акумуляторних батарей після їх розряду в аварійних режимах.

2. При короткочасних знеструмленнях зовнішньої мережі, інвертори забезпечують безперебійне живлення навантажень першої категорії із

стабільною якісною напругою.

3. При тривалих перервах електропостачання, особливо влітку, сонячної генерації може бути достатньо для живлення пріоритетних споживачів з частковою підтримкою від акумуляторних батарей. Проте система керування контролює заряд акумуляторів і у разі його зниження нижче критичного рівня подає команду на автоматичний запуск резервного джерела живлення, наприклад вітрогенераторів.

4. Під час роботи резервного генератора, інвертор відключається, а вбудовані в систему зарядні пристрої акумуляторних батарей пропускають напругу генератора для безпосереднього живлення навантажень першої категорії, одночасно підзаряджаючи акумулятори.

5. Влітку можлива ситуація перевищення потужності сонячних батарей над сумарним попитом навантаження. В такому разі енергоконтролер SMA або аналогічний пристрій запобігає перетоку надлишків енергії в зовнішню мережу, а інвертор автоматично знижує генерацію до необхідного рівня.

6. За умови перевищення вироблення сонячної електроенергії над потребами пріоритетних споживачів, система керування здійснює автоматичне підмикання додаткових навантажень другої категорії.

7. Споживачі другої та третьої категорії в звичайному режимі живляться від мережі. Проте за наявності надлишків сонячної генерації може здійснюватись їх автоматичне переключення на живлення від сонячної електростанції.

Вночі влітку енергія, накопичена в акумуляторах, може використовуватись для живлення ландшафтного освітлення за умови надлишку сонячної генерації у попередній день. Проте система обмежує розряд акумуляторів 30% для запобігання глибоким розрядам. Після цього освітлення автоматично перемикається на живлення від мережі.

На даний момент відомі три типи енергетичних систем гарантованого

електроживлення з використанням сонячних фотоелектричних станцій:

1. Незалежні системи.
2. Гібридні (комбіновані) системи.
3. Інтелектуальні системи.

Незалежна система складається з двох автономних підсистем:

- Блок безперебійного живлення на базі акумуляторних батарей. Він має запас енергії, як правило, на 30 хвилин для забезпечення навантажень першої категорії при короткочасних знеструмленнях мережі.

- Автономне джерело живлення (зазвичай дизель-генератор). При тривалих перервах електропостачання (понад 20 хв) запускається для безперебійного живлення навантажень на весь час аварії.

Запуск генератора здійснюється автоматично блоком АВР (пристроєм вибору резерву) з таймером затримки, як показано на рис. 1.3.

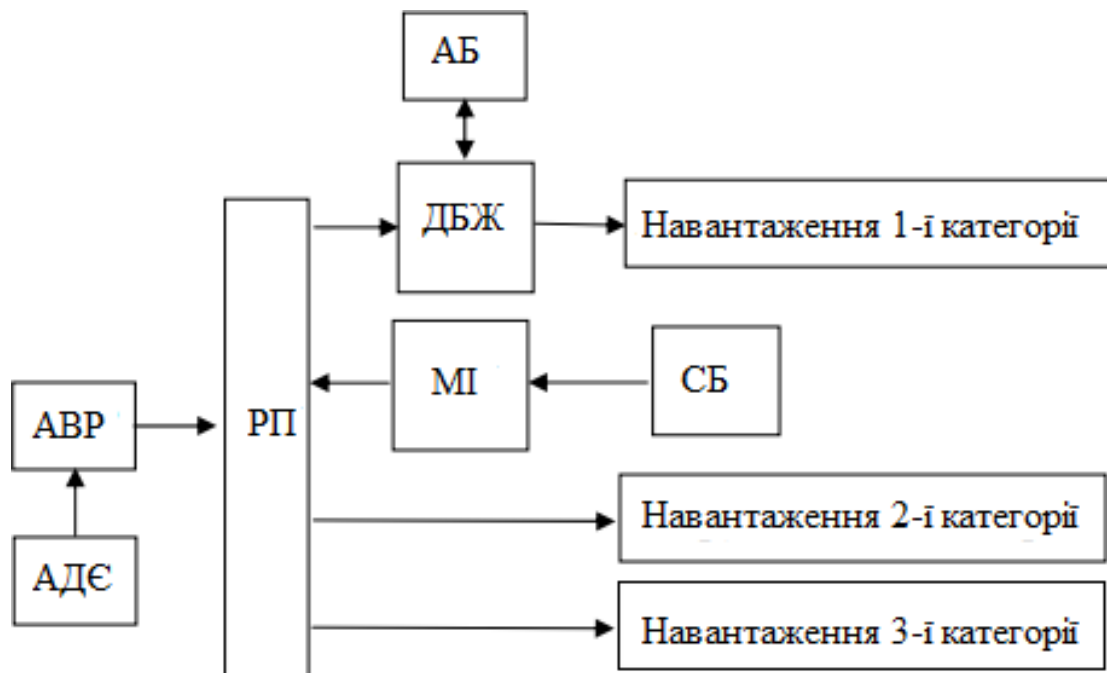


Рис. 1.3 – Структурна схема «незалежної» енергосистеми

Сонячні батареї під'єднуються до спеціального мережевого інвертора, який має два входи для їх приєднання та трифазний вихід на навантаження. Принцип роботи цього інвертора полягає в наступному: вся електроенергія, що виробляється сонячними панелями, передається в загальну мережу живлення лише за умови вхідної якісної напруги від зовнішніх джерел.

При виникненні відхилень (коливань) напруги в будь-якій з фаз чи зміни її форми внаслідок підключення реактивних навантажень, інвертор автоматично відключатиметься від мережі живлення.

Аналогічно, під час роботи резервного генератора, вихід інвертора повинен бути обов'язково вимкнений для уникнення його пошкоджень.

Такі заходи дозволяють захистити обладнання сонячної електростанції від неякісних чи нестабільних мереж або аварійних режимів роботи.

До складу "гібридної" енергосистеми входять два 3-фазних гібридні інвертори, які оснащені вбудованими зарядними пристроями (рис. 1.4)

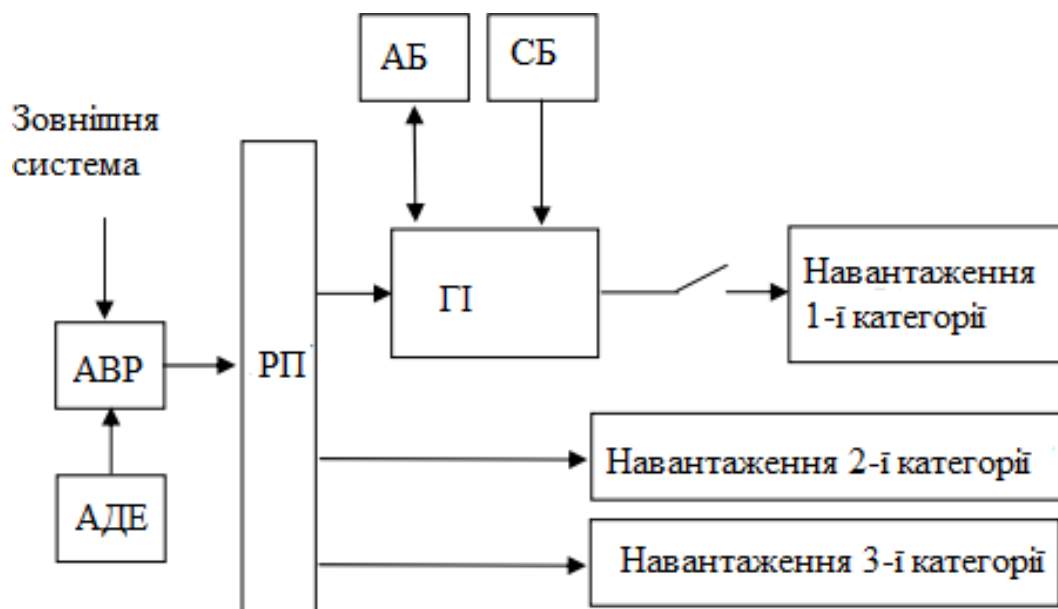


Рис. 1.4. Функціональна схема «гібридної» енергосистеми

Гібридні інвертори можуть працювати в таких режимах:

1. Пріоритет сонячної енергії. Заряд акумуляторних батарей та живлення навантаження здійснюється від сонячних батарей. За недостатньої сонячної генерації для покриття попиту, живлення відбувається за рахунок акумуляторів. При зниженні їх заряду на 30% і нижче, живлення перемикається на інвертори. Ємність акумуляторів розрахована на 1 годину автономної роботи в несприятливих умовах. Надлишки енергії шунтуються.

2. Основне джерело живлення з підтримкою від сонячних батарей.

3. Повністю автономний режим за відсутності зовнішньої електромережі.

Така гнучкість режимів роботи дозволяє оптимально поєднувати всі наявні джерела енергії для максимальної надійності та ефективності системи живлення.

"Інтелектуальна" енергосистема має більш високу надійність та ефективність роботи. Вона складається з:

- 3-х однофазних двонаправлених інверторів з вбудованими потужними зарядними пристроями, з'єднаними за 3-фазною схемою.

- Трифазного мережевого інвертора (CI) з двома входами високої напруги з системами стеження за максимальною потужністю (МРПТ).

Така конфігурація дозволяє реалізувати інтелектуальне керування потоками енергії в системі з урахуванням оптимального розподілу навантаження між різними джерелами живлення та пріоритетного завантаження в першу чергу поновлюваних джерел енергії.

На рис. 1.5 показана функціональна схема блоку моніторингу та блоку контролю і управління

Виходи інверторів з'єднані паралельно, внаслідок чого створюється власна внутрішня електромережа для безперебійного живлення пріоритетних споживачів якісною електроенергією вдень, незалежно від параметрів вхідної напруги зовнішньої мережі.

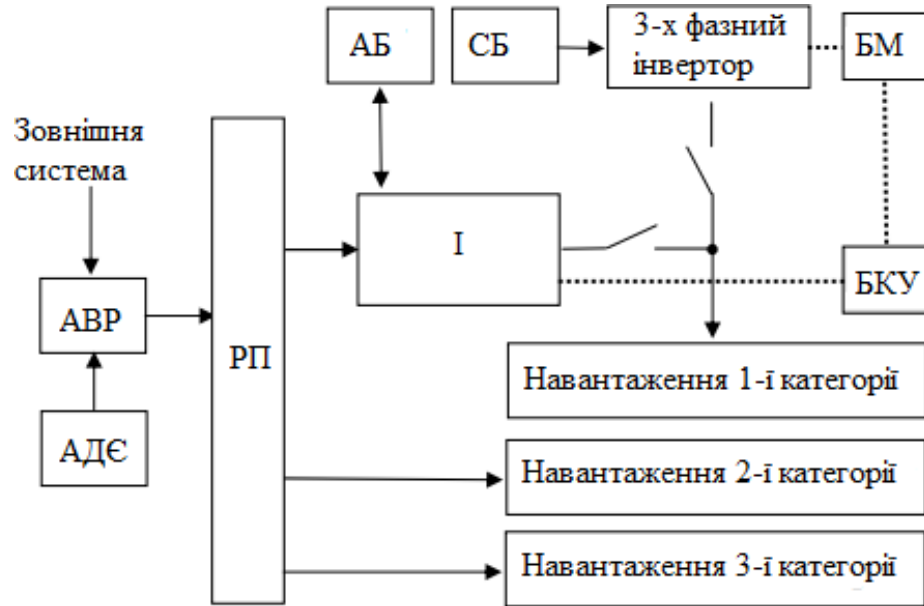


Рис. 1.5. Функціональна схема блоку моніторингу та блоку контролю і управління

За умови надлишку сонячної генерації понад потреби першочергових споживачів та повністю заряджених акумуляторних батарей, надлишкова енергія через входи інверторів може подаватися безпосередньо в загальну мережу живлення інших споживачів, наприклад вдома.

Крім того, надлишки можуть витрачатися на живлення потужних силових навантажень, підключених дистанційно по радіоканалу.

Всі параметри роботи системи: режими обладнання, обсяги генерації і споживання енергії - фіксуються в реальному часі на спеціальному онлайн-порталі виробника та доступні користувачеві в різних зрізах за особистим паролем.

1.2 Аналіз схем систем електропостачання з сонячними електростанціями

Сонячні фотоелектричні станції (СФЕС) - це різновид електростанцій, що безпосередньо перетворюють енергію сонячного випромінювання на електричну за допомогою фотоелектричного ефекту.

Для надійного забезпечення споживачів електроенергією з застосування сонячної енергії, до складу СФЕС окрім самих сонячних панелей входить низка додаткових елементів. Їх склад багато в чому залежить від конкретного призначення та особливостей побудови сонячної електростанції.

За принципом підключення розрізняють два основні типи СФЕС:

1. Автономні (острівні) системи - працюють незалежно від зовнішніх мереж.
2. Системи з паралельною синхронізацією з мережею - можуть працювати як спільно з мережею, так і автономно.

Вибір типу системи залежить від конкретних вимог та умов експлуатації об'єкта електропостачання.

Автономна сонячна електростанція, крім власне сонячних панелей, як правило включає в себе також:

- акумуляторні батареї (АБ) - для накопичення та зберігання електроенергії.
- контролер заряду-розряду - для керування процесами зарядки АБ від сонячних панелей та живлення навантаження від АБ.
- інвертор - необхідний у випадку, якщо споживачі потребують живлення стандартною напругою 220/380 В змінного струму. Інвертор перетворює постійний струм акумуляторів і сонячних батарей на змінний для живлення таких навантажень.

Така конфігурація дозволяє накопичувати та ефективно використовувати

сонячну енергію, забезпечуючи автономне безперебійне електропостачання незалежно від зовнішніх мереж (рис. 1.6).

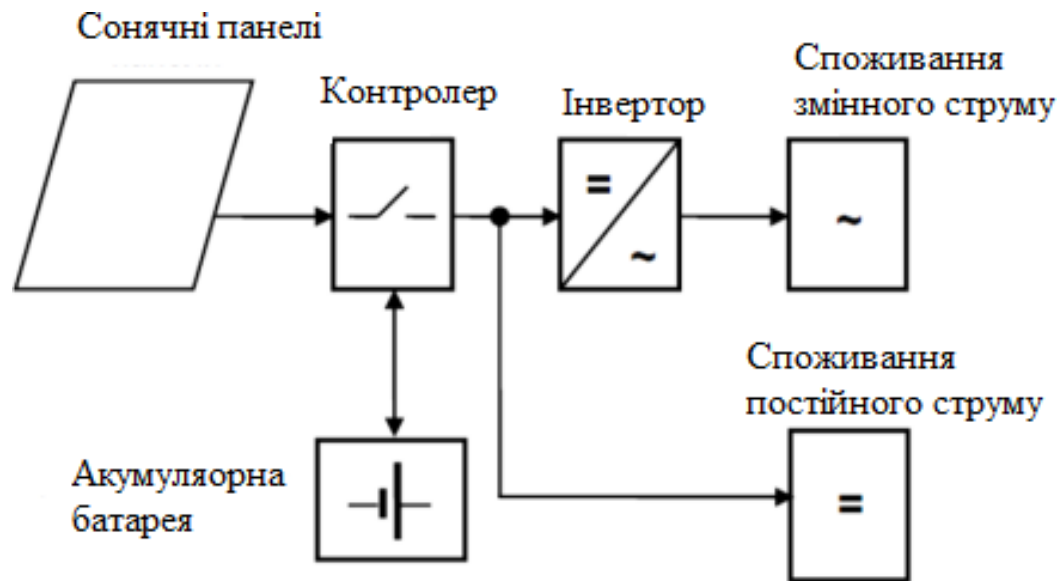


Рис. 1.6. Схема автономної фотоелектричної системи електропостачання

Конфігурація компонентів сонячної електростанції, включаючи тип і число сонячних батарей, розмір акумуляторних батарей та потужність інвертора, а отже, і загальна вартість системи, залежить від багатьох чинників.

Серед них - склад електричного навантаження та середньодобове споживання електроенергії. Також важливо врахувати, чи система працюватиме сезонно чи цілий рік. Крім цього, при проектуванні слід взяти до уваги середньомісячну інтенсивність сонячного випромінювання та кількість послідовних дощових або похмурих днів, характерних для даної місцевості.

Не менш важливим є вибір оптимальної системи орієнтації сонячних панелей, яка забезпечить їх найефективніше позиціонування щодо сонячного проміння протягом дня.

Додатковим фактором є наявність затінення від навколишніх будівель чи рослинності. Тому при встановленні сонячної станції слід проаналізувати

потенційні джерела затінення у різний час доби та пори року і по можливості їх усунути або звести до мінімуму.

Ось деякі додаткові міркування, які можуть бути корисними при проектуванні фотоелектричної системи живлення. Не соромтеся уточнити, якщо потрібна додаткова інформація або роз'яснення.

Оскільки сонячні панелі виробляють електроенергію лише вдень, їх загальна потужність має бути розрахована таким чином, щоб за день вироблялося достатньо енергії для забезпечення споживачів протягом усієї доби. Це вимагає значного збільшення встановленої потужності сонячних батарей та ємності акумуляторів порівняно з денним навантаженням.

Очевидним недоліком автономних сонячних електростанцій є неможливість використання надлишків виробленої електроенергії за умов малого споживання. У більшості стандартних конфігурацій сонячна батарея просто відключається після повного заряду акумуляторів.

Існують рішення для часткового вирішення цієї проблеми, наприклад використання надлишкової енергії для підігріву води чи повітря. Проте повністю уникнути втрат за умов перевищення генерації над споживанням наразі неможливо.

Для збільшення ефективності використання виробленої енергії, окрім баластових навантажень, можна розглянути можливість підключення додаткових накопичувачів у вигляді гідроакумуючих установок або водневих систем зберігання енергії. Крім цього, актуальним є питання інтеграції локальних сонячних електростанцій до загальних енергосистем для можливості постачання надлишкової електроенергії до мережі.

Ось деякі додаткові аспекти, пов'язані з особливостями використання автономних фотоелектричних систем. Буду радий надати уточнення чи детальніше розкрити якісь моменти, якщо потрібно.

Використання акумуляторів є суттєвим недоліком автономних сонячних електростанцій через обмежену кількість циклів заряду-розряду. Зокрема, ресурс поширених свинцево-кислотних батарей становить 1500-2000 циклів, що вимагає їх регулярної заміни.

Застосування довговічніших промислових акумуляторів, таких як нікель-кадмієві чи літій-іонні, потребує суттєвого збільшення капіталовкладень в енергосистему.

Окрім обмеженого ресурсу, необхідно враховувати втрати енергії при заряді та розряді акумуляторів. Навіть за оптимальних умов ККД процесу становить близько 90%, проте на практиці цей показник є нижчим і з віком погіршується.

Для підвищення ефективності автономних сонячних електростанцій актуальним є пошук альтернативних рішень для накопичення енергії, таких як гідроакумуляуючі установки, системи з використанням водню тощо. Крім цього, перспективним є гібридизація таких систем з іншими джерелами енергії, наприклад вітровими установками.

Підключення сонячних електростанцій до загальної електромережі дає змогу уникнути більшості недоліків, властивих автономним системам.

Фактично енергосистема в такому випадку виконує функцію потужного накопичувача енергії з відносно високим ККД, здатного прийняти та ефективно розподілити всі надлишки виробленої сонячними панелями електроенергії.

Перевагами роботи сонячних електростанцій у складі енергосистем є також можливість віддавати надлишкову енергію в мережу та отримувати електроенергію з мережі за потреби, компенсуючи природну мінливість генерації сонячних панелей.

З іншого боку, масове підключення сонячних станцій вимагає модернізації існуючих мереж для забезпечення їх надійності та стійкості. Окрім технічних

аспектів, актуальне значення має вдосконалення нормативно-правової бази для стимулювання розвитку сонячної енергетики та її інтеграції.

На рис. 1.7 наведена структурна схема мережевої сонячної електростанції.

