

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
" ____ " _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
"Дослідження параметрів якості електроенергії в
системах електропостачання з сонячними
електростанціями"

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Ігор ЛАГНО
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____ 2024 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.

«___» _____ 2024 р.

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

Лагна Ігора Вікторовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження параметрів якості електроенергії в системах електропостачання з сонячними електростанціями
Study of power quality parameters in power supply systems with solar power plants

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 01.12.2024 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є аналіз та дослідження параметрів якості електроенергії в промислових системах електропостачання з сонячними електростанціями. Завдання роботи: 1. Розробка цифрової симуляційної моделі за допомогою середовища Matlab/Simulink для всебічного дослідження функціонування електромережі при різноманітних експлуатаційних режимах. 2. Проведення комплексного дослідження щодо впливу фотоелектричних станцій на параметри якості електропостачання та загальну стабільність роботи енергосистеми.

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
1	<i>Вступ</i>	<i>4.10.2024</i>	
2	<i>Аналіз сучасних тенденцій розвитку сонячної енергетики України</i>	<i>12.10.2024</i>	
3	<i>Аналіз експлуатаційних режимів та електромагнітної взаємодії сонячної електростанції з системою електропостачання</i>	<i>21.10.2024</i>	
4	<i>Комп'ютерне моделювання режимів роботи сонячної електростанції з метою визначення їх впливу на рівні показників якості електроенергії</i>	<i>05.11. 2024</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>18.11. 2024</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>23.11. 2024</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>25.11. 2024</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11. 2024</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Лагно І. В. Дослідження параметрів якості електроенергії в системах електропостачання з сонячними електростанціями

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2024 р.

Метою роботи є аналіз та дослідження параметрів якості електроенергії в промислових системах електропостачання з сонячними електростанціями

Дослідження було зосереджено на комплексному вивченні впливу сонячних електростанцій на параметри електроенергії. Пріоритетними напрямками аналізу стали характеристики функціонування геліоелектричних комплексів у відокремленому та мережевому режимах, оцінка їхньої експлуатаційної ефективності та виявлення ключових факторів, що позначаються на показниках електропостачання.

У процесі реалізації дослідницьких завдань здійснено комплексне узагальнення та критичний аналіз науково-технічної літератури. Методологія включала імітаційне моделювання за допомогою програмних комплексів Matlab/Simulink, застосування математичних підходів теоретичного та експериментального аналізу, статистичну обробку отриманих даних.

Ключові слова: сонячна електростанція, комп'ютерне моделювання, якість електроенергії, активний силовий фільтр.

THE SUMMARY

Lahno I.V. Study of power quality parameters in power supply systems with solar power plants

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the work is to analyze and study the parameters of electricity quality in industrial power supply systems with solar power plants

The study was focused on a comprehensive study of the impact of solar power plants on electricity parameters. The priority areas of analysis were the characteristics of the functioning of solar power complexes in isolated and network modes, the assessment of their operational efficiency and the identification of key factors affecting electricity supply indicators.

In the process of implementing the research tasks, a comprehensive generalization and critical analysis of scientific and technical literature was carried out. The methodology included simulation modeling using Matlab/Simulink software packages, the application of mathematical approaches to theoretical and experimental analysis, and statistical processing of the obtained data.

Keywords: solar power plant, computer modeling, electricity quality, active power filter.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ	11
1.1 Загальна характеристика сучасного стану альтернативної енергетики України	11
1.2 Дослідження потенціалу сонячної енергії в регіонах України	14
1.3 Аналіз досліджень з питання використання СЕС.....	17
Висновки до розділу	20
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	21
2.1 Аналітичне дослідження перехідних режимів при синхронній роботі енергомережі та сонячної електростанції.....	21
2.2 Математичне моделювання інвертора у двохфазній системі координат	26
2.3 Дослідження впливу інверторів СЕС на рівні показників якості електроенергії.....	28
2.4 Математична модель сонячного інвертора	36
2.4.1. Моделювання режимів роботи сонячного інвертора	37
2.4.2. Теоретичне дослідження трифазних інверторів	38
2.4.3. Математична модель силового ключа	45
2.4.4. Теоретичне дослідження режимів роботи сонячного інвертора.....	50
Висновки до розділу	53
РОЗДІЛ 3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ВПЛИВУ НА РІВНІ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	54
3.1 Комп'ютерна модель інвертора в залежному і провідному режимах	54
3.1.1. Комп'ютерне моделювання акумуляторної батареї.....	60
3.1.2. Комп'ютерне моделювання трифазного інвертора	61
3.1.3. Комп'ютерне моделювання електричного навантаження	71
3.2 Комп'ютерне моделювання СЕС в режимі активного фільтру мережі.....	72
3.2.1. Визначення параметрів активного силового фільтру	76
3.2.2. Система автоматичного керування СЕС в режимі активного фільтру.....	77