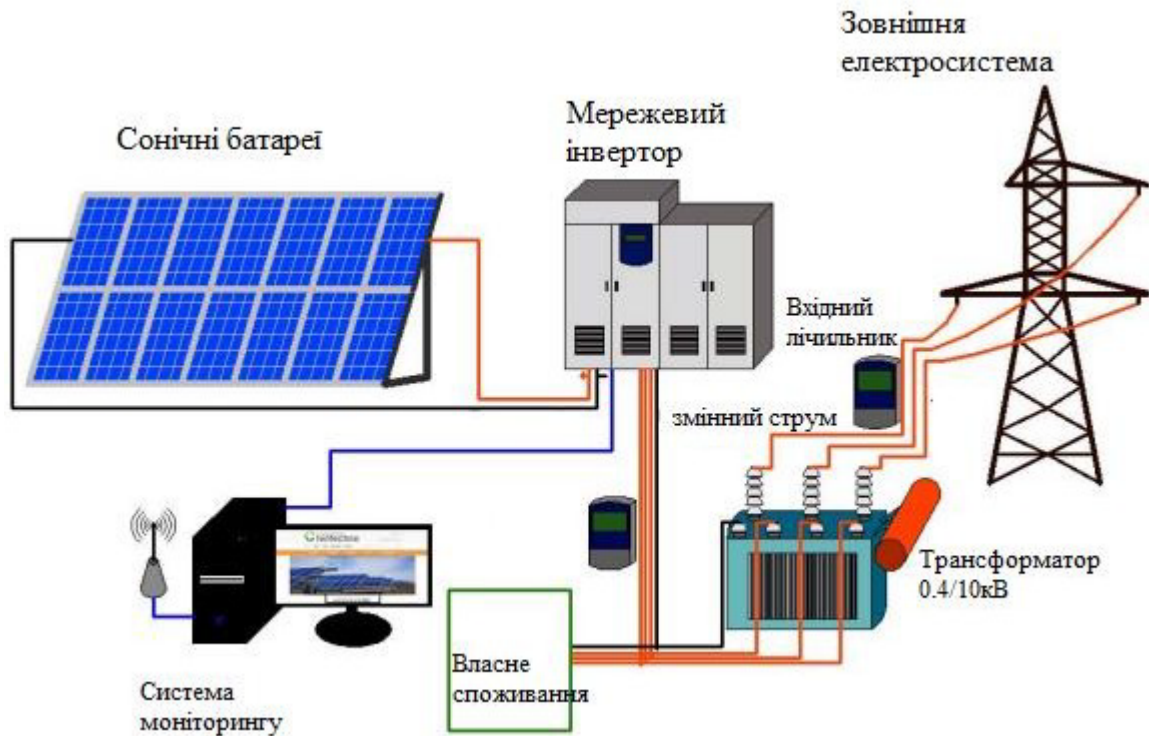


Рис. 1.7. Структурна схема мережевої сонячної електростанції.

Типова сонячна електростанція, підключена до загальної електромережі, окрім самих сонячних панелей включає такі основні компоненти:

- інвертори для перетворення постійного струму, що виробляється сонячними батареями, на змінний струм промислової частоти.
- контролери максимальної потужності для оптимального відбору енергії з сонячних панелей.
- системи моніторингу параметрів роботи станції в реальному часі.

- пристрої релейного захисту та автоматики для синхронізації з мережею.
- лінії електропередачі для приєднання до централізованої мережі.
- споживачі виробленої електроенергії (побутові чи промислові).

За наявності чи відсутності накопичувачів енергії розрізняють мережеві сонячні електростанції двох типів:

- а) без акумуляторних батарей;
- б) з акумуляторними батареями для резервного живлення та оптимізації графіків навантаження.

Наразі найбільш розповсюдженим типом мережевих фотоелектричних систем є конфігурації без акумуляторних батарей. Такі безакумуляторні сонячні електростанції мають низку переваг:

По-перше, вони відзначаються високою надійністю та мінімальними витратами на обслуговування.

По-друге, ККД перетворення сонячної енергії у таких системах є максимально високим і сягає 90-98%.

Причиною цього є застосування спеціальних мережевих інверторів, які використовують параметри мережі (напругу та частоту) в якості опорного сигналу для своєї роботи. Завдяки цьому досягається висока ефективність перетворення та синхронізації з мережею.

Отже, з точки зору простоти, надійності та ефективності, безакумуляторні конфігурації є оптимальним рішенням для реалізації мережевих фотоелектричних проектів.

Головним недоліком мережевих ФЕС без акумуляторів є повна залежність живлення споживачів від наявності напруги в електромережі.

Адже робота інверторів у таких системах базується на використанні параметрів мережі як опорного сигналу. Тому в разі зникнення напруги в мережі вони автоматично вимикаються і припиняють вироблення електроенергії.

Це пов'язано також із вимогами техніки безпеки - аби унеможливити подачу напруги на лінію під час проведення на ній ремонтних робіт.

Для вирішення цієї проблеми у складі мережевих ФЕС можуть застосовуватися системи аварійного живлення на базі акумуляторів, які забезпечать електропостачання споживачів за відсутності мережі. Але такі рішення є більш дорогими та складними у підтримці.

У разі ненадійного електропостачання від центральної мережі, доцільно застосовувати гібридні фотоелектричні системи з акумуляторами. Такі конфігурації є більш складними, проте дозволяють створити автономне джерело електроживлення для забезпечення безперервної роботи споживачів.

В таких системах потужність інвертора та місткість акумуляторних батарей вибирається з розрахунку загального навантаження, яке необхідно забезпечити електроенергією під час перерв в електропостачанні від мережі.

Відповідно, встановлена потужність сонячних панелей має бути достатньою для заряджання акумуляторів протягом дня з урахуванням середньодобового споживання та ймовірної тривалості аварійних відключень мережі.

Такий підхід дає можливість мінімізувати залежність системи від централізованого електропостачання та підвищити надійність електроживлення об'єкта.

Для побудови ефективних гібридних фотоелектричних систем з акумуляторами та підключенням до мережі доцільно застосовувати спеціальні автономні (острівні) інвертори.

Існують три можливі схемні рішення таких систем:

1) сонячні панелі заряджають акумулятори через зарядний контролер, після чого енергія через інвертор передається в мережу.

2) сонячні панелі безпосередньо підключені до інвертора, який живить навантаження. Надлишкова енергія йде на заряд акумуляторів, а при їх повному заряді - в мережу.

3) гібридна схема, що об'єднує елементи двох попередніх конфігурацій. Така система є найбільш гнучкою.

Застосування острівних інверторів дозволяє максимально ефективно використовувати вироблену сонячними панелями енергію в таких гібридних ФЕС.

На рис. 1.8 показана структурна схема мережевої сонячної системи, оснащеної контролером заряду.

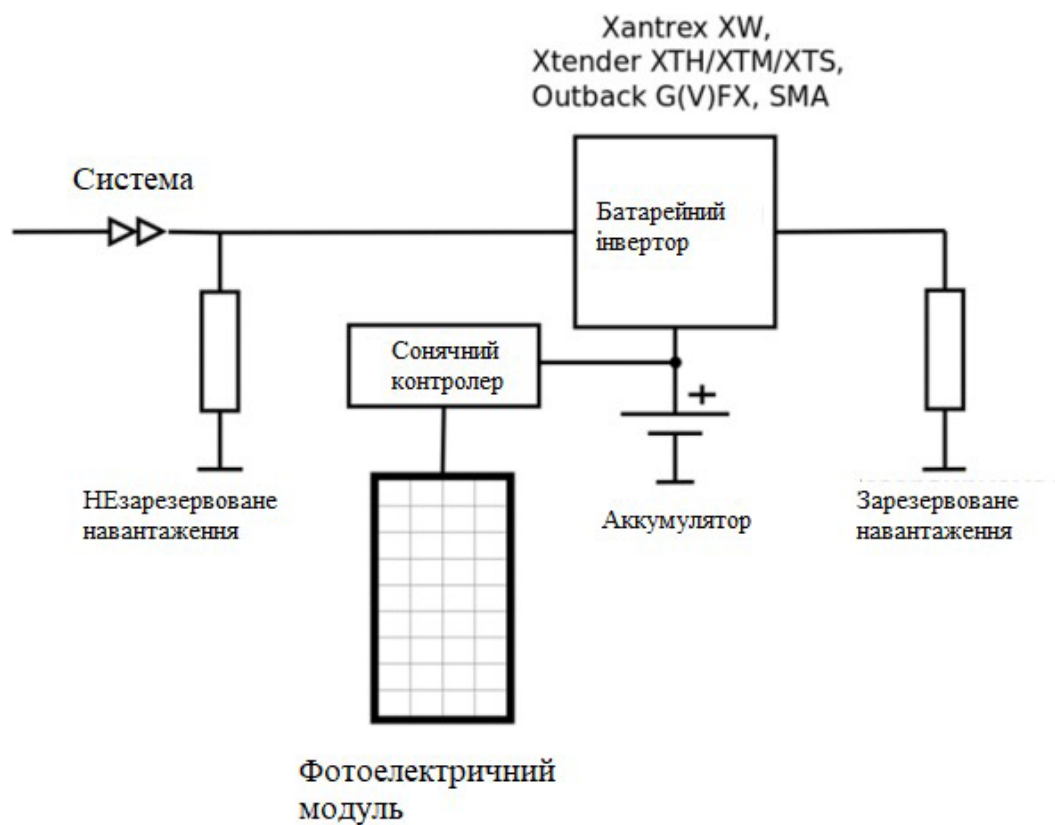


Рис. 1.8. Структурна схема мережевої сонячної системи, оснащеної контролером заряду

Для максимально ефективного використання енергії сонячних панелей в

гібридних ФЕС з акумуляторами та підключенням до мережі доцільно застосовувати спеціальні інвертори з функцією передачі електроенергії в навантаження або мережу навіть за умови повного заряду акумуляторів.

На відміну від стандартних систем безперебійного живлення, де заряд акумуляторів відбувається тільки від мережі, в таких інверторах передбачено пріоритетне використання енергії сонячних панелей. З цією метою доцільно також використовувати контролери максимальної потужності.

За потреби ці інвертори можуть або передавати надлишки енергії у мережу, або зменшувати потужність, що генерують сонячні панелі шляхом підвищення зарядної напруги акумуляторів. Такий режим оптимізує ефективність гібридної системи.

Перевагами гібридних фотоелектричних систем з акумуляторами та підключенням до мережі є:

- можливість використовувати сонячну енергію як за наявності електричної мережі, так і під час перерв в електропостачанні.
- здатність відновлювати роботу після тривалих blackout завдяки заряджанню акумуляторів від сонячних панелей.

Однак таким системам притаманні і певні недоліки:

- подвійне перетворення енергії (з постійного струму в змінний і навпаки) призводить до додаткових втрат.
- циклічний режим розряд-заряд акумуляторів під час перерв живлення знижує їх ресурс і потребує частішої заміни.

Оптимізація схемних рішень таких систем дозволяє звести ці недоліки до мінімуму і отримати ефект синергії від поєднання сонячної енергії, акумуляторів і мережі.

У разі перерви електропостачання від мережі, інвертор гібридної фотоелектричної системи автоматично переходить на живлення навантаження

від акумуляторних батарей.

За умови підключення сонячних панелей через контролер заряду, інвертор використовує в першу чергу саме сонячну електроенергію для живлення споживачів. І лише за її нестачі підключає акумулятори.

Тобто, якщо генерація сонячних батарей перевищує поточне споживання навантаження, надлишкова енергія спрямовується на заряд акумуляторів. Це оптимізує режими роботи всієї системи та ефективність використання сонячної енергії.

Схема ережеваої фотоелектричної станції електропостачання наведена на рис .1.9.

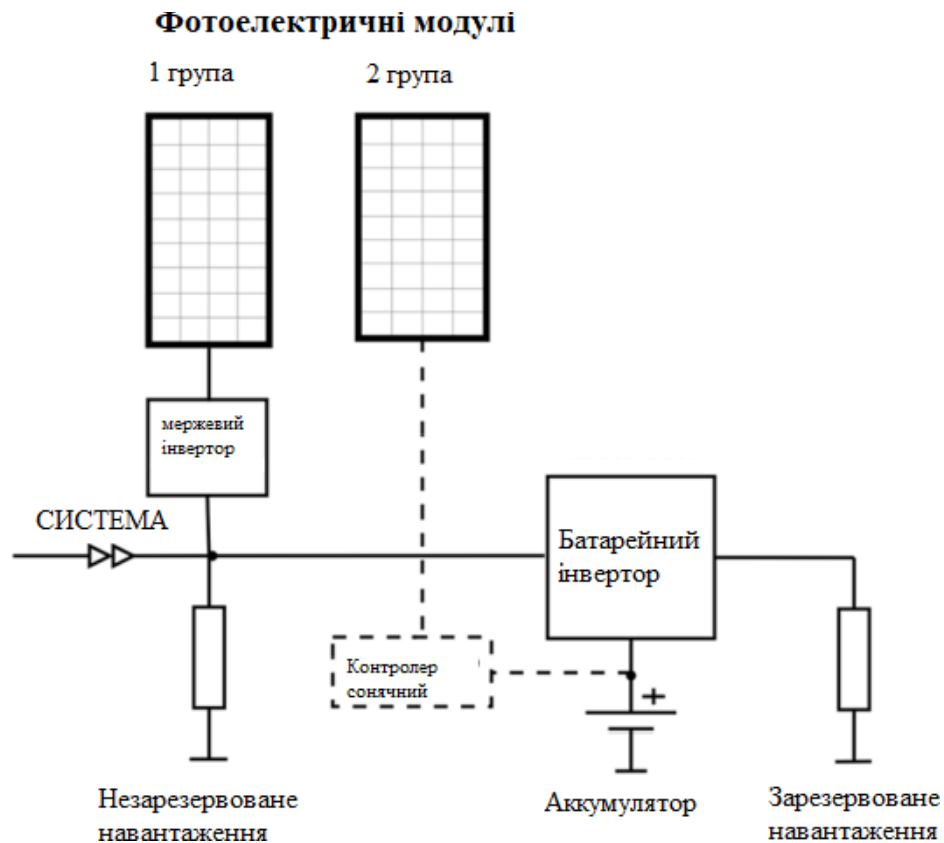


Рис. 1.9. Схема ережеваої фотоелектричної станції електропостачання

Основними перевагами зазначеної конфігурації гібридної ФЕС є:

- можливість застосування стандартних та широкодоступних на ринку мережевого та автономного інверторів.

- підтримка постійно зарядженого стану і буферного режиму роботи акумуляторних батарей з мінімальним залученням лише у разі перерв мережевого живлення.

Така система є оптимальним рішенням для об'єктів із переважним споживанням сонячної електроенергії вдень та рідкісними й нетривалими відключеннями централізованого електропостачання.

За рахунок розподілу потоків енергії та раціонального режиму експлуатації всіх компонентів досягається висока надійність та економічність такої ФЕС.

Вдень в такій гібридній ФЕС основне навантаження, включаючи резервовані споживачі, живиться від мережевого інвертора, підключеного до сонячних панелей. За умови перевищення генерації сонячної електростанції над поточним споживанням, її надлишки можуть передаватися до загальної мережі, а також використовуватися для заряду акумуляторів.

Завдяки високому ККД сучасних мережевих інверторів (понад 90%) така система забезпечує ефективне використання сонячної енергії. Однак вона повністю залежить від наявності мережевого живлення.

Потужність автономного інвертора (ДБЖ) при цьому вибирається з розрахунку резервованих споживачів і не залежить від значення потужності сонячних панелей. Для відновлення системи після тривалих перерв може передбачатись додатковий зарядний ланцюг від невеликої СБ до акумуляторів.

Схема мережевої фотоелектричної системи електропостачання з інвертором на виході джерела безперебійного живлення наведена на рис. 1.10.

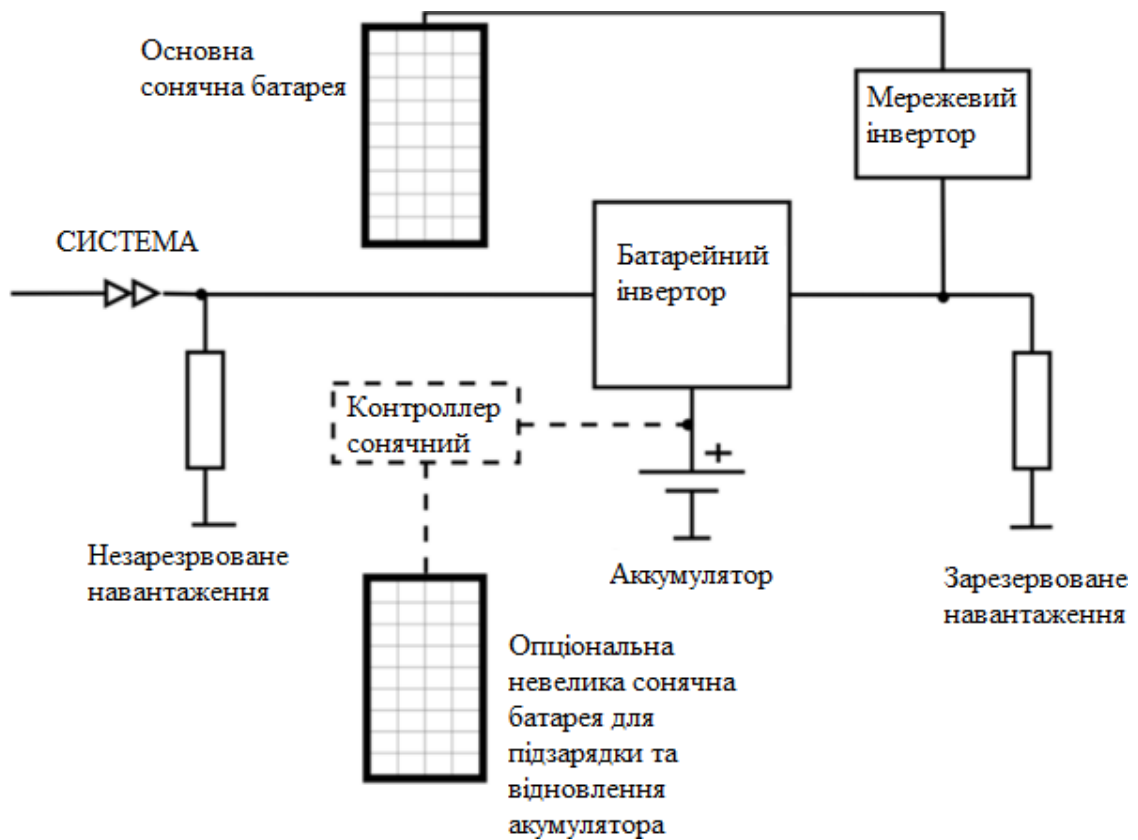


Рис. 1.10. Схема мережевої фотоелектричної системи електропостачання з інвертором на виході джерела безперебійного живлення

Ця схема гібридної ФЕС також використовує високоефективний мережевий інвертор, але на відміну від попередньої, за зникнення мережевого живлення сонячні панелі продовжують забезпечувати електроенергією резервованих споживачів та заряд акумуляторів.

В штатному режимі за наявності мережі, мережевий інвертор (з ККД понад 90-95%) живить резервне навантаження. За перевищення поточної генерації сонячної станції над споживанням, надлишки енергії спрямовуються на заряд акумуляторів. У разі недостатньої генерації, дефіцит енергії для резервного навантаження покривається з мережі.

Після здійснення повного заряду батарей, їх надлишки передаються до загальної електромережі для живлення інших споживачів. Тобто система

ефективно балансує потоки енергії.

За аварійного відключення мережі в такій системі автоматично спрацьовує ДБЖ, який переходить на живлення резервного навантаження від акумуляторів та забезпечує опорну напругу для безперебійної роботи мережевого інвертора. Тому використання сонячної енергії триває навіть за відсутності мережі - її надлишки продовжують заряджати акумулятори.

У випадку виходу параметрів мережі за допустимі межі, інвертор відмикається від неї і переходить на автономне живлення резервного навантаження від сонячних панелей та акумуляторів. Основне навантаження при цьому живиться від наявної в мережі напруги.

Отже, система забезпечує надійне електропостачання споживачів, ефективне використання компонентів, а також можливість відновлення роботи після глибоких розрядів акумуляторної батареї.

Висновки до розділу

1. Сонячні фотоелектричні станції є ефективним джерелом екологічно чистої енергії, здатним забезпечити надійне електропостачання автономних об'єктів.

2. Існують різні типи СФЕС - автономні та синхронізовані з мережею. До їх складу окрім сонячних панелей можуть входити акумулятори, контролери, інвертори та інше додаткове обладнання. Вибір конфігурації системи залежить від конкретних потреб об'єкта в енергопостачанні.

3. За умови правильного проектування, сонячні електростанції здатні цілодобово з високою надійністю забезпечувати споживачів електрикою, ефективно використовуючи енергію сонця. Вони можуть застосовуватися як основне або резервне джерело живлення, підвищуючи енергетичну незалежність

об'єктів.

4. Підключення до загальної електромережі дає змогу уникнути більшості недоліків, властивих автономним ФЕС, значно підвищуючи ефективність використання сонячної енергії.

5. Найпоширенішими є конфігурації мережевих ФЕС без акумуляторів завдяки простоті, надійності та високому ККД перетворення енергії. Проте вони повністю залежать від наявності мережевого живлення.

6. Застосування гібридних схем з акумуляторами та автономними інверторами дає можливість створення систем безперебійного живлення споживачів, ефективного використання та балансування всіх джерел енергії.

7. Оптимальна конфігурація мережевої ФЕС визначається конкретними вимогами до надійності та економічності системи електропостачання об'єкта з урахуванням місцевих умов.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМНИХ РІШЕНЬ СОНЯЧНИХ ІНВЕРТОРІВ

2.1 Класифікація сонячних інверторів систем електропостачання

Існують різні способи класифікації перетворювачів, які використовують в системах електропостачання з альтернативних джерел енергії. Одним з основних є поділ на багаторівневі та однорівневі типи (рис. 2.1).

Багаторівневі перетворювачі мають складнішу будову та можуть поділятися за рядом ознак: за типом схеми, яку використовують; за структурою окремих модулів; за схемою формування додаткової напруги; а також за певними конструктивними модифікаціями.

Зокрема, за типом схеми розрізняють перетворювачі з ізольованими DC-шиною, каскадні, багаторівневі з діодними затискачами тощо. За структурою модулів виділяють однофазні, трифазні та багатофазні перетворювачі. За схемою формування додаткової напруги бувають перетворювачі з використанням конденсаторів, виткових трансформаторів чи автотрансформаторів.

Однорівневі перетворювачі мають більш просту будову з одним рівнем комутації. Їх теж можна класифікувати за певними ознаками, зокрема за кількістю фаз та типами ключів. Але така класифікація є дещо простішою порівняно з багаторівневими аналогами.

Отже, загальна класифікація перетворювачів в системах альтернативної енергетики досить розгалужена і базується на низці структурних та схемотехнічних характеристик. Правильний вибір типу перетворювача має велике значення для ефективності всієї системи електропостачання.

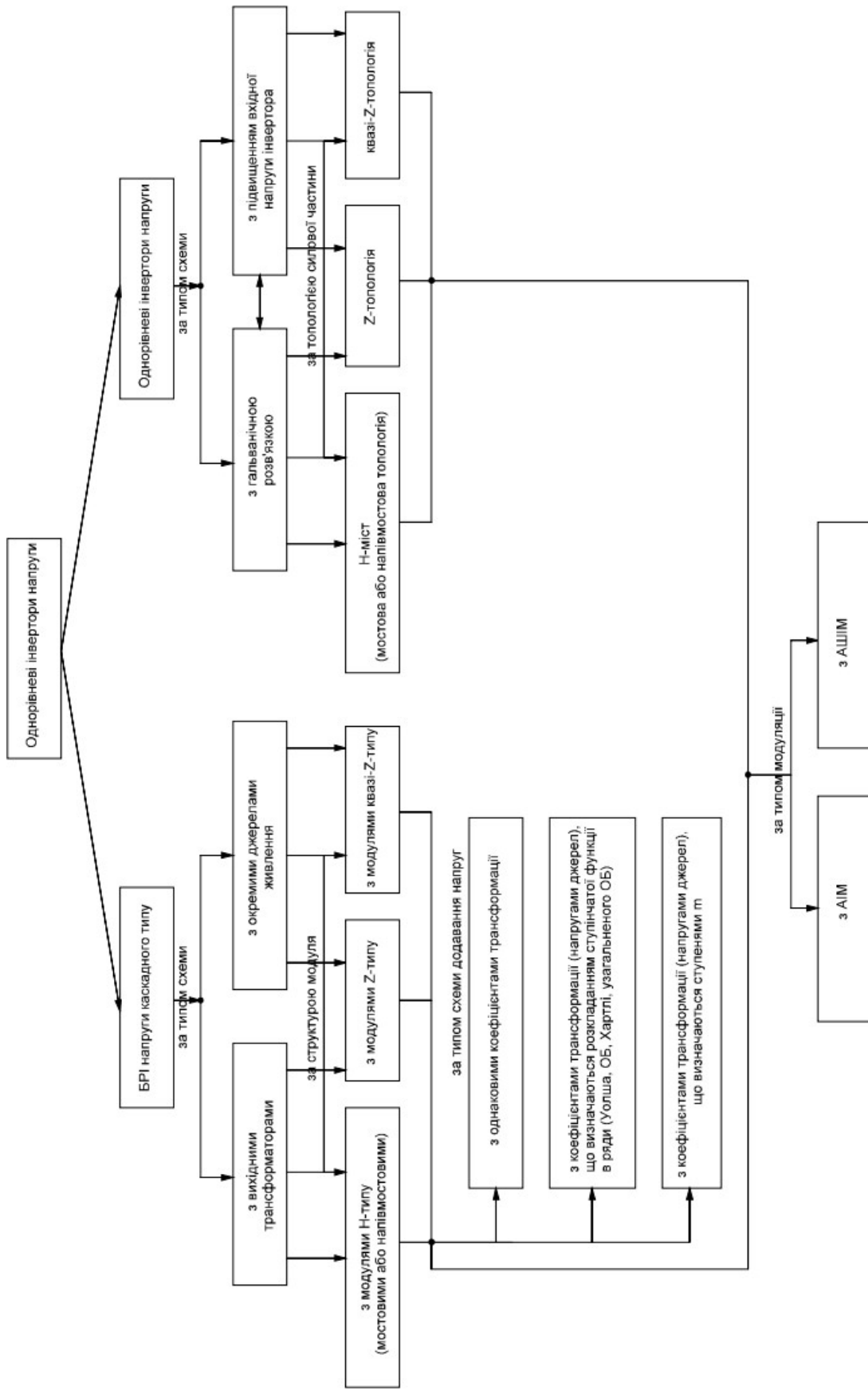


Рис. 2.1. Класифікація інверторів в системах електропостачання

За типом схеми окремих модулів багаторівневі перетворювачі можна поділити на два основні різновиди: з незалежними джерелами постійної напруги та з єдиним джерелом і комутаційним виходом.

Перший тип характеризується наявністю окремих незалежних джерел живлення для кожного модуля перетворювача. Це можуть бути, наприклад, відокремлені випрямлячі або фотоелектричні панелі.

Другий тип має єдине спільне джерело постійного струму, зазвичай це випрямляч, а виходи модулів з'єднані за допомогою комутаційних схем. Такі перетворювачі простіші за структурою.

Окремо можна виділити характеристики внутрішньої побудови самих модулів перетворювачів. Наприклад, за схемою електронних ключів розрізняють мостові схеми, схеми з використанням імпедансів або квазі-імпедансів. При цьому імпеданси чи квазі-імпеданси можуть реалізовуватися як в інтегральних схемах, так і за допомогою дискретних електронних компонентів.

Отже, класифікація модулів багаторівневих перетворювачів включає ряд схемотехнічних ознак і базується як на загальних принципах побудови всієї системи, так і на особливостях реалізації окремих функціональних вузлів.

Окрім стандартних мостових схем, у перетворювачах можуть застосовуватися також напівмостові схеми з двома ключами замість чотирьох. Така схема є більш простою, але має певні функціональні обмеження.

Ще однією важливою характеристикою багаторівневих перетворювачів є принцип формування вихідної змінної напруги шляхом додавання напруг окремих компонентів загального кола. При цьому вагомість внеску конкретного компонента у вихідний сигнал визначається або напругою його окремого джерела живлення, або коеф. перетворення вихідних перемикачів.

Наприклад, у каскадних багаторівневих інверторах кожний наступний рівень має більшу напругу і тому його внесок у загальну вихідну напругу є

вагомішим. А у інверторах напруги з діодними затискачами кожен рівень має однакову напругу, але різний коефіцієнт перетворення через різну кількість вентилів. Тому при практичній реалізації таких систем потрібно враховувати обидва ці фактори.

Серед однорівневих топологій перетворювачів можна виділити кілька різновидів за типом схмотехнічних рішень.

Зокрема, існують схеми з використанням підвищувальних DC-DC перетворювачів навколо основного інвертора. Такі перетворювачі дозволяють отримати вищу вихідну напругу при тому ж джерелі живлення.

Ще однією важливою ознакою є наявність чи відсутність гальванічної розв'язки на виході інвертора. Для її забезпечення може застосовуватися вихідний трансформатор або спеціальні інтегральні схеми перетворювачів.

При побудові багаторівневих топологій з єдиним джерелом живлення також можуть застосовуватися вихідні трансформатори. Або ж гальванічна розв'язка реалізується як частина перетворювача вхідної напруги.

При проектуванні як одно-, так і багаторівневих перетворювачів існує широкий спектр схмотехнічних рішень щодо підвищення напруги, гальванічної розв'язки та інших параметрів. Вибір конкретної топології залежить від вимог та умов застосування.

Варто зауважити, що розглянуті вище топології перетворювачів найчастіше використовують в системах сонячної енергетики, де фотоелектричні панелі слугують джерелом альтернативної електроенергії.

В той же час, перетворювальні системи на базі вітрогенераторів мають дещо іншу структуру, що поєднує в собі функції випрямлення і інвертування напруги. Тут в якості випрямляча застосовується стандартний мостовий інвертор, який працює у режимі випрямлення змінної напруги генератора.

Після випрямляча передбачено ланку постійного струму у вигляді

потужного конденсатора, яка розділяє вхідну та вихідну частину перетворювача. Така структурна схема дозволяє ефективно перетворювати енергію вітрового потоку в мережеву електроенергію стабільної якості.

Отже, при використанні різних джерел відновлюваної енергії можуть застосовуватися як універсальні, так і спеціалізовані топології перетворювачів, адаптовані під особливості цих джерел. Але загальні принципи побудови таких систем мають багато спільного.

За типом модуляції вихідного змінного сигналу більшість інверторів поділяють на пристрої з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ) та з амплітудно-широтно-імпульсною модуляцією (АШІМ).

Інвертори з АІМ формують стиснуту за амплітудою напругу з постійною або майже постійною тривалістю імпульсів. В той час як в інверторах з АШІМ для кожної фази генерується широтно-імпульсно модульований сигнал змінної шпаруватості.

Така ШІМ-модуляція дозволяє розширити діапазон регулювання вихідних параметрів. При цьому глибина ШІМ, тобто співвідношення тривалості імпульсів та пауз визначає коефіцієнт перетворення напруги для кожної фази. Це дає більшу гнучкість при формуванні необхідної напруги багаторівневих інверторів за допомогою ортогональних векторних рядів.

Отже, використання АШІМ забезпечує кращу якість вихідного сигналу і ширші можливості регулювання параметрів, що суттєво при створенні складних багаторівневих інверторних систем.

Як зазначалося, інвертори з амплітудно-імпульсною модуляцією формують фіксовані за тривалістю імпульси, а з амплітудно-широтно-імпульсною модуляцією - імпульси змінної шпаруватості для кожної фази. Саме останнє дає змогу розширити діапазон регулювання вихідних параметрів.

В багаторівневих інверторах на основі паралельного з'єднання однакових

за коефіцієнтом трансформації модулів, кожне джерело живлення є незалежним та підмикається до окремого мостового інвертора.

На виході кожного з таких інверторів формуються три рівні напруги ($+U_{дж}$, 0 , $-U_{дж}$) для кожної з фаз навантаження, залежно від поточної комбінації замкнених ключів. Ці напруги в підсумку складаються, формуючи багаторівневий вихідний сигнал шляхом амплітудно-широтно-імпульсної модуляції.

Така топологія дозволяє реалізувати гнучке багаторівневе інвертування з незалежними джерелами живлення за допомогою окремих модульних перетворювачів.

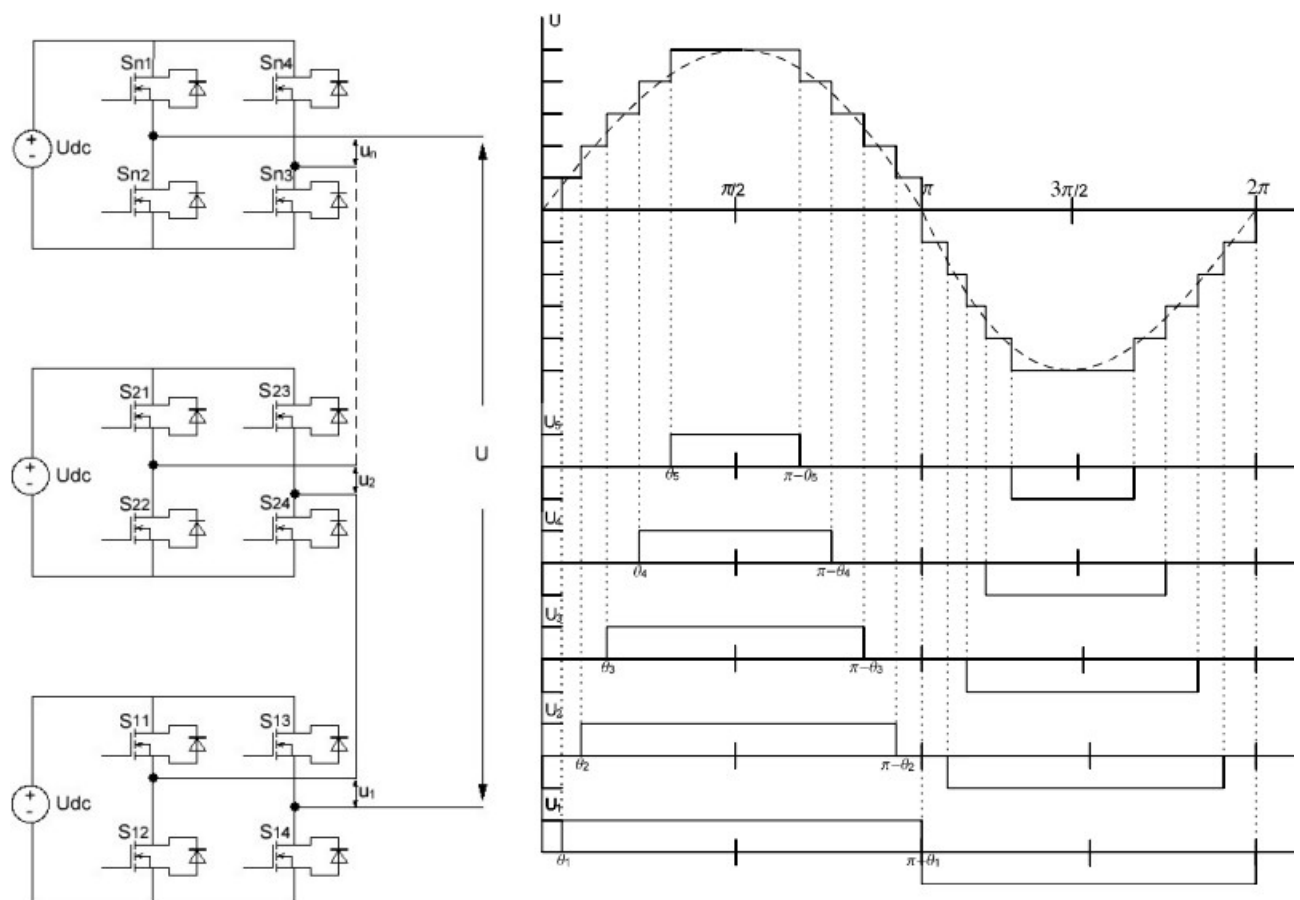


Рис. 2.2. Схема та графіки напруги 11-рівневого інвертора

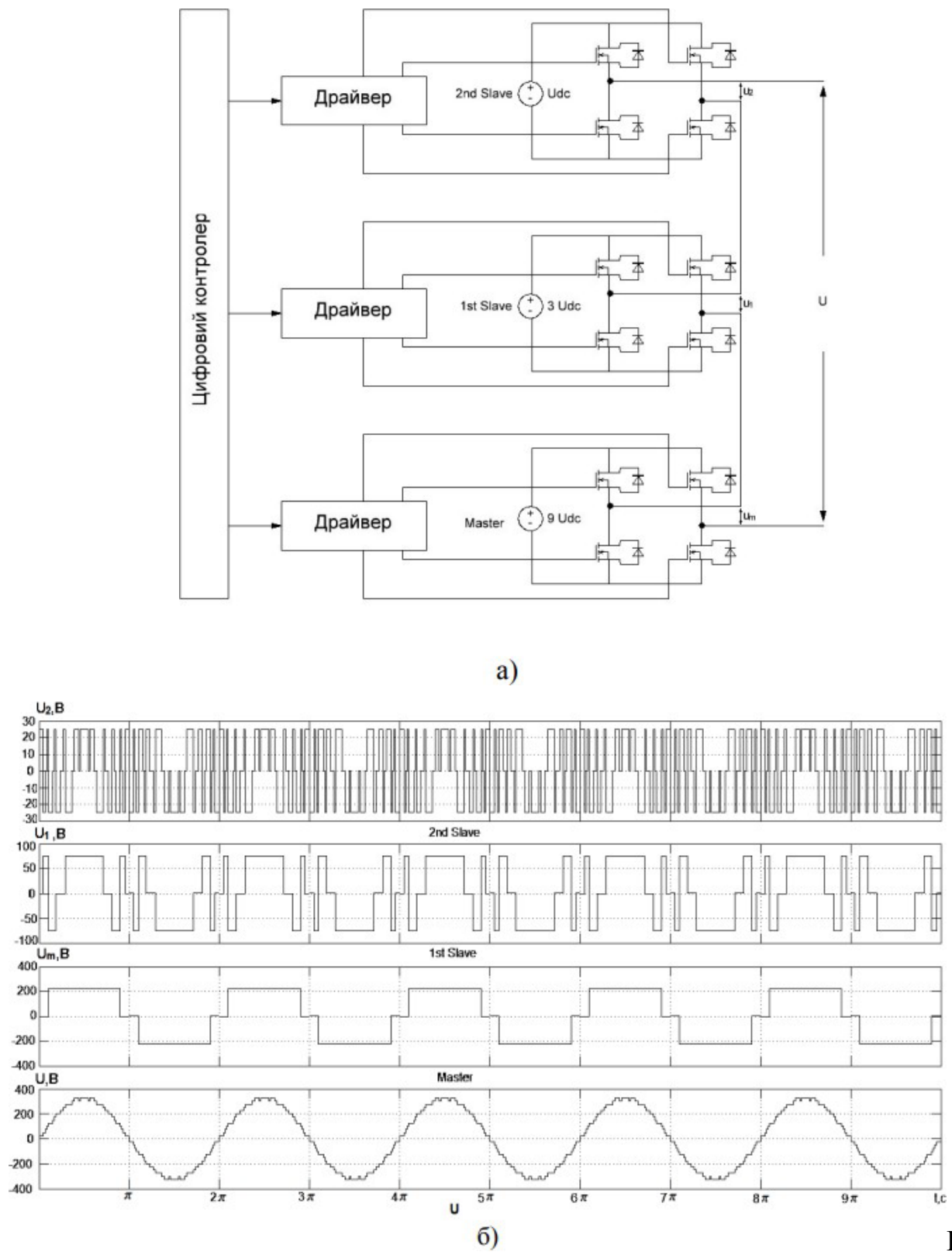


Рис.