3.2.3. Розрахунок параметрів конденсатора	84
3.3 Аналіз результатів комп'ютерного імітаційного моделювання	
мережі з СЕС	85
3.3.1. Підтримка рівня напруги в залежному режимі.....	86
3.3.2. Підтримка рівня напруги в ведучому режимі	87
3.3.3. Підтримка рівня напруги в процесі переходу від режиму провідного в режим залежного	89
3.3.4. Результати комп'ютерного моделювання та порівняльний аналіз засобів з покращення якості електроенергії.....	92
Висновки до розділу	96
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	98
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	102

ВСТУП

Актуальність роботи. Використання енергії сонця представляє собою один з найперспективніших напрямків у сфері відновлюваних джерел енергії, який демонструє вражаючу динаміку розвитку в українському енергетичному секторі з початку 2000-х років. За цей період встановлена потужність сонячних електростанцій в Україні зросла з кількох мегават до кількох гігават, що свідчить про значний прогрес галузі.

Однак стрімка інтеграція об'єктів сонячної генерації до традиційної енергосистеми призводить до виникнення комплексу технічних та операційних складнощів. Серед них - необхідність балансування потужності через непостійний характер генерації, забезпечення стійкості мережі при значних коливаннях напруги, а також потреба в модернізації застарілої інфраструктури передачі електроенергії. Вирішення цих викликів вимагає впровадження інноваційних технологічних рішень, зокрема, систем накопичення енергії, розумних мереж (Smart Grid), та вдосконалених методів прогнозування генерації.

Важливим аспектом також є необхідність адаптації нормативно-правової бази та створення економічних механізмів, які б стимулювали подальший розвиток галузі при збереженні стабільності енергосистеми. Це включає розробку нових тарифних моделей, механізмів підтримки інвестицій у модернізацію мереж та впровадження сучасних систем управління енергетичними потоками.

Інтенсивне впровадження сучасних напівпровідникових технологій та силової електроніки в енергетичній інфраструктурі має певні негативні наслідки. Зростання енергетичних втрат у системі є одним із головних викликів, що безпосередньо впливає на економічну ефективність електропостачання. Крім того, робота потужних напівпровідникових перетворювачів супроводжується генерацією значної кількості гармонічних складових струму та напруги різних порядків, які суттєво погіршують якісні

показники електроенергії.

Спотворення синусоїдальної форми напруги та струму призводить до додаткового нагріву електрообладнання, передчасного старіння ізоляції, виникнення резонансних явищ у мережі та збоїв у роботі чутливої електронної апаратури. Особливо гостро ця проблема проявляється в мережах з великою кількістю відновлюваних джерел енергії, де широко використовуються інвертори та перетворювачі частоти.

Для підтримання належного рівня якості електроенергії відповідно до міжнародних стандартів (зокрема, EN 50160 та IEEE 519) та забезпечення надійного функціонування української енергосистеми, необхідно впроваджувати комплексні рішення. Це включає встановлення активних та пасивних фільтрів гармонік, застосування сучасних алгоритмів керування перетворювачами, впровадження систем моніторингу якості електроенергії та превентивної діагностики обладнання.