Рис. 2.3. Схема і графік вихідної напруги каскадного інвертора з 3-ма відокремленими ДЖ

Серед багаторівневих інверторів, побудованих на основі з'єднання N однакових модулів з коефіцієнтом трансформації m , розрізняють два основні різновиди: з незалежними джерелами живлення для кожного модуля та з єдиним спільним джерелом.

У першому випадку кожен модуль має власне окреме джерело постійної напруги. Це можуть бути як окремі випрямлячі, так і індивідуальні акумулятори, конденсатори тощо. Така схема є більш надійною, але складнішою конструктивно.

При використанні єдиного спільного джерела живлення усі модулі живляться від одного випрямляча чи іншого первинного джерела енергії. Така схема простіша і дешевша, але має спільну точку відмови.

Отже, при побудові багаторівневих інверторів на основі модульних перетворювачів можливе застосування як розподілених, так і централізованих систем електроживлення. Вибір конкретного рішення залежить від вимог та умов експлуатації.

Серед недоліків розглянутих схем багаторівневих інверторів на основі паралельного з'єднання окремих модулів можна відзначити відсутність жорсткого структурного зв'язку між цими модулями. Через це не можна повною мірою реалізувати перевагу модульності, притаманну каскадним топологіям.

Іншою проблемою є потреба у використанні незалежних джерел напруги з фіксованими, чітко визначеними амплітудними значеннями. Це ускладнює гнучке регулювання параметрів системи. Дану проблему частково можна вирішити за допомогою потужних конденсаторів великої ємності для стабілізації вхідних напруг.

Отже, попри низку переваг, розглянуті паралельні схеми мають і певні недоліки, пов'язані насамперед з реалізацією модульних рішень та регулюванням напруг. Подальший розвиток таких систем може йти в напрямку структурного

посилення міжмодульних зв'язків та гнучкості керування живленням.

В системі з 1-м джерелом живлення необхідні значення напруги створюють вихідні трансформатори (рис. 2.4).

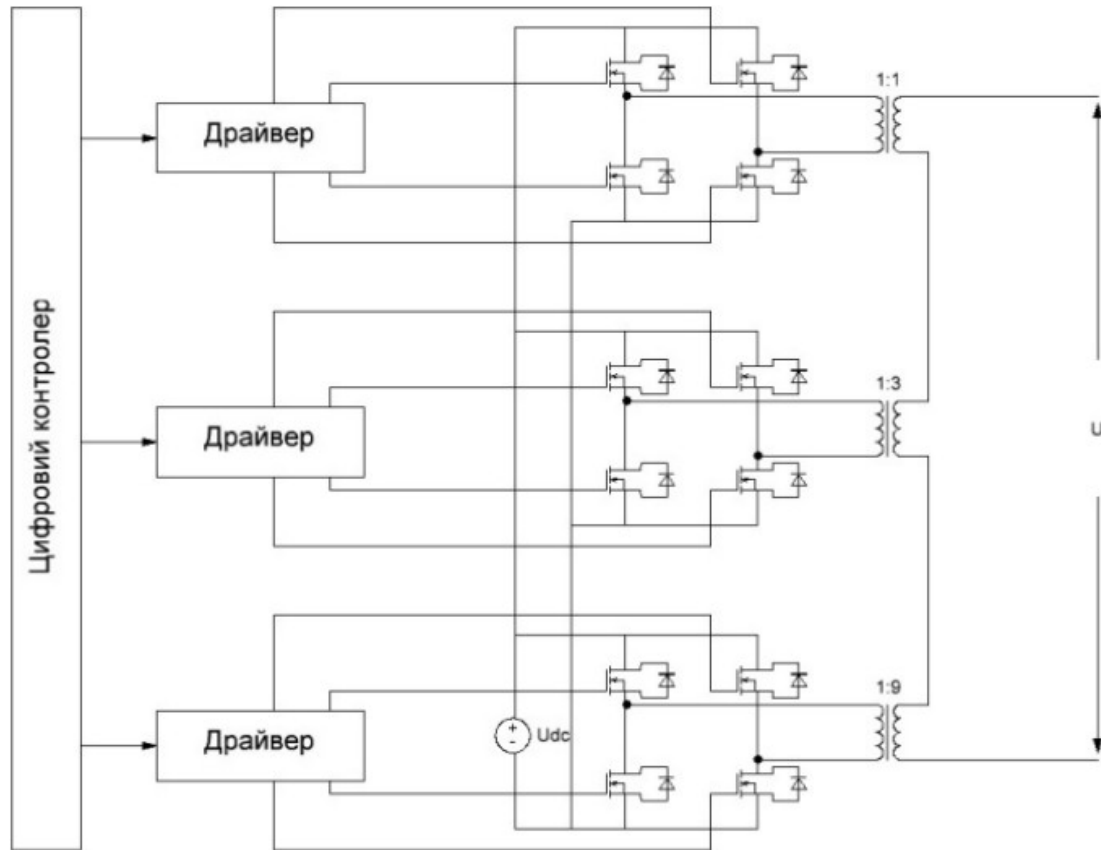


Рис. 2.4. Багаторівневий конвертор напруги з вихідними трансформаторами та 1-м джерелом постійної напруги

Основною перевагою розглянутої топології багаторівневих інверторів з єдиним спільним джерелом живлення є можливість застосування одного джерела постійної напруги замість багатьох незалежних. Крім того, всі модулі завантажуються рівномірно, що узгоджується з принципом модульності.

Проте такі схеми мають і певні недоліки. Зокрема необхідність проектування всіх модулів з урахуванням максимально можливих навантажень та частот комутації.

Ще однією особливістю є принцип формування багаторівневої вихідної напруги на основі ортогонального розкладання. Коефіцієнти такого розкладання заданої фазної напруги відповідають коефіцієнтам трансформації або амплітудним значенням напруги живлення відповідних модулів. Вмикання потрібних модулів здійснюється за допомогою системи керування.

Отже, даний підхід має як певні переваги, так і характерні недоліки, які необхідно враховувати при практичній реалізації таких схем інверторів.

2.2 Порівняльний аналіз схемних рішень DC/DC перетворювачів інверторів

Розвиток перетворювальної техніки призвів до істотних зрушень у багатьох сферах застосування електроенергії. При цьому традиційні перетворювачі електричної енергії й надалі займають провідні позиції завдяки своїм унікальним властивостям.

В цьому контексті доцільно розглянути класифікацію таких перетворювачів та особливості їх застосування у складі систем фотоелектричного живлення.

Зокрема, понижувальні перетворювачі постійного струму (DC/DC) дозволяють знизити рівень вихідної напруги порівняно з вхідною. Тому їх можна використовувати в якості інтерфейсу між фотомодулем з високою напругою та навантаженням, розрахованим на більш низькі напруги, а також між модулем і акумулятором.

Такі понижувальні DC/DC-перетворювачі (рис. 2.5) знаходять широке застосування у багатьох сучасних сонячних установках різного призначення та потужності.

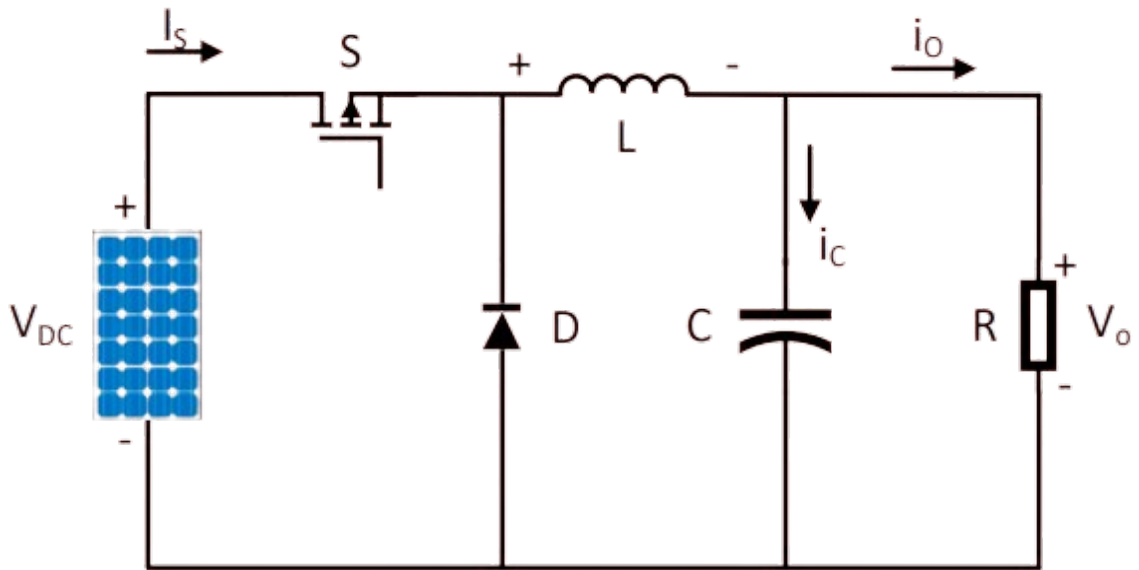


Рис. 2.5. Схема знижувального інвертора ФЕС

На відміну від понижувальних, підвищувальні перетворювачі постійного струму (DC/DC) дозволяють отримати на виході більш високий рівень напруги в порівнянні з вхідним (рис. 2.6).

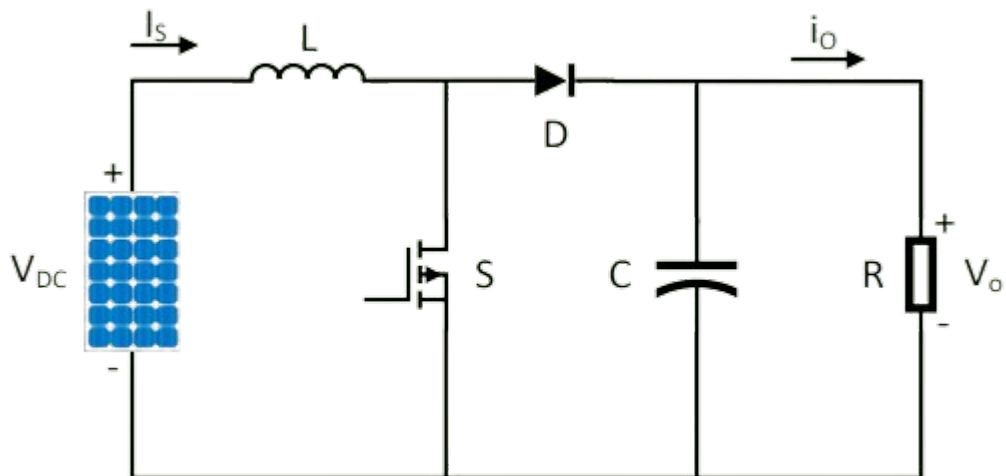


Рис. 2.6. Схема підвищувального перетворювача для ФЕС

Їх часто використовують в складі перетворювачів максимальної потужності (MPPT) для фотоелектричних систем.

Підвищувальні DC/DC-перетворювачі є предметом численних досліджень і мають багато модифікацій, спрямованих на підвищення їх ефективності та надійності. Йдеться як про удосконалення самих схемотехнічних рішень, так і про розробку нових алгоритмів керування та регулювання.

Застосування таких високоефективних підвищувальних перетворювачів надає можливість суттєво підвищити загальний ККД і потужність фотоелектричних станцій при використанні стандартних сонячних модулів.

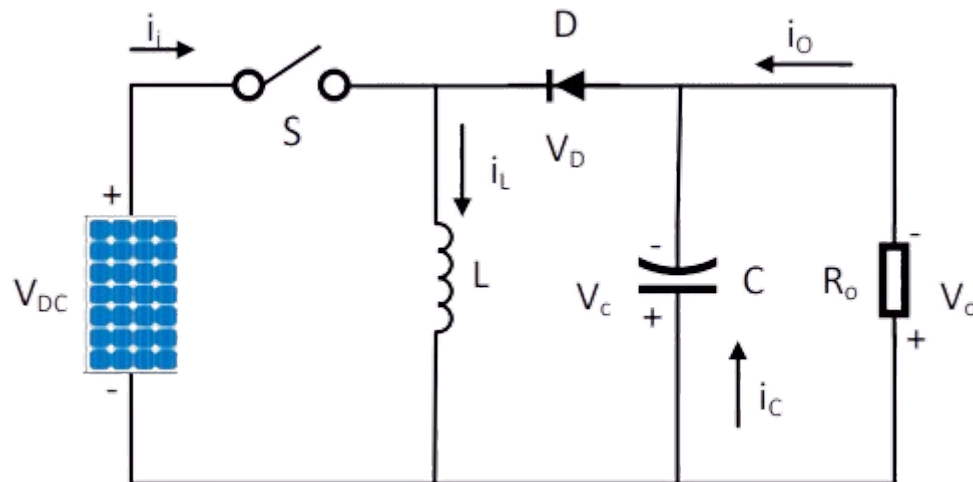


Рис. 2.7. Понижувально-підвищувальний конвертор для ФЕС

Понижувально-підвищувальні перетворювачі постійного струму в режимі безперервної провідності мають менші пульсації струмів порівняно з однокомутуючими аналогами. Крім того, використання двох перемикачів знижує напруги і струми навантаження на окремі елементи схеми.

Для реалізації функції відстеження точки максимальної потужності (MPPT) в сонячних установках часто застосовується алгоритм Perturb and Observe. Експериментально показана вища ефективність розглянутих перетворювачів у

складі систем з великими навантаженнями.

Запропоновані пристрої можуть працювати в двох режимах: як підвищувальний або понижувальний перетворювач, керований ШІМ. Вибір поточного режиму залежить від співвідношення вхідної напруги фотомодуля та необхідного рівня вихідної напруги, що подається на навантаження чи акумулятор.

Односторонній первинний перетворювач (рис. 2.8) зазвичай називають SEPIC.

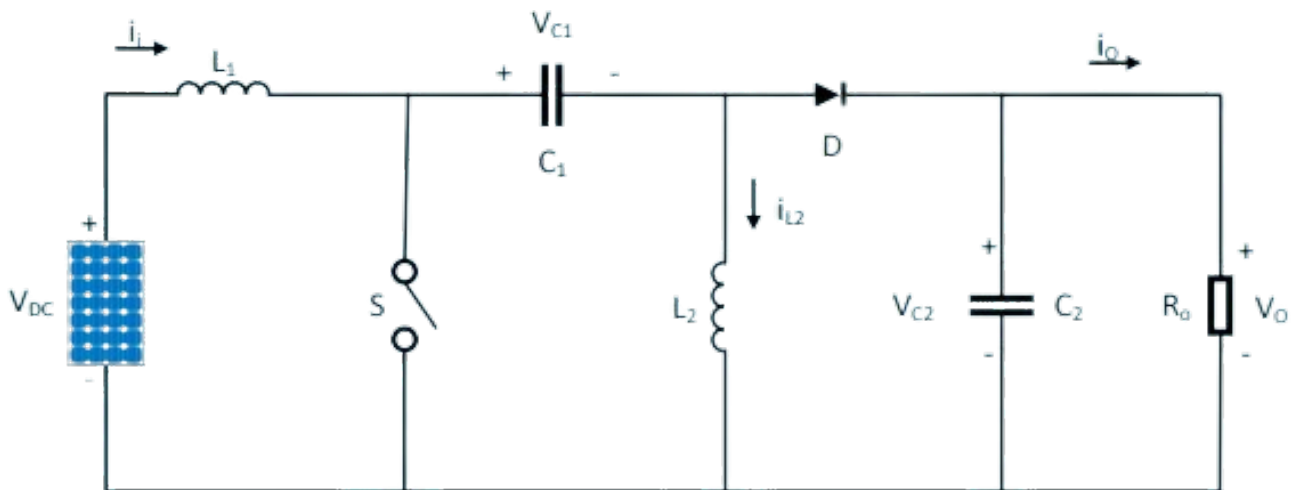


Рис. 2.8. Перетворювач SEPIC для ФЕС

У підвищувальних перетворювачах постійного струму, як правило, час увімкненого стану перемикачів перевищує час їх вимкнення. Це необхідно для ефективного накопичення енергії в індуктивності та забезпечення потрібного збільшення вихідної напруги. За недостатньої тривалості фази заряджання конденсатор вихідного фільтра не встигає дозарядитися, що знижує результативність перетворення.

При проектуванні таких перетворювачів важливо враховувати ряд обмежень. Зокрема, при використанні високочастотних трансформаторів слід очікувати зменшення амплітуди пульсацій вихідної напруги. Схема SEPIC має переваги у вигляді безперервності вихідного струму, мінімізації комутаційних перенапруг і пульсацій. Однак під час випрямлення змінного струму виникають гармоніки, котрі спричиняють додаткові пульсації і знижують коефіцієнт потужності.

Однією з ключових конструктивних особливостей перетворювача Cuk (рис. 2.9) є використання конденсатора замість котушки індуктивності, як накопичувача енергії та передавача потужності.

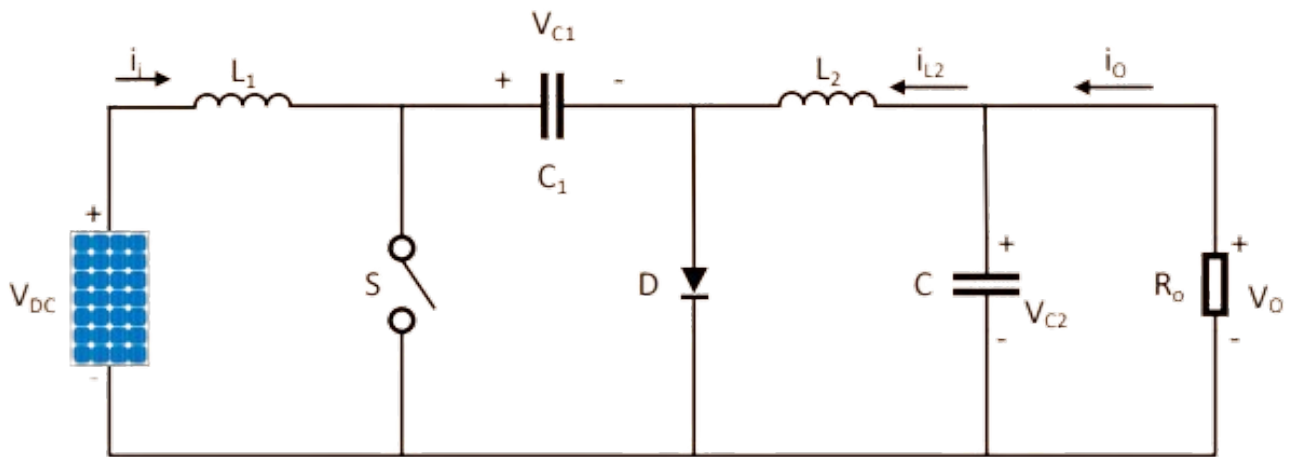


Рис. 2.9. Перетворювач Cuk для ФЕС

Це відрізняє його від звичайних понижувально-підвищувальних схем, де для цієї мети слугує індуктивність.

Принцип роботи перетворювача Cuk базується на по черговому заряджанні і розряджанні вхідного та вихідного конденсаторів при комутації відповідних ключів. Завдяки цьому енергія передається від джерела до навантаження і відбувається потрібне перетворення напруги.

Перевагами такого підходу є покращення динамічних характеристик

перетворювача, зниження пульсацій, можливість отримання як проходження, так і інверсії напруги в одній схемі. Тому перетворювач Cuk знаходить застосування в багатьох сучасних імпульсних джерелах живлення.

На рис. 2.10 наведено схему перетворювача Super-lift Luo.

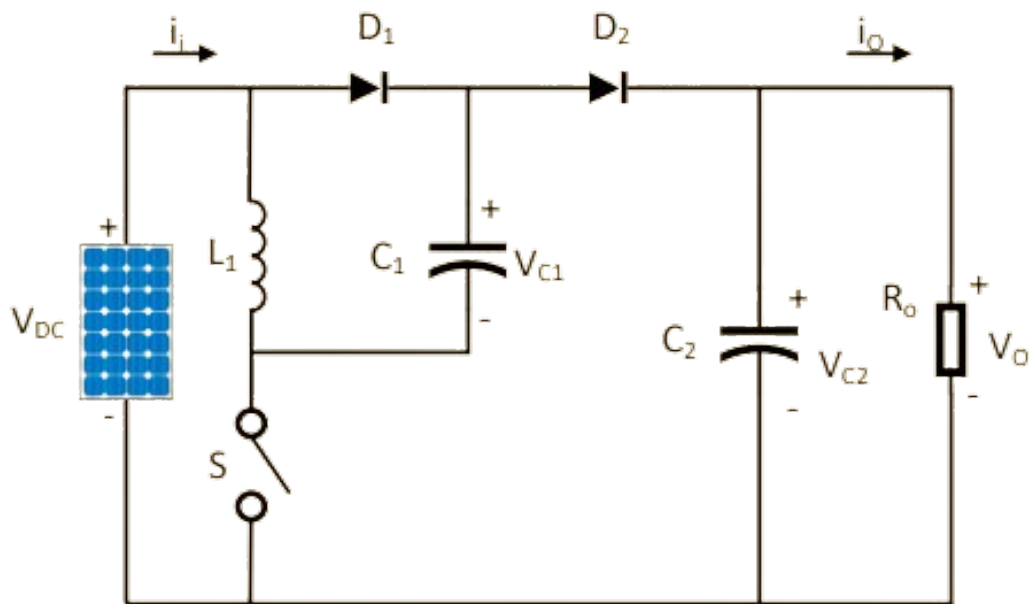


Рис. 2.10. Схема перетворювач Super-lift Luo для ФЕС

Перетворювачі постійного струму типу Luo мають ряд унікальних особливостей. Зокрема, їм притаманний підвищений коефіцієнт корисної дії та особливий закон зміни вихідної напруги у вигляді арифметичної прогресії.

Розглядаючи високопотужні модифікації перетворювачів Luo, можна відзначити їх високий коефіцієнт підсилення напруги в режимі проходження при роботі в першому квадранті. Це досягається конструктивними особливостями таких перетворювачів.

Перетворювачі топології Luo є перспективними з точки зору їх подальшого вивчення та використання як в побутовій, так і в промисловій електроніці для широкого кола задач. Їх переваги в плані ККД, коефіцієнта підсилення,

динамічних характеристик роблять такі пристрої досить конкурентоздатними.

Схема перетворювача Ultra-lift Luo показана на рис. 2.11.

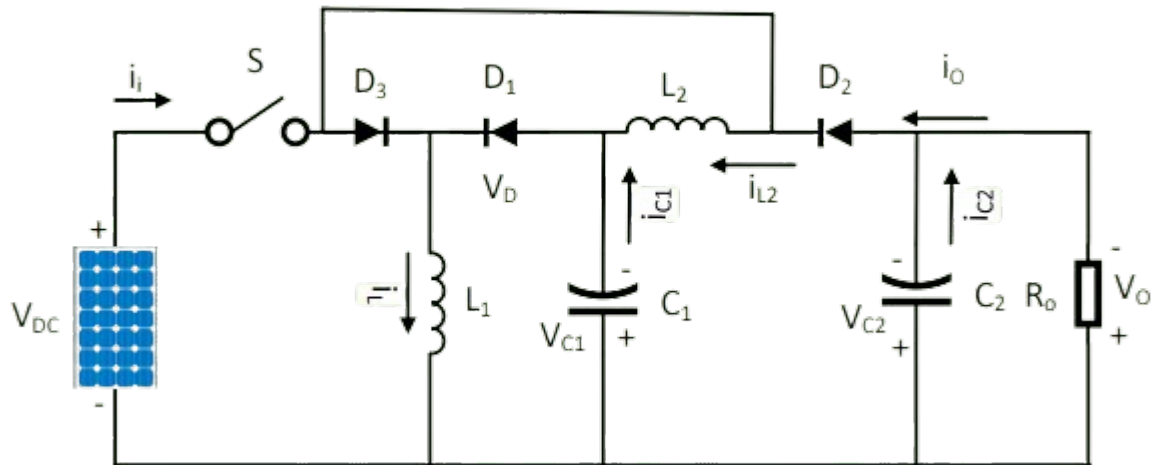


Рис. 2.11. Перетворювач Ultra-lift Luo

Зворотний перетворювач, схема якого наведена на рис. 2.12, знайшов широке застосування ФЕС невеликої потужності.

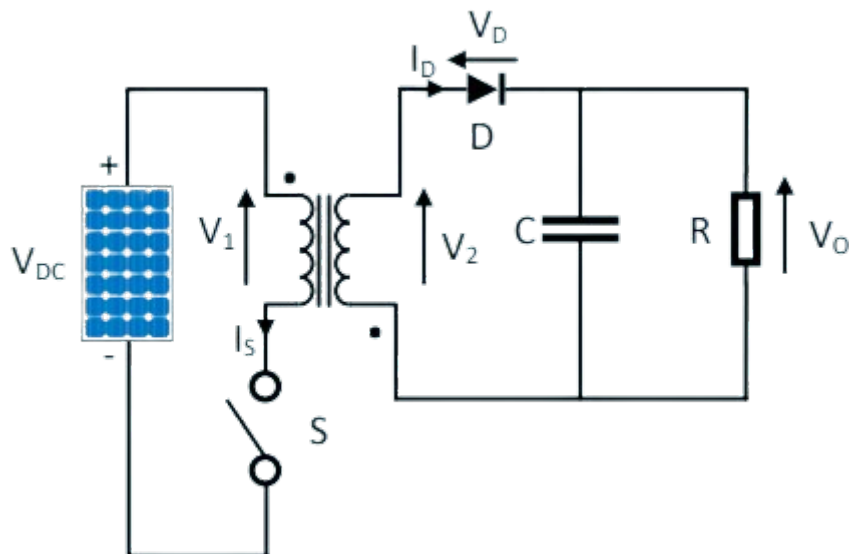


Рис. 2.12. Зворотний перетворювач ФЕС

У випадку необхідності реалізації високого коефіцієнту підсилення напруги в поєднанні з використанням трансформаторів, оптимальним рішенням є застосування зворотнохідних перетворювачів. Для високопотужних застосувань трансформатор має мати збільшений повітряний зазор, що забезпечує необхідний запас міцності ізоляції та здатність до накопичення енергії.

Однак великий повітряний зазор призводить до зменшення індуктивності намагнічування. Внаслідок цього в зворотнохідних перетворювачах спостерігається підвищений потік розсіювання енергії та досить низька ефективність її передачі. Це є одним з ключових недоліків таких схем, який необхідно враховувати при їх практичному застосуванні.

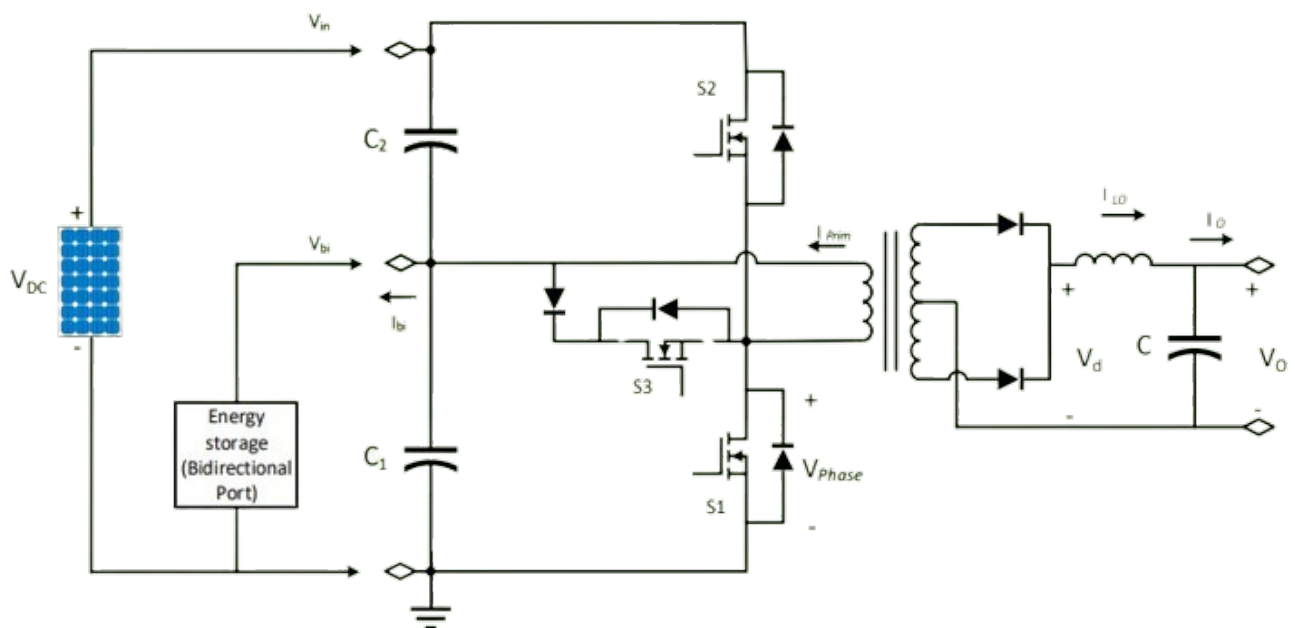


Рис. 2.13. Напівмостовий перетворювач для ФЕС

Повномостовий перетворювач електричної енергії, зображений на ілюстрації 2.14, часто застосовується у системах відновлюваної енергетики.

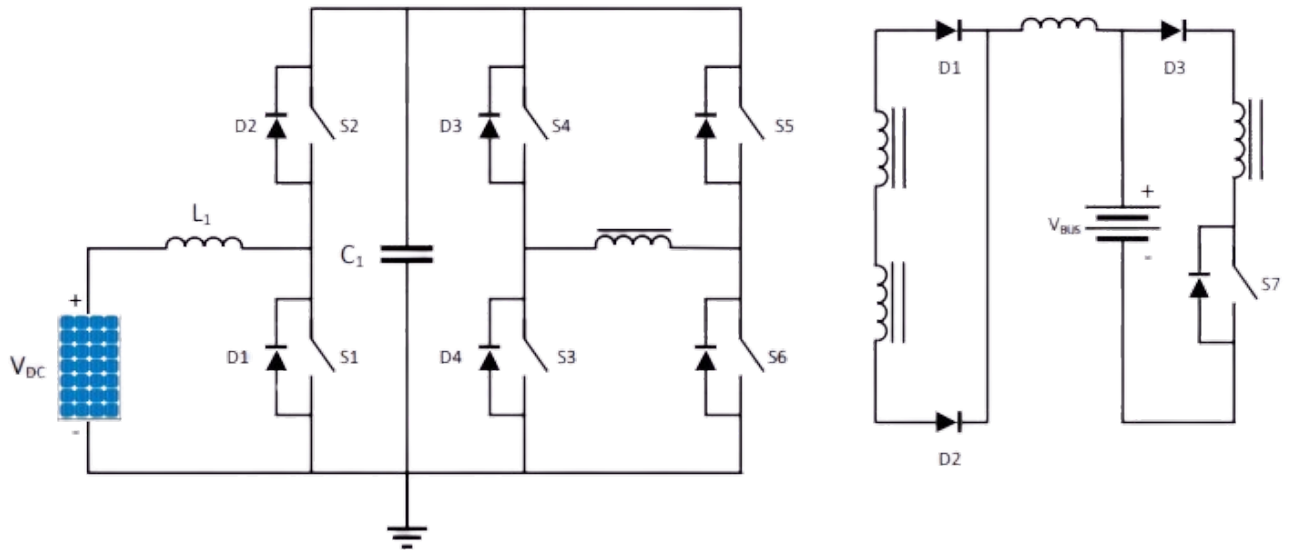


Рис. 2.14. Повномостовий перетворювач для ФЕС

Він слугує інтерфейсом між генеруючим пристроєм на базі відновлюваних джерел енергії, пристроєм для накопичення електроенергії та споживачем.

Такі перетворювачі дозволяють ефективно перетворювати постійний струм у змінний і навпаки. Завдяки цьому вироблена генератором енергія може акумулюватися, а також передаватися до електричної мережі чи безпосередньо споживачам.

Повномостові перетворювачі вирізняються високою надійністю та ефективністю. Вони забезпечують стабільні параметри вихідного струму незалежно від коливань навантаження чи вихідної напруги джерела. Також такі перетворювачі добре захищені від короткого замикання і перевантаження. З огляду на ці переваги вони набувають все більшого поширення у системах відновлюваної енергетики.

Повномостовий перетворювач являє собою пристрій з трьома виводами, що інтегрує два підвищувально-понижувальних перетворювача у топологію повного мосту. Така структура дозволяє забезпечити одноступеневе перетворення енергії і переключення нульової напруги для всіх наявних ключів. Було розроблено

високоєфективний асиметричний повномостовий перетворювач на основі широтно-імпульсної модуляції для застосування у системах ВДЕ.

Подвійний активний міст являє собою ізольований 2-направлений перетворювач постійного струму, показаний на рис. 2.15. Він користується популярністю завдяки можливості двонаправленої передачі потужності, високій ефективності перетворення, гальванічній розв'язці, великій щільності потужності та властивості м'якого перемикавання.

Такі перетворювачі часто застосовуються в системах відновлюваної енергетики для зв'язку між джерелами нестабільного живлення та накопичувачами енергії. Вони дозволяють ефективно управляти потоками енергії в обох напрямках. Крім того, гальванічна розв'язка підвищує безпеку всієї системи.

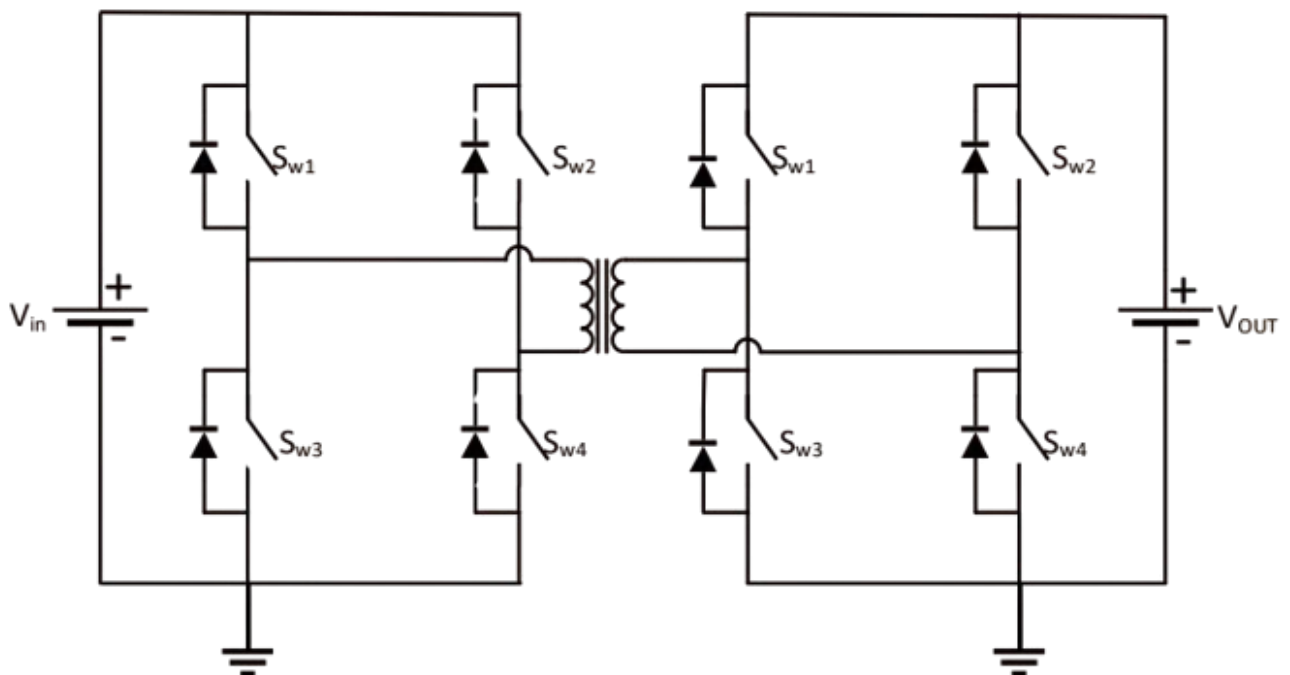


Рис. 2.15. Конвертер DAB для ФЕС

Зазначені можливості роблять ізолюваний двонаправлений перетворювач постійного струму (DAB-IBDC) важливим компонентом для побудови автономних гібридних систем електроживлення. У ньому два повномостові перетворювачі гальванічно розділені за допомогою високочастотного силового трансформатора. При цьому індуктивність розсіювання трансформатора виконує функцію накопичувача енергії.

Топологія DAB-IBDC дозволяє об'єднувати в єдину систему різні джерела енергії, такі як фотоелектричні панелі, вітрогенератори, паливні елементи тощо. Завдяки бідирекціональності передачі енергії стає можливим як зарядка накопичувачів від генераторів, так і живлення навантаження від накопичувачів. Гнучке управління потоками потужності дозволяє підвищити загальну ефективність системи.

2.3 Теоретичне дослідження принципів роботи іверторів СЕС

Z-інвертор являє собою мостовий інвертор з вхідним постійнострумовим з'єднанням. Він складається з двох конденсаторів та дроселя, з'єднаних у X-подібну структуру (рис. 2.16).

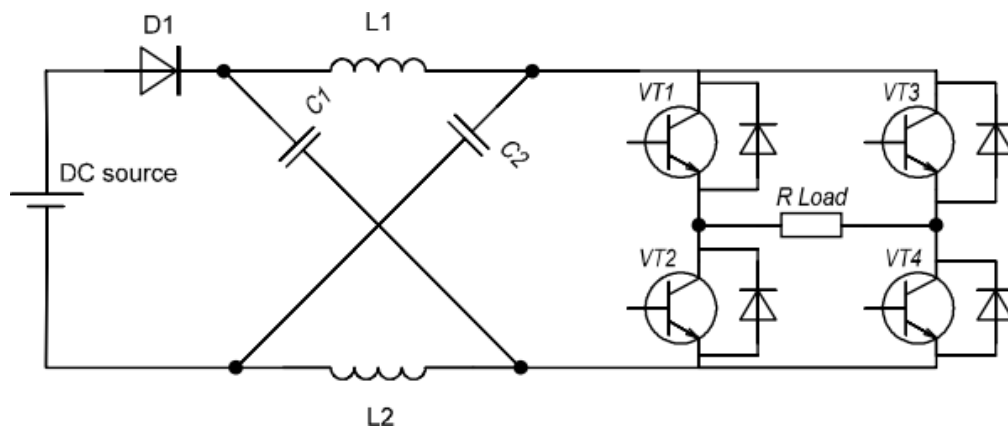


Рис. 2.16 – Схема z-інвертора

Така топологія дозволяє отримувати на виході змінну напругу заданої частоти і форми з вхідної постійної напруги. Перевагами Z-інвертора є простота схеми, низька вартість та висока надійність. Він не потребує використання окремого джерела постійного струму, сам виконує функції випрямлення і фільтрації.