Своєчасна модернізація енергетичної інфраструктури та впровадження інноваційних технологій компенсації гармонічних спотворень є критично важливими для забезпечення стабільного розвитку енергетичного сектору України в умовах стрімкого зростання частки відновлюваних джерел енергії та збільшення кількості нелінійних навантажень у мережі.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є аналіз та дослідження параметрів якості електроенергії в промислових системах електропостачання з сонячними електростанціями

Досягнення поставленої мети потребує виконання таких ключових задач:

1. Розробка цифрової симуляційної моделі за допомогою середовища Matlab/Simulink для всебічного дослідження функціонування електромережі при різноманітних експлуатаційних режимах;

2. Проведення комплексного дослідження щодо впливу фотоелектричних станцій на параметри якості електропостачання та загальну стабільність роботи енергосистеми.

Об'єкт дослідження – електромагнітні явища та процеси, які виникають під час експлуатації сонячних електростанцій в системах електропостачання.

Предмет дослідження – процес зміни рівнів показників якості електроенергії під впливом роботи сонячних електростанцій

Методи досліджень У процесі виконання дослідницької роботи застосовано цифрову симуляцію з використанням програмного забезпечення MatLab. Для опрацювання експериментальних даних, отриманих під час моделювання, було залучено комп'ютерні методи аналізу та інші сучасні інструменти обчислювальної техніки.

Наукова цінність дослідження визначається розробленим теоретичним підґрунтям щодо ефективності інтеграції фотоелектричних станцій до загальної електромережі. Особлива увага приділяється їх функціонуванню як активних фільтрувальних елементів завдяки впровадженню новітніх інверторних технологій.

Практична цінність дослідження реалізується через встановлення позитивного ефекту від впровадження фотоелектричних генеруючих об'єктів. Зокрема, продемонстровано їхню здатність покращувати параметри якості електроенергії та підвищувати загальну надійність функціонування енергетичної системи.

Структура роботи: Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 103 сторінки. Основна частина викладена на 96 сторінках друкованого тексту, містить 71 рисунок. Список використаних джерел містить 17 джерел та викладений на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

1.1 Загальна характеристика сучасного стану альтернативної енергетики України

Серед усіх видів альтернативних джерел енергії особливе місце посідає використання сонячного випромінювання. Стрімке зростання потужностей та інвестицій у фотогенеруючі технології демонструє їх величезний потенціал для світової енергетики. В Україні, завдяки сприятливим кліматичним умовам та державній підтримці, сектор сонячної генерації показує вражаючу динаміку розвитку.

Динаміка розвитку української геліоенергетики вражає своїми темпами: статистика демонструє, що кожні 48 годин на території країни починає функціонувати нова промислова сонячна електростанція. Паралельно з цим, щодня близько десятка приватних домогосподарств встановлюють власні фотоелектричні системи, що свідчить про зростаючу популярність автономного енергозабезпечення серед населення.

У 2019 році Україна увійшла до десятки провідних країн світу за швидкістю розвитку відновлюваної енергетики. Вже у 2020-му країна посіла місце серед п'яти лідерів у Європі за темпами розширення сонячної енергетики. На початок 2022 року загальна встановлена потужність об'єктів зеленої енергетики досягла 9 656 МВт.

Динаміка розвитку приватної сонячної енергетики в Україні демонструє вражаюче зростання. Порівняно з 2017 роком, коли домогосподарства згенерували лише 34 МВт, показники 2021 року сягнули понад 400 МВт, що свідчить про більш ніж десятикратне збільшення потужності. Лідерами у впровадженні сонячних технологій стали Дніпропетровська та Закарпатська області, на території яких було

реалізовано 50% всіх нових проєктів приватних сонячних електростанцій у 2021 році. Відповідно до офіційної статистики енергетичного регулятора, загальний потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні до завершення 2021 року становив 8451 МВт.

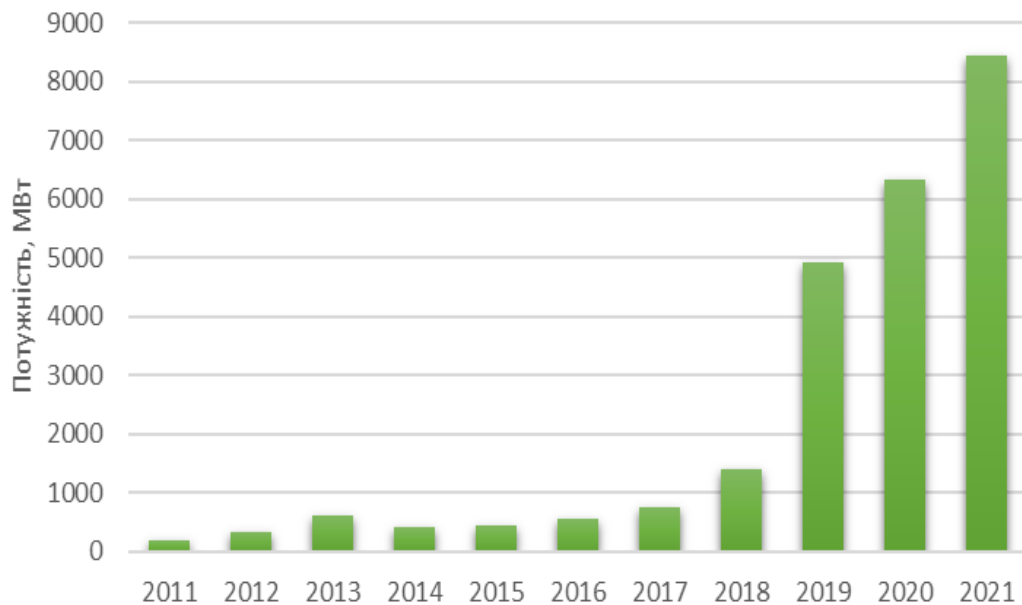


Рис.1.1 Динаміка розгортання потужностей ВДЕ по роках

Загальна потужність нових вітроелектростанцій сягнула 359 МВт, що суттєво перевищило попередні показники: у 2,5 рази більше порівняно з 2020 роком (144 МВт) та на 20% більше за обсяг введених сонячних потужностей (286 МВт). У 2020 році спостерігався вражаючий приріст потужностей сонячних електростанцій - було введено 1102 МВт, що майже у восьмикратному розмірі перевищило тогочасні показники вітроенергетики. Проте 2021 рік показав кардинально іншу картину: приріст потужностей СЕС склав лише чверть від попереднього року (286 МВт).