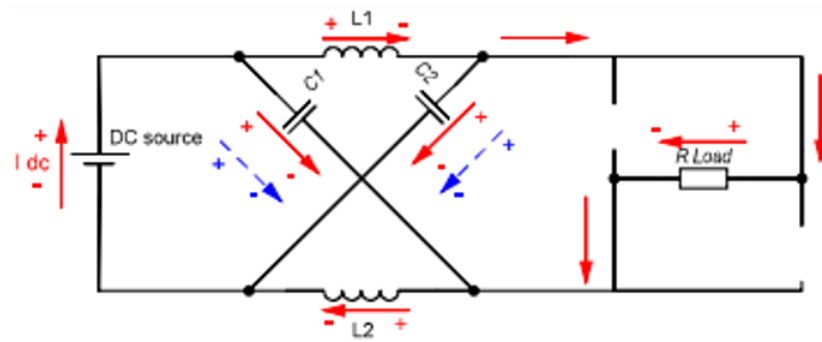
Z-інвертор знаходить застосування у системах сонячної енергетики для перетворення постійної напруги від фотоелектричних панелей на змінну напругу, необхідну для передачі енергії в мережу або споживачам. Він також використовується в інверторах частоти для живлення асинхронних електродвигунів від постійної напруги у автономних системах.

Джерелом живлення Z-інвертора може слугувати сонячна батарея або інше джерело постійного струму. Навантаження, як правило, може мати ємнісний, індуктивний або резистивний характер або представляти їх комбінацію. Силова частина схеми складається з чотирьох або шести ключів для однофазного чи трифазного варіанту відповідно. В якості ключів можуть застосовуватися IGBT-транзистори з антипаралельними діодами чи MOSFET-транзистори.

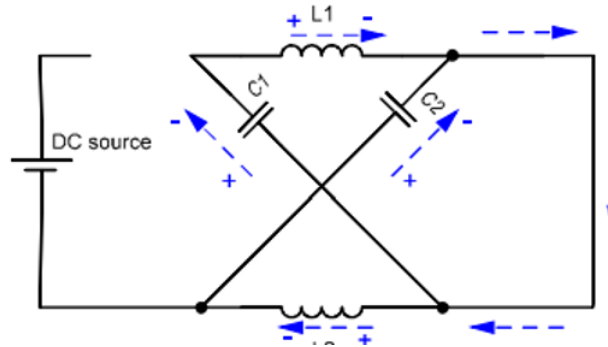
Для запобігання розряджанню вхідних конденсаторів крізь джерело живлення використовується захисний діод. Він перешкоджає протіканню зворотних струмів від конденсаторів до джерела.

Перевагами даної схеми є простота і надійність конструкції, відсутність пульсацій вихідної напруги, можливість роботи з мінливим вхідним напругою. Це робить Z-інвертор придатним для використання у системах відновлюваної енергетики, де параметри генерації можуть сильно змінюватись.

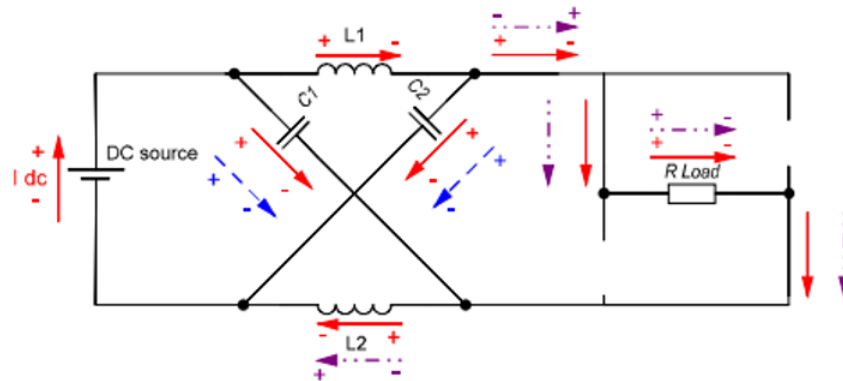
Застосування імпедансної схеми дає змогу застосовувати додатковий спосіб роботи напівпровідникових вимикачів, а саме метод «розриву», який відбувається в 3 етапи (рис. 2.17):



a)



б)



в)

Рис. 2.17. Режими комутації ключів інвертора

- режим «пробою» (див. рис. 2.17 б):

$$U_L = U_C,$$

$$U_d = 2U_C,$$

$$U_{\text{вих}} = 0,$$

- режим стандартної комутації силових ключів (див. рис. 2.17 а, в):

$$\begin{aligned}U_L &\neq U_C, \\U_d &= U_{ex} = U_L + U_C, \\U_L &= U_{ex} - U_C = U_C - U_{вих}, \\U_{вих} &= U_C - U_L = 2U_C - U_{ex},\end{aligned}$$

де $U_L = U_{L1} = U_{L2}$ - це напруга на L1 і L2,

$U_C = U_{C1} = U_{C2}$ - це напруга на C1 і C2,

U_d - це напруга на діоді D1

Відношення зміни напруги індуктивності до величини періоду Т роботи інвертора має вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{\overline{U_L} = U_C \cdot T_0 + (U_{ex} - U_C) \cdot T_1}{T} &= 0, \\ \frac{U_C}{U_{ex}} &= \frac{T_1}{T_1 - T_0}\end{aligned}$$

де T_1 – час стандартної комутації ключа інвертора;

T_0 – час «пробою».

При цьому:

$$T = T_1 + T_0$$

Середнє значення напруги імпедансного контуру визначається за виразом:

$$\overline{U_{вих}} = \frac{T_0 \cdot 0 + T_1 \cdot (2U_C - U_{ex})}{T} = \frac{T_1 \cdot (2U_C - U_{ex})}{T} = \frac{T_1}{T_0 - T_1} U_{ex}$$

Позначивши

$$\frac{T_1}{T_0 - T_1} = \frac{1}{1 - \frac{2T_0}{T}} = B$$

Кінцевий результат можна представити у вигляді:

$$\overline{U_{\text{вих}}} = B \cdot U_{\text{вх}}.$$

B -це коефіцієнт збільшення вихідної напруги, а одержана формула є основним співвідношенням, яке описує процес роботи імпедансного кола.

Залежність величини напруги конденсатора від часу спрацьовування має вигляд:

$$U_C = \frac{T}{T_1 - T_0} \cdot U_{\text{вх}} = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{T}{T_1 - T_0} \cdot U_{\text{вх}} = \frac{1 - \frac{T_0}{T}}{1 - \frac{2T_0}{T}} \cdot U_{\text{вх}}$$

Середнє значення струму індуктивності визначається за виразом:

$$\overline{I_L} = \frac{P}{U_{\text{вх}}},$$

Максимальне та мінімальне значення струму індуктивності лежить в межах:

$$I_{L \max} = \overline{I_L} + 30\%,$$

$$I_{L \min} = \overline{I_L} - 30\%.$$

Звідки індуктивність дорівнює

$$L = \frac{U_L \cdot T_0}{\Delta I}$$

Зважаючи на це, ємність конденсатора можна розрахувати за формулою:

$$C = \frac{\overline{I}_L \cdot T_0}{\Delta U_C},$$

Після визначення параметрів навантажувальної здатності, тривалості роботи схеми у "пробійному" режимі та значень струму, потужності і вихідної напруги, можна розрахувати характеристики електричних компонентів та імпеданс контуру.

«Пробійний» режим дозволяє підвищити вхідну та вихідну напругу інверторного моста, взяті від джерела постійної напруги, без необхідності встановлення додаткових підвищувальних перетворювачів на вході схеми. Використання "пробою" в режимі відбору великих потужностей надає можливість передавати більше енергії від сонячних панелей до навантаження, що дозволяє максимально ефективно використовувати площу фотоелектричних перетворювачів.

Недоліками такої схеми є перевантаження силових ключів в «пробійному» режимі, оскільки струм для деяких типів комутації може в два рази перевищувати амплітудні значення, що допустимі в нормальних умовах; можливий пробій джерела постійної напруги під час «пробою».

2.4 Аналіз ефективності інверторів сонячних електростанцій

Для перевірки ефективності роботи інвертора сонячної електростанції було побудовано два графіки залежності продуктивності від часу за добу. Перший графік демонструє значення ефективності інвертора щохвилини, другий - усереднені показники за 15 хвилин. Номінальна потужність інверторів даної сонячної електростанції становить 550 кВт.

Аналіз графіків дозволяє оцінити стабільність та оптимальність роботи інвертора протягом доби за різних умов функціонування системи. Короткочасні коливання продуктивності згладжуються при аналізі усереднених даних.

Зіставлення отриманих показників ефективності з паспортними дає можливість виявити потенційні проблеми в роботі інверторів та знайти шляхи їх усунення для підвищення загальної продуктивності сонячної електростанції. Такі тести доцільно проводити регулярно в процесі експлуатації системи.

На рис. 2.18 показано графік ефективності роботи одного сонячного інвертора протягом доби.

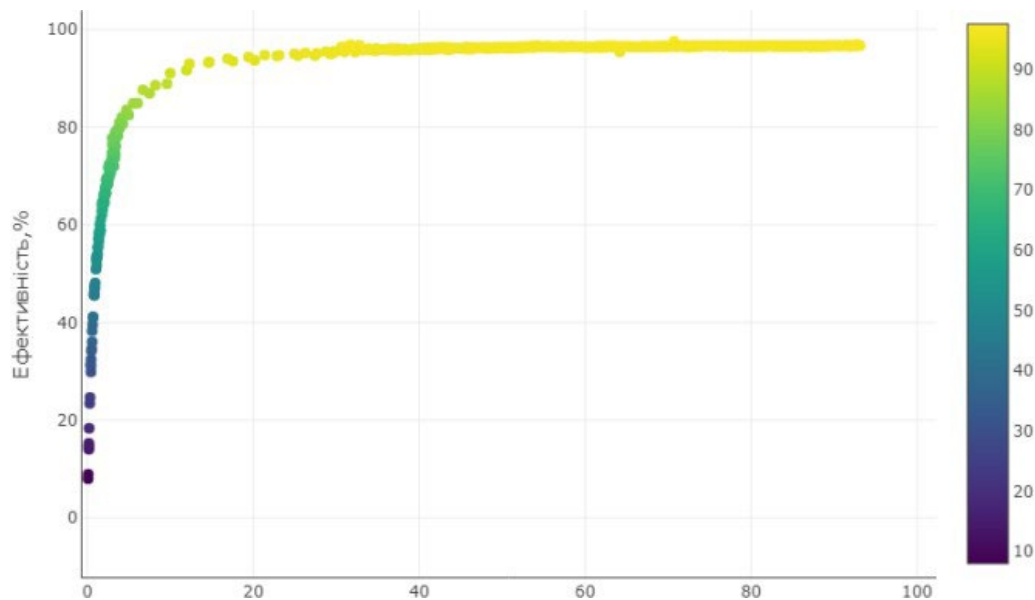


Рис. 2.18. Графік добової ефективності роботи інвертора

На графіку, представленому на рис. 2.19, синім кольором виділено ділянки, необхідні для розрахунку ефективності вироблення енергії. Він демонструє робочу потужність даного інвертора на інтервалі 15 хвилин. Тут точки відліку ефективності були позначені.

На досліджуваній сонячній електростанції встановлено 15 інверторів 550 кВт кожен. До кожного інвертора під'єднано паралельне фотоелектричне поле потужністю 637 кВт. Для оцінки роботи системи обрано період часу з 11. 2020 р. по 06.2021 р. Ефективність роботи розраховувалась за кожну добу цього проміжку часу. Для даного дослідження було використано дані за 284 доби.

Аналіз наведених даних дає можливість оцінити стабільність та оптимальність роботи інверторів протягом тривалого часу за різних погодних та експлуатаційних умов. Це дозволяє виявити слабкі місця та потенційні шляхи підвищення ефективності всієї системи виробництва сонячної електроенергії.

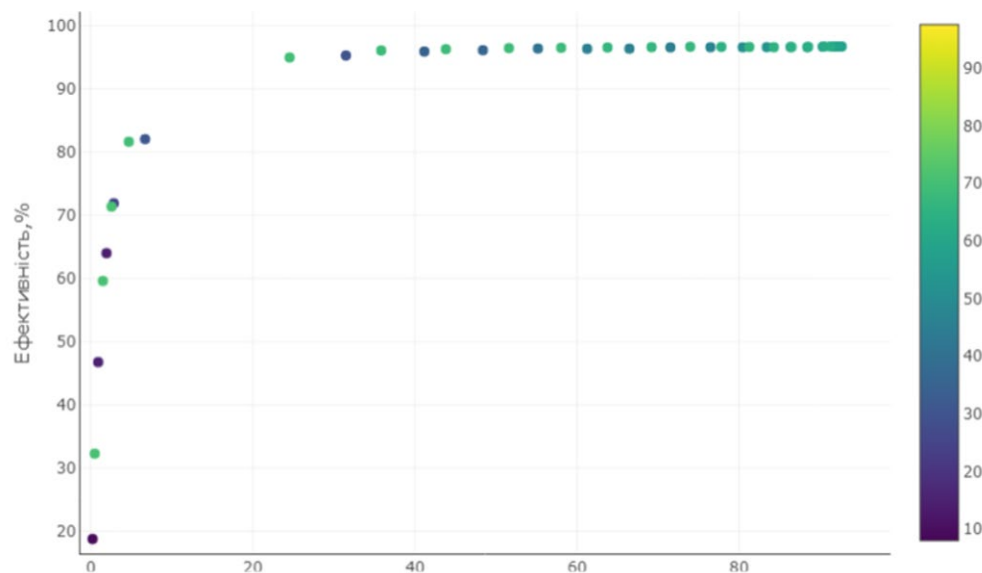


Рис. 2.19. Графік ефективності інвертора за 15 хвилинні інтервали

У розрахунки включено дні, коли завантаження інверторів не перевищувало 30%. Такі дні трапляються взимку та за низької інсоляції. Вони не

враховуються при розрахунку ефективності, оскільки вважаються такими, що мають нульову ефективність. На рис. 4 показано розподіл ККД інверторів за період спостереження.

Аналізуючи даний розподіл, можна зробити наступні висновки:

1. Навіть в межах однієї станції аналогічні інвертори з однаковою к-стю панелей різний ККД.
2. Фактичне значення ефективності відрізняється від заявленого виробником в середньому на 3-4%. Задекларований рівень ККД становить 98,50 %.
3. Різниця ефективності між окремими інверторами складає 1,5-2,5%.

Отже, на практиці спостерігаються деякі відхилення фактичних показників ККД інверторів від паспортних. Аналіз і моніторинг даних параметрів дає можливість оцінити реальну ефективність обладнання та виявити шляхи її підвищення.

Висновки до розділу

1. Існує велика різноманітність топологій та модифікацій перетворювачів постійного струму для систем альтернативної енергетики. Їх класифікація базується на низці структурних, схемотехнічних та режимних характеристик. Ключовими особливостями при виборі та застосуванні перетворювачів є коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт підсилення напруги, динамічні показники, рівень пульсацій тощо.
2. Перспективними є гібридні та багаторівневі перетворювальні схеми, а також застосування сучасних алгоритмів і систем керування для підвищення ефективності перетворення енергії.
3. Повномостові та Z-інвертори широко використовуються в системах

відновлюваної енергетики для перетворення постійного струму у змінний, а також для управління потоками потужності.

4. Фактичні показники ефективності інверторів можуть дещо відрізнятися від паспортних значень внаслідок різниць в умовах експлуатації. Моніторинг та аналіз ККД інверторів в реальному часі дозволяє виявити слабкі місця та резерви для підвищення загальної ефективності системи.

5. Доцільно проводити регулярні вимірювання, порівнювати та узагальнювати отримані дані для пошуку оптимальних режимів роботи устаткування.

6. Конструктивні особливості та алгоритми управління інверторів потребують подальшого вдосконалення для максимальної реалізації потенціалу відновлюваних джерел енергії.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1 Розробка і аналіз принципової схеми інвертора СЕС

Існують два основні типи систем сонячної генерації електроенергії - автономні та підключені до мережі. Автономні фотоелектричні установки зазвичай використовуються для забезпечення електропостачання окремих об'єктів. Проте для збереження надлишків електроенергії, виробленої в періоди зниженого споживання, потрібне акумулювання в батареях.

Серед недоліків автономних сонячних електростанцій можна відзначити: невисокий коефіцієнт корисної дії через втрати енергії під час її перетворення та збереження; значну вартість акумуляторних батарей; обмежену ємність для акумулювання електроенергії.

Натомість системи, підключені до загальної електромережі, дають можливість віддавати надлишки виробленої сонячної електроенергії в мережу. Це дозволяє оптимізувати саме процес виробництва енергії з сонця. Проте потребує узгодження технічних параметрів з операторами мережі.

Отже, при виборі типу сонячної електростанції варто враховувати потреби конкретного споживача та наявну інфраструктуру.

Головна перевага сонячних електростанцій, інтегрованих в загальну мережу, полягає у незалежності від виробництва енергії лише з відновлюваних джерел. Такі системи гарантують отримання необхідної додаткової електроенергії з мережі у разі потреби. Крім того, надлишки виробленої сонячної електроенергії можуть передаватися в мережу. Отже, з точки зору надійності, системи, інтегровані з енергосистемою, є більш ефективним рішенням.

Оскільки параметри струму і напруги, що виробляються фотоелектричними панелями, не завжди сумісні з потребами споживачів, потрібне налаштування інтерфейсу між генераторами і навантаженням чи мережею. Це завдання виконують перетворювачі та системи контролю, котрі забезпечують відбір найбільшої потужності і формування синусоїдального струму.

Отже, для ефективної роботи сонячної генерації важливо правильно підібрати всі елементи системи - від фотоелектричних панелей до інтерфейсів та контролерів, що забезпечать узгодження параметрів виробленої енергії з вимогами конкретних споживачів чи загальної мережі.

При виборі силового перетворювача для сонячної чи вітрової електростанції варто враховувати співвідношення його вартості та ефективності. Оптимальним є вибір перетворювача з номінальною потужністю, що відповідає потужності встановлених генераторів. Це забезпечить максимально можливий коефіцієнт корисної дії системи в нормальному режимі.

Проте, з метою здешевлення проекту, часто обирають перетворювач з запасом потужності. В цьому разі він працює на межі своїх технічних можливостей, що підвищує ймовірність збоїв та поломок. Також потрібні додаткові пристрої захисту для запобігання перевантаженням.

А ось встановлення перетворювача з надлишковою потужністю збільшує початкові капіталовкладення в проект. Проте дозволяє уникнути витрат на додаткові системи захисту.

Отже, вибір оптимального за параметрами і вартістю перетворювача вимагає ретельного аналізу балансу між ефективністю та надійністю системи з однієї сторони, та початковими інвестиціями з іншої.

Питання якості електроенергії нерозривно пов'язане з надійністю функціонування енергосистеми. Відповідно до встановлених стандартів, усі

3.2 Аналіз принципової схеми DC/DC перетворювача

У системах сонячної генерації першим етапом перетворення електричної енергії є DC/DC конвертори (рис. 3.2), що узгоджують параметри постійного струму фотоелектричних панелей з необхідними.

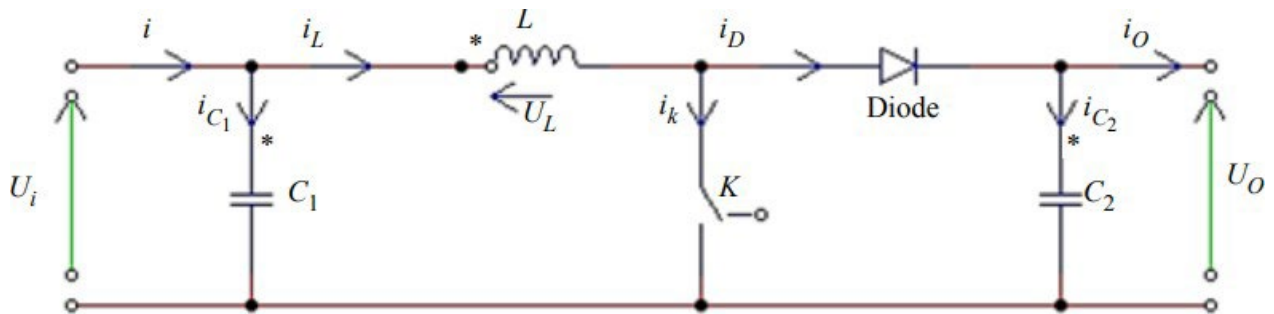


Рис. 3.2. Підвищуючий DC/DC перетворювач

Залежно від того, який рівень напруги потрібно отримати на виході, застосовуються підвищувальні або понижувальні перетворювачі.

Наприклад, підвищувальний перетворювач має на виході котушку індуктивності - дросель. Вона забезпечує неперервність вхідного струму та стабілізацію робочої точки на вольт-амперній характеристиці такого перетворювача.

Після перетворення постійного струму, за допомогою іншого типу перетворювача (інвертора) здійснюється перетворення енергії в змінний струм для подальшої передачі в локальну чи загальну електричну мережу. Вибір типу та компонування DC/DC та DC/AC перетворювачів у фотоелектричній системі залежить від її потужності, технічних вимог та загальної конфігурації.

Для того щоб провести синтез функції підвищуючого перетворювача потрібно представити еквівалентні схеми заміщення для кожного з положень перемикача K .

На рис. 3.3 показані дві еквівалентні схеми перетворювача для 2-х робочих циклів: замкнутого (а) та розімкнутого (б) ключа К.

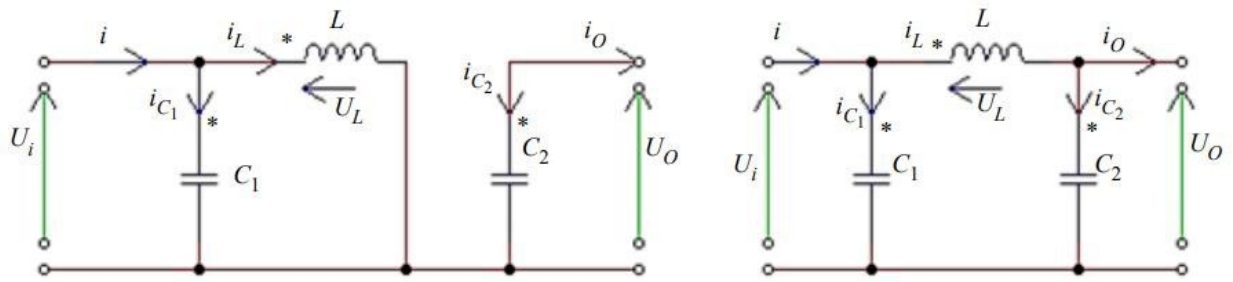


Рис. 3.3 – Схеми для двох режимів роботи перетворювача

На рис. 3.4 наведені типові діаграми роботи підвищуючого перетворювача

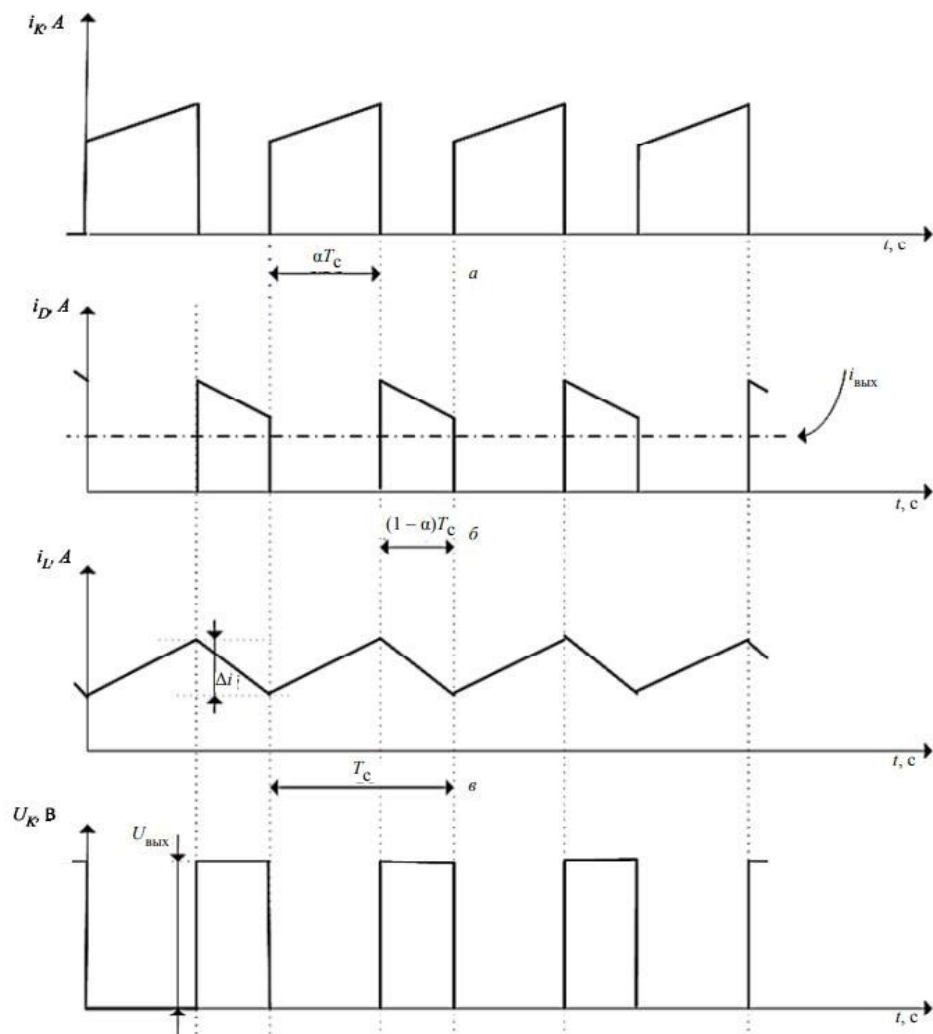


Рис. 3.4. Типові діаграми роботи підвищуючого перетворювача

3.3 Математична модель сонячного інвертора

Спрощена схема сонячного інвертора наведена на рис. 3.5.

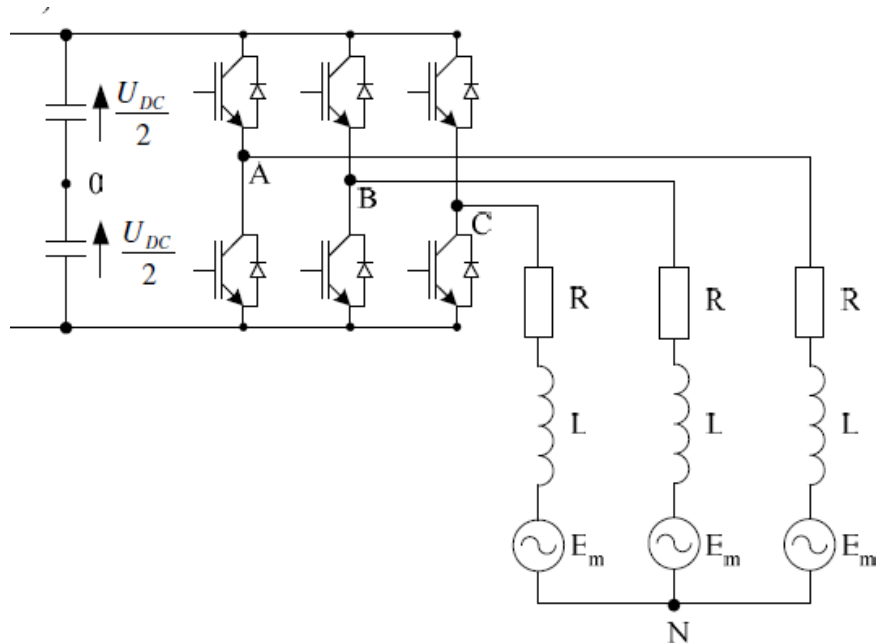


Рис. 3.5. Спрощена схема сонячного інвертора

При розробці математичної моделі інвертора приймемо наступні припущення:

- напруги мережі синусоїдальні і симетричні;
- силові напівпровідникові ключі ідеальні;
- індуктивності та ємності вхідного фільтра рівні між собою.

Вирази для визначення напруг мережі:

$$\begin{aligned} u_{AN} &= E_m \sin(\omega t) \\ u_{BN} &= E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$u_{CN} = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

Миттєві значення міжфазних напруг перетворювача:

$$\begin{aligned} u_{AB} &= (S_A - S_B)U_C \\ u_{BC} &= (S_B - S_C)U_C \\ u_{CA} &= (S_C - S_A)U_C \end{aligned} \quad (3.2)$$

Фазні напруги перетворювача

$$\begin{aligned} u_{nA} &= f_a U_C \\ u_{nB} &= f_b U_C \\ u_{nC} &= f_c U_C \end{aligned} \quad (3.3)$$

де f_a, f_b, f_c — це функції перемикання фазних напруг :

$$\begin{aligned}
 f_a &= \frac{2S_A - (S_B + S_C)}{3} \\
 f_b &= \frac{2S_B - (S_A + S_C)}{3} \\
 f_c &= \frac{2S_C - (S_A + S_B)}{3}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Диференційні рівняння згідно законів Кірхгофа для схеми на рис. 3.5:

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\pi A} \\ u_{\pi B} \\ u_{\pi C} \end{bmatrix}
 \tag{3.5}$$

Струм ланки постійного струму визначається за виразом:

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt}
 \tag{3.6}$$

Струм в конденсаторі розраховується за формулою:

$$i_C = i_d - i_H
 \tag{3.7}$$

Звідки

$$C \frac{dU_C}{dt} = S_A i_A + S_B i_B + S_C i_C - i_H \quad (3.8)$$

Співвідношення для кожної з фаз:

$$\begin{aligned} L_A \frac{di_A}{dt} + R i_A &= e_A - U_C \left(S_A - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \\ L_B \frac{di_B}{dt} + R i_B &= e_B - U_C \left(S_B - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \\ L_C \frac{di_C}{dt} + R i_C &= e_C - U_C \left(S_C - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Проведемо перетворення рівняння (3.3) в координатну систему a-b:

$$u_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} E_m \sin(\omega t)$$

$$u_\beta = \sqrt{\frac{3}{2}} E_m \cos(\omega t)$$

(3.10)

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} E_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \omega L \begin{bmatrix} i_d \\ -i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{nd} \\ u_{nq} \end{bmatrix}$$

Вирази (3.2) - (3.6) та (3.7) - (3.10) являють собою математичну модель інверторів якій враховується дискретність процесів.

Структурна схема моделі інвертора в трифазних координатах зображена на рис. 3.6.

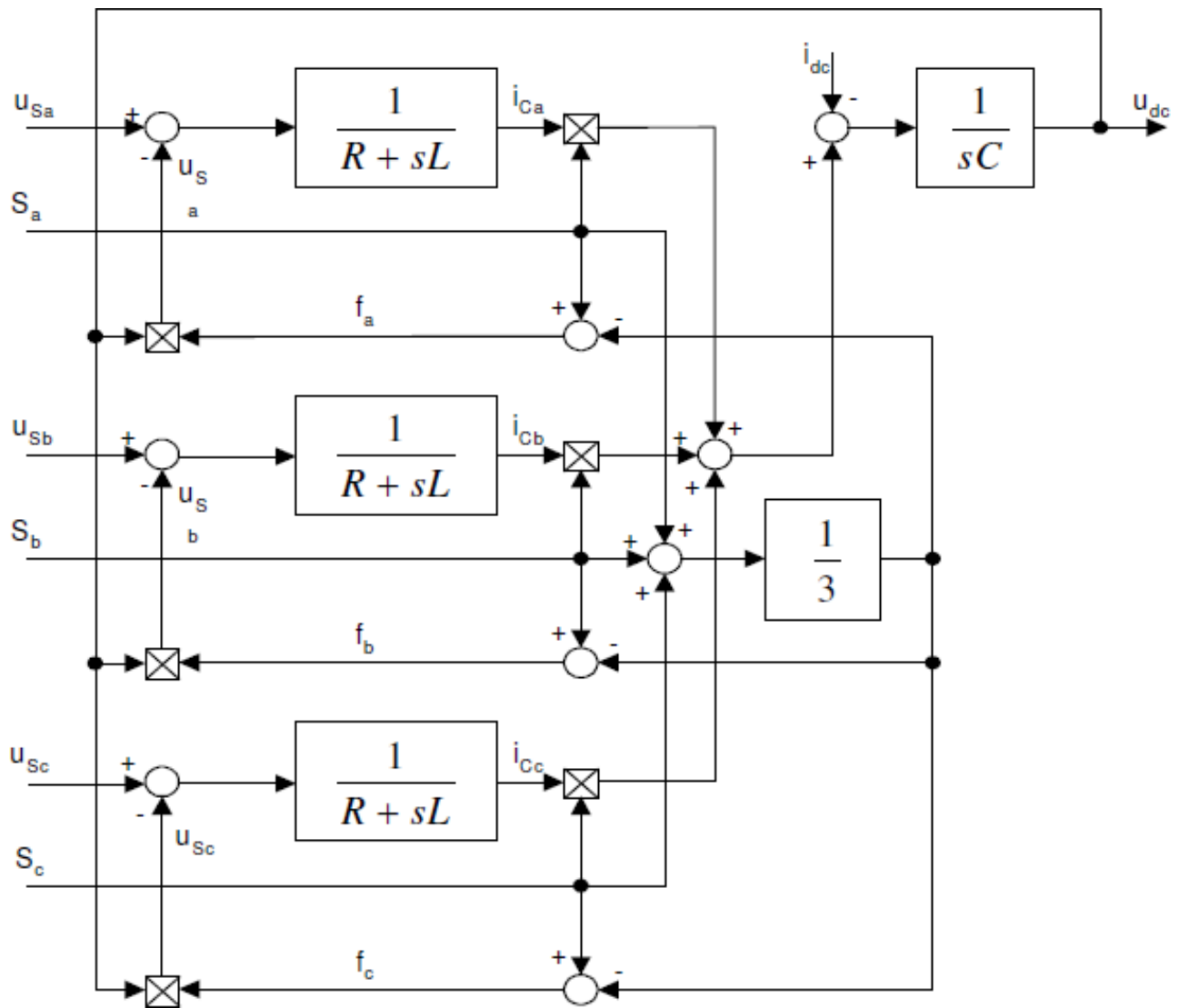


Рис. 3.6. Структурна схема моделі інвертора в трифазних координатах

3.4 Алгоритми знаходження точки максимальної потужності

Одним з ключових методів підвищення ефективності фотоелектричних систем є реалізація режиму максимальної потужності (МРР) у точці максимуму на вольт-амперній характеристиці сонячних панелей.

Для цього в системі керування постійно вимірюються поточні значення напруги і струму панелей, аби визначити та підтримувати робочу точку у максимумі потужності. Такий підхід дозволяє максимізувати віддачу від

сонячних батарей за будь-яких умов освітленості та температури навколишнього середовища.

Зазвичай, системи MPPT працюють шляхом динамічного підвищення або зниження вихідної напруги перетворювачів відповідно до оптимальної робочої точки на характеристиці. Контролер MPPT складається з 2-х частин: алгоритмічного регулятора для управління процесом пошуку точки максимуму і силового каскаду (DC/DC перетворювача), що безпосередньо передає енергію між сонячними панелями та акумуляторами.

Для оптимізації віддачі фотоелектричних модулів в системах MPPT традиційно використовують один з трьох базових алгоритмів відстеження точки максимальної потужності. Деякі пристрої поєднують в собі декілька методів з можливістю перемикання між ними залежно від умов функціонування. Основні підходи включають: метод збурення та спостереження, алгоритм зростаючої провідності а також метод постійної напруги.

В алгоритмі збурення та спостереження контролер MPPT на досить невелику величину змінює свій вхідний опір системи шляхом варіації коефіцієнта заповнення імпульсів керування перетворювачем. Це призводить до зміни напруги на виході сонячних панелей. Далі контролер вимірює поточні параметри та аналізує зміну потужності для подальшої корекції робочої точки.

У разі збільшення потужності на виході сонячних панелей після збурення, контролер продовжує змінювати напругу у тому ж напрямі. Цей процес триває до того моменту, поки приріст потужності не припиниться. Такий підхід є одним з найбільш поширених, попри деякі коливання потужності навколо оптимальної точки.

Його ще називають методом підйому, оскільки він базується на аналізі кривої потужності від напруги. Ця залежність зростає до точки максимуму, а потім спадає. Простота реалізації зумовила широке застосування даного

алгоритму на практиці. Для підвищення точності можливе використання адаптивної системи зміни кроку регулювання напруги контролером МРРТ.

3.5 Комп'ютерне моделювання режимів роботи сонячної електростанції

На рисунку 3.7 показана модель сонячної електростанції, розроблена у середовищі Matlab. Вона складається з наступних компонентів:

- сонячна панель як джерело енергії;
- DC/DC перетворювач для узгодження напруги панелей;
- інвертор для перетворення постійного струму на змінний;
- модель електромережі, куди передається вироблена енергія.

За допомогою цієї моделі можна досліджувати роботу сонячної станції за різних умов. Наприклад, на рис. 3.8 показано вольт-амперні та ватт-вольтні характеристики панелі при постійній освітленості і змінній температурі навколишнього середовища. Аналіз цих залежностей дозволяє оптимізувати режими роботи системи

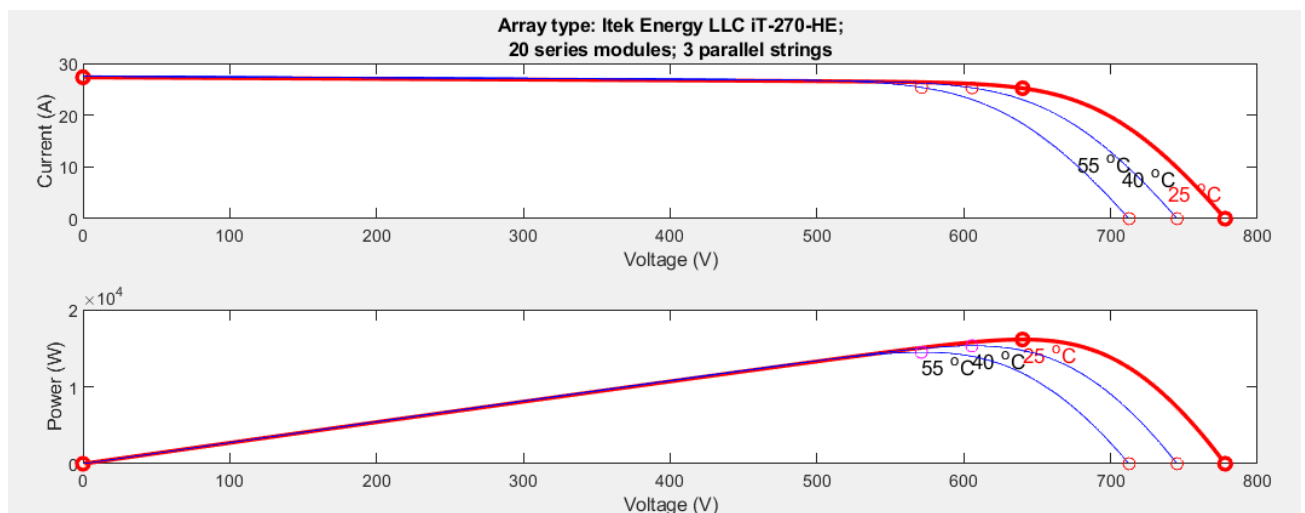


Рис. 3.8. Графіки роботи СЕС при незмінному значенні інтенсивності сонячного випромінювання

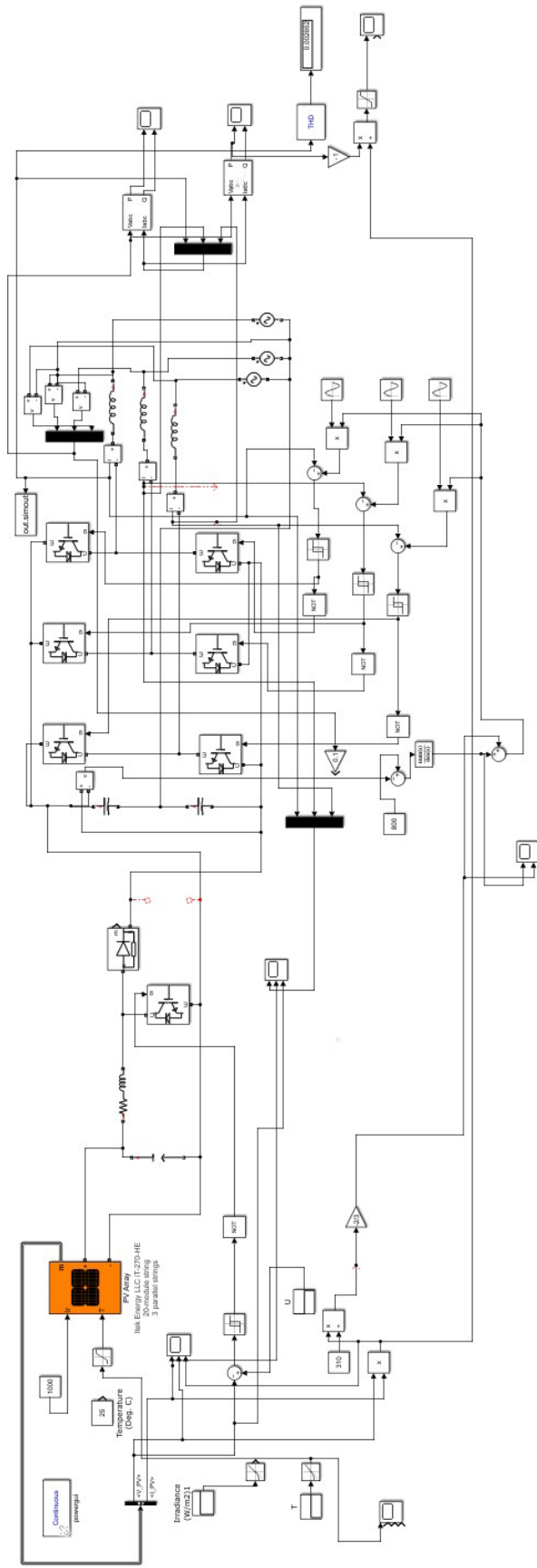


Рис. 3.7. Модель режимів роботи сонячної електростанції в середовищі Matlab

Підвищення температури навколишнього середовища впливає на характеристики сонячної панелі наступним чином:

- Струм короткого замикання залишається майже незмінним;
- Зменшується напруга холостого ходу;
- Знижується максимальна потужність, що може бути отримана від сонячної батареї.