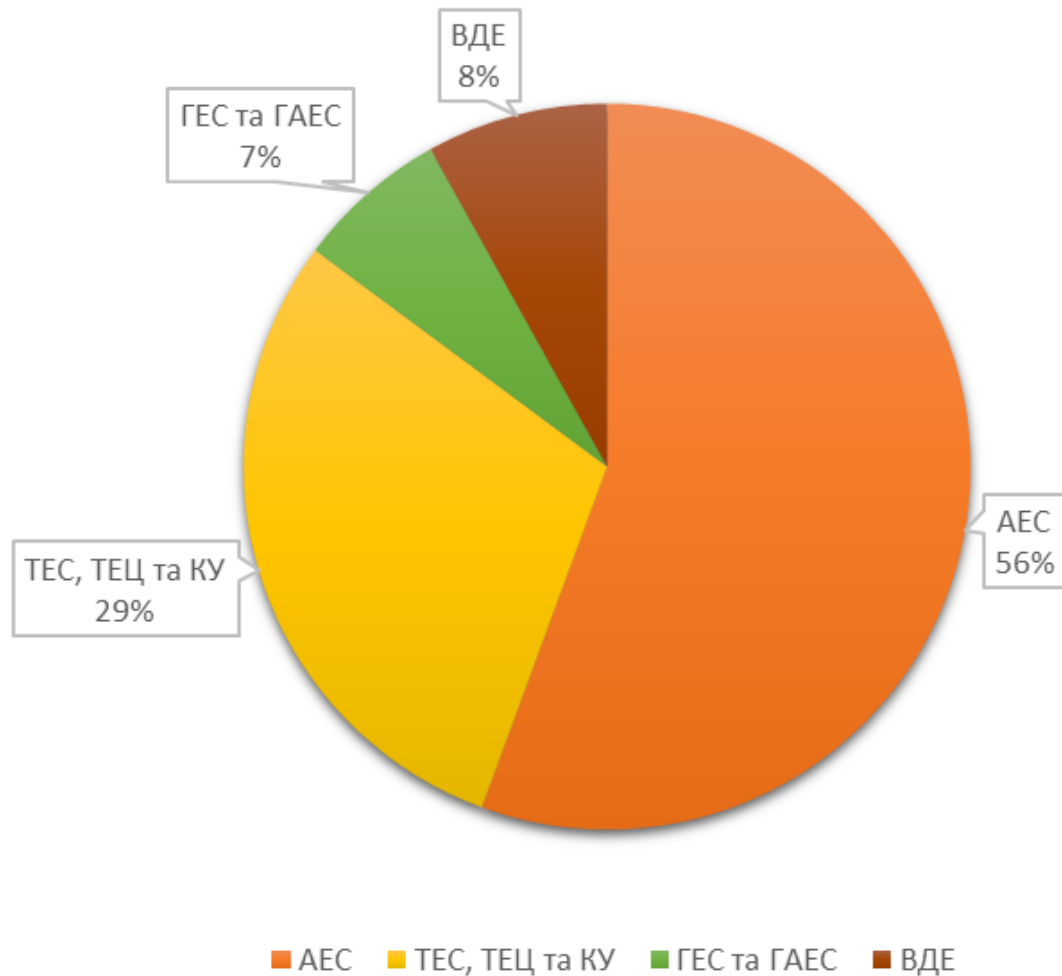


Рис.1.2 Розподіл генерації електроенергії в об'єднаній енергосистемі України (станом на 2021 рік)

Генерація екологічно чистої електроенергії в Україні продемонструвала значний прогрес - об'єкти відновлюваної енергетики, включаючи вітрові, сонячні та біоенергетичні установки, виробили 12,52 мільярда кіловат-годин електроенергії. Це перевищило показники попереднього року на 15,3%.

Аналізуючи успішні практики розгортання фотовольтаїчних систем у європейських державах з аналогічними показниками інсоляції, та враховуючи глобальні тренди здешевлення спорудження сонячних електростанцій завдяки технологічному прогресу, Україна має значний потенціал для збільшення генерації "зеленої" електроенергії. Модернізація наявного обладнання, впровадження інноваційних рішень та будівництво

додаткових потужностей дозволить істотно збільшити частку сонячної енергетики в енергетичному балансі країни.



Рис. 1.3 Розподіл альтернативної енергетики у енергосистемах різних країн

1.2 Дослідження потенціалу сонячної енергії в регіонах України

Південні області країни, що характеризуються підвищеною інсоляцією, стали центрами розвитку геліоенергетики, що чітко відображено на картографічних даних (рис.1.4).