Такі закономірності демонструють графіки на рис. 3.8, отримані за допомогою розробленої моделі.

Аналогічні характеристики для випадку зміни інтенсивності сонячного випромінювання при постійній температурі показано на рис. 3.9. Їх аналіз також дозволяє оптимізувати параметри системи для конкретних умов експлуатації.

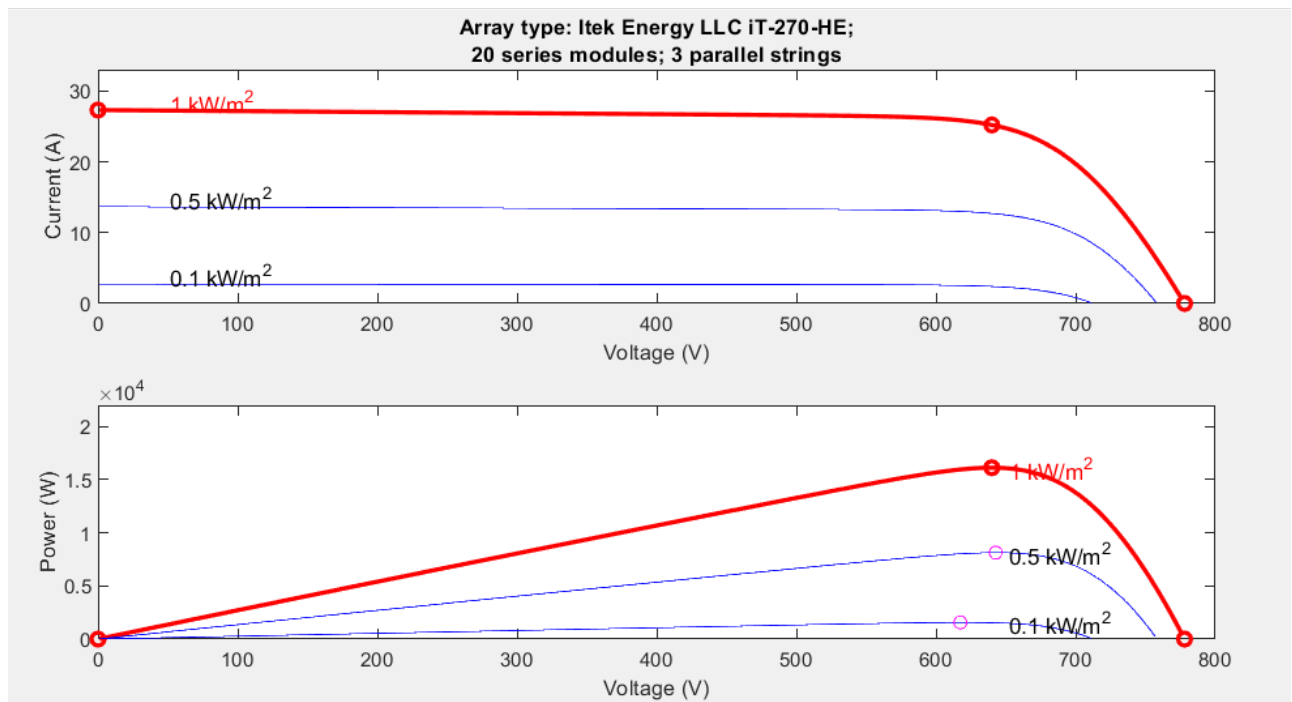


Рис. 3.9. Графіки роботи інвертора для випадку постійної температури

Інтенсивність сонячного випромінювання впливає в основному на величину струму короткого замикання сонячного модуля, в той час як

температура зумовлює зміну напруги холостого ходу. Наприклад, при зменшенні освітленості у два рази, струм короткого замикання також знизиться приблизно у два рази. Водночас напруга холостого ходу залишатиметься майже незмінною.

Існує температурний коефіцієнт, що характеризує залежність напруги холостого ходу панелі від температури. Для кремнієвих фотоелектричних модулів він становить порядку декількох мілівольт на градус Цельсія. Врахування цього коефіцієнта дозволяє точніше моделювати роботу сонячних батарей

Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 3.10.

Струм, що передається від сонячної електростанції в мережу, має синусоїдальну форму, що є важливим показником якості електроенергії. При зміні температури навколишнього середовища система керування автоматично знаходить нове оптимальне значення напруги, за якого відбувається відбір максимальної потужності з сонячних панелей.

Проведений аналіз моделі показав, що в усіх режимах роботи коефіцієнт гармонійних спотворень (THD) струму дорівнює 2,6%. Це значення не перевищує гранично допустимі норми, встановлені стандартами якості електроенергії. Отже, розроблена модель дозволяє верифікувати відповідність параметрів сонячної електростанції вимогам якості перед тестуванням реального обладнання.

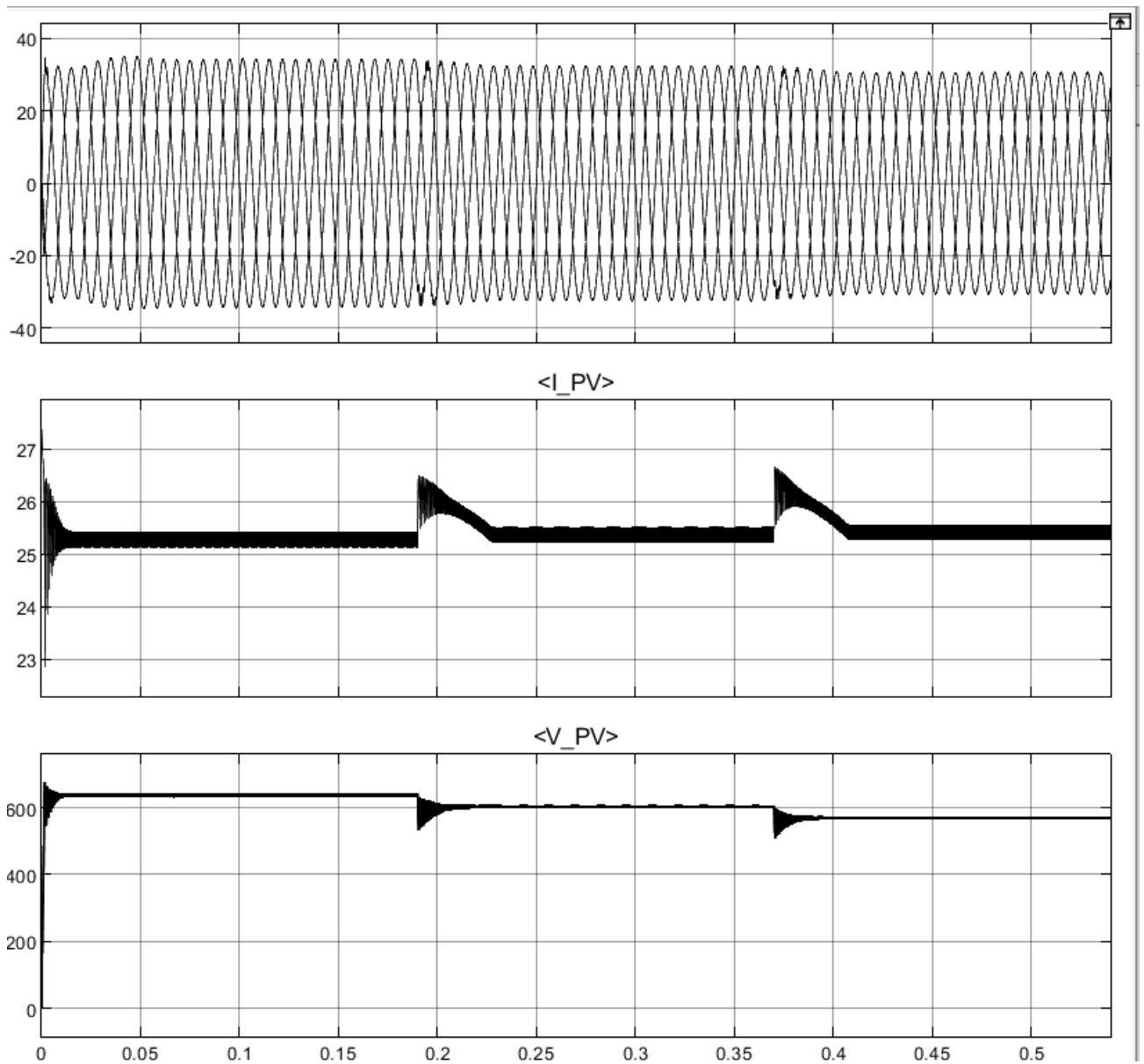


Рис. 3.10. Результати моделювання режимів роботи сонячної електростанції в середовищі Matlab

Висновки до розділу

1. Сонячні електростанції можуть працювати автономно або в складі загальних енергосистем. Для ефективної роботи вони потребують ретельного

підбору усього ланцюга перетворення та узгодження енергії - від сонячних панелей до інверторів і систем керування.

2. Важливу роль відіграють алгоритми відстеження точки максимальної потужності МРРТ, які дозволяють максимально ефективно використовувати енергію сонця.

3. Параметри сонячних панелей суттєво залежать від температури та освітленості. Їх врахування дає змогу точніше моделювати роботу ФЕС.

4. Важливою вимогою є забезпечення належної якості електроенергії, що передається в мережу, згідно з відповідними стандартами.

5. Створення ефективних сонячних електростанцій вимагає системного підходу з урахуванням усіх аспектів - від особливостей генерації до перетворення та узгодження електроенергії з мережею.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Відповідно до чинних норм, електромонтажні роботи поділяють на три категорії залежно від рівня електробезпеки.

До першої належать роботи після вимкнення живлення та ускладнення контакту зі струмопровідними частинами, що забезпечує максимальний захист працівників. Сюди входить відключення живлення, блокування і пломбування комутаційних апаратів, вивішування попереджувальних плакатів.

До другої категорії належать роботи безпосередньо на струмопровідних елементах чи біля них. Все це вимагає спеціальних заходів безпеки та підвищеної уваги, таких як використання заземлення, ізолювальних приладів тощо.

Найменш безпечною є третя категорія - роботи на неструмопровідних конструкціях під напругою. Незважаючи на відсутність безпосереднього контакту зі струмом, існує високий ризик ураження, викликана ймовірністю короткого замикання або перекриття.

Рівень безпеки залежить від дотримання правил при роботах кожної категорії. Працівники повинні мати відповідну кваліфікацію, проходити навчання та інструктажі з охорони праці, застосовувати під час монтажних робіт засоби захисту і техніку безпеки.

До обов'язкових заходів безпеки при одночасних роботах з різним рівнем напруги належать: розмежування та огороження небезпечних зон, спеціальне маркування і попереджувальне сигнальне освітлення, застосування засобів захисту відповідно до вищого рівня напруги.

Керівники зобов'язані забезпечити додатковий інструктаж працівників та контроль за дотриманням правил безпеки на всіх ділянках робіт.

Крім того, робоче місце має бути позначене знаками безпеки. Працівники зобов'язані використовувати захисні каски, маски та окуляри для запобігання травм при можливому пробіі ізоляції. Після завершення робіт проводиться додаткове заземлення обладнання для гарантованого зняття залишкової напруги

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сонячні фотоелектричні станції є ефективним джерелом екологічно чистої енергії, здатним забезпечити надійне електропостачання автономних об'єктів. Існують різні типи СФЕС - автономні та синхронізовані з мережею. До їх складу окрім сонячних панелей можуть входити акумулятори, контролери, інвертори та інше додаткове обладнання. Вибір конфігурації системи залежить від конкретних потреб об'єкта в енергопостачанні.

2. За умови правильного проектування, сонячні електростанції здатні цілодобово з високою надійністю забезпечувати споживачів електрикою, ефективно використовуючи енергію сонця. Вони можуть застосовуватися як основне або резервне джерело живлення, підвищуючи енергетичну незалежність об'єктів.

3. Підключення до загальної електромережі дає змогу уникнути більшості недоліків, властивих автономним ФЕС, значно підвищуючи ефективність використання сонячної енергії.

4. Найпоширенішими є конфігурації мережевих ФЕС без акумуляторів завдяки простоті, надійності та високому ККД перетворення енергії. Проте вони повністю залежать від наявності мережевого живлення. Застосування гібридних схем з акумуляторами та автономними інверторами дає можливість створення систем безперебійного живлення споживачів, ефективного використання та балансування всіх джерел енергії.

5. Оптимальна конфігурація мережевої ФЕС визначається конкретними вимогами до надійності та економічності системи електропостачання об'єкта з урахуванням місцевих умов.

6. Існує велика різноманітність топологій та модифікацій перетворювачів постійного струму для систем альтернативної енергетики. Їх класифікація базується на низці структурних, схемотехнічних та режимних характеристик. Ключовими особливостями при виборі та застосуванні

перетворювачів є коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт підсилення напруги, динамічні показники, рівень пульсацій тощо.

7. Перспективними є гібридні та багаторівневі перетворювальні схеми, а також застосування сучасних алгоритмів і систем керування для підвищення ефективності перетворення енергії.

8. Повномостові та Z-інвертори широко використовуються в системах відновлюваної енергетики для перетворення постійного струму у змінний, а також для управління потоками потужності.

9. Фактичні показники ефективності інверторів можуть дещо відрізнятися від паспортних значень внаслідок різниць в умовах експлуатації. Моніторинг та аналіз ККД інверторів в реальному часі дозволяє виявити слабкі місця та резерви для підвищення загальної ефективності системи.

10. Важливу роль відіграють алгоритми відстеження точки максимальної потужності MPPT, які дозволяють максимально ефективно використовувати енергію сонця.

11. Параметри сонячних панелей суттєво залежать від температури та освітленості. Їх врахування дає змогу точніше моделювати роботу ФЕС. Важливою вимогою є забезпечення належної якості електроенергії, що передається в мережу, згідно з відповідними стандартами.

12. Створення ефективних сонячних електростанцій вимагає системного підходу з урахуванням усіх аспектів - від особливостей генерації до перетворення та узгодження електроенергії з мережею.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / [П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017 - 48 с.
4. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.
5. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
6. Hsieh, Y.C.; Chen, M.R.; Cheng, H.L. An interleaved flyback converter featured with zero-voltage transition. IEEE Trans. Power Electron. 2011, 26, 79–84.
7. В.Я. Жуйков, Л.М. Лук'яненко, Д.А. Миколаєць, К.С. Осипенко, А.О. Стелюк, Т.О. Терещенко, Ю.С. Ямненко. Підвищення ефективності систем з відновлюваними джерелами енергії: монографія. Київ: Кафедра,

2018

8. Melnyk R. Method of optimizing the parameters of the photovoltaic solar power plant / Medykovsky M., Melnyk R. // Computer Science and Information Technologies XIV International Scientific and Technical Conference.— м. Львів, Україна.— 17-20 вересня 2019 року: тези конференції. Львів. 2019.— с. 72-75.

9. Технічні характеристики сонячних панелей Longi Solar LR – 60 HPH 350H . Режим доступу:[https://ecoenergie.com.ua/wpcontent/uploads/2019/09/ Longi - Solar - LR4-60HPH-RU-1.pdf](https://ecoenergie.com.ua/wpcontent/uploads/2019/09/Longi-Solar-LR4-60HPH-RU-1.pdf) .

10. Мельник Р. В. Аналіз алгоритмів оцінювання ефективності сонячних електростанцій / Мельник Р. В. // 10 Міжнародна науково практична конференція «Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні».— м. Львів, Україна.— 4-5 квітня 2019 року.

11. Медиковський М.О. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумулюючих елементів / Медиковський М.О., Кравчишин В.С., Мельник Р.В., Шуневич О.Б. // Науковий вісник НЛТУ України, 2016.— т. 26, № 7 .— с. 291 – 298

12. Grigorash O.V., Pugachev Ju.G., Voencov D.V., Chesovskoj A.S. Vozobnovljaemye istochniki jelektroenergii: sostojanie i perspektivy // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2007. – № 8. – S. 24–25.

13. Медиковський М. О. Інформаційна технологія моделювання енергодинамічних режимів вітрової електричної станції за наявності акумулюючого елемента / Медиковський М. О., Мельник Р. В. // Fundamental and applied research in the modern world. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Boston, USA. 2021, pp. 466-471

14. Yusivar, F.; Farabi, M.Y.; Suryadiningrat, R.; Ananduta, W.W.; Syaifudin, Y. Buck-converter photovoltaic simulator. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* 2011, 2, 156–167. [CrossRef]
- 15.
16. Grigorash O.V., Novokreshhenov O.V., Hamula A.A., Shhalahov R.S. *Statische preobrazovateli jelektroenergii.* – Krasnodar. – 2006. – 264 s.
17. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N., Tel'nov G.V. *Jelektricheskie apparaty nizkogo naprjazhenija.* – Krasnodar: KubGAU. – 2000. – 313 s.
18. Grigorash O.V., Dacko A.V., Melehov S.V. K voprosu jelektromagnitnoj sovместimosti uzlov sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija // *Promyshlennaja jenergetika.* – 2001. – № 2. – S. 44–47.
19. Dmitri, V.; Indrek, R. Quasi-Z-Source-Based Isolated DC/DC Converters for Distributed Power Generation. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, 58, 192–201.
20. Dick, C.P.; Titiz, F.K.; De Doncker, R.W. A high-efficient LLC series- parallel resonant converter. In *Proceedings of the Conference on IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA, USA, 21–25 February 2010*; pp. 696–701.
21. Liang, Z.; Guo, R.; Li, J.; Huang, A.Q. A High-Efficiency PV Module-Integrated DC/DC Converter for PV Energy Harvest in FREEDM Systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2011, 26, 897–909.