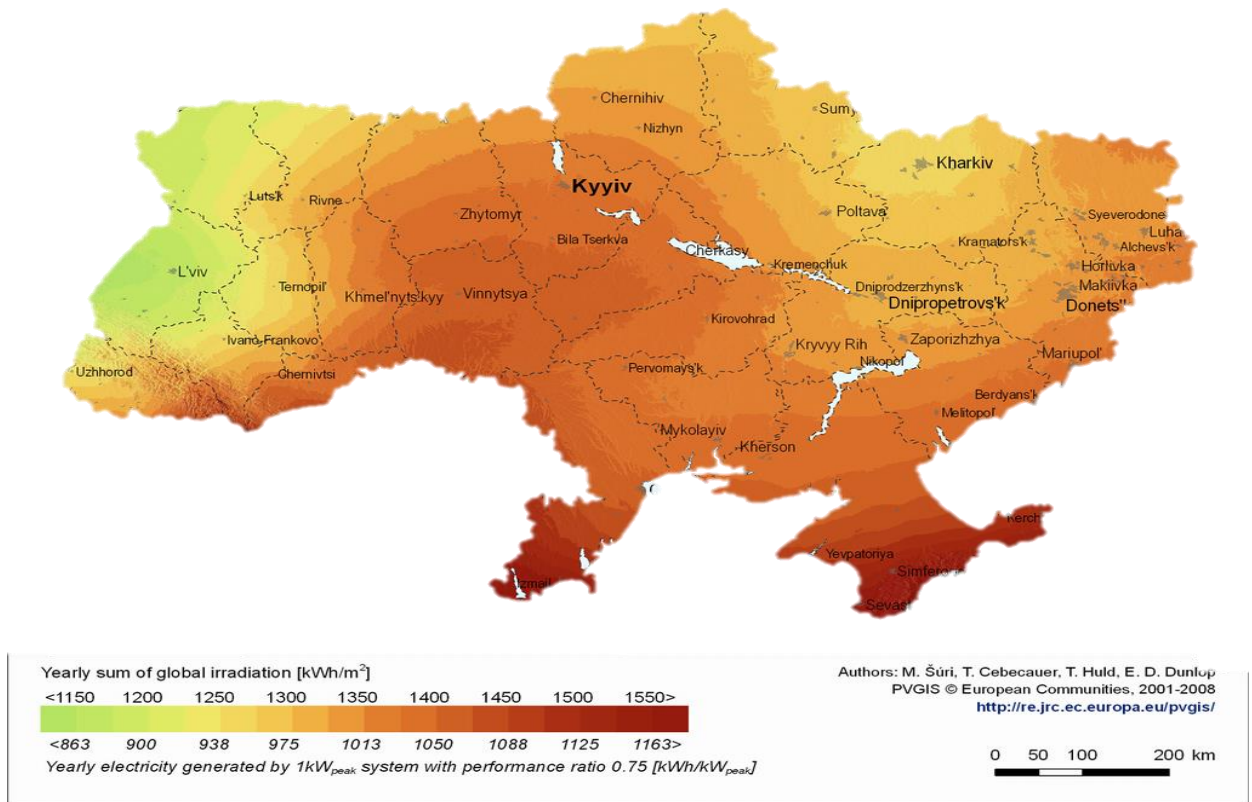


Рис. 1.4. Візуалізація рівнів сонячного випромінювання в різних регіонах України

Сонячна карта дозволяє визначити потенціал сонячного випромінювання, яке досягає земної поверхні у вашому регіоні. Ефективність використання сонячних технологій зростає при русі на південь України - від Полісся до Причорномор'я. Південні області, такі як Одеська, Херсонська, Миколаївська та Запорізька, мають найвищий потенціал для встановлення фотоелектричних панелей та термальних колекторів.

Розподіл сонячного випромінювання на території України характеризується помітною неоднорідністю. Сонячний потенціал варіюється від мінімальних значень 1150 кВтгод/м² щорічно у північних областях до максимальних показників 1550 кВтгод/м² на південних територіях. Географічне розташування Києва забезпечує столиці середні показники інсоляції для України - приблизно 1350 кВт*год/м² на рік.

Найбільша концентрація сонячного потенціалу, придатного для економічно вигідного використання, зосереджена у південному регіоні України. Шість областей - Одеська, Миколаївська, Херсонська, Кіровоградська, Запорізька та Дніпропетровська - разом акумулюють майже третину (30,3%) загальнодержавного потенціалу сонячної енергії, який доцільно використовувати з економічної точки зору.

За офіційними розрахунками Державного агентства з енергоефективності, загальний теоретичний потенціал сонячного випромінювання в Україні сягає вражаючої цифри - понад 730 мільярдів кіловат-годин щорічно. Однак реальний технічний потенціал, який можливо ефективно використовувати з урахуванням сучасних технологічних обмежень, становить 34,2 мільярди кВт-год на рік. Розвиток альтернативної енергетики в Україні суттєво стримується недосконалістю наявної електромережевої інфраструктури та її застарілою архітектурою, орієнтованою на централізоване енергопостачання.

Згідно з дослідженнями фахівців Rentechno48, сучасний рівень розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) дозволяє забезпечити близько чотирьох п'ятих енергетичних потреб України. Аналітики прогнозують, що до середини XXI століття майже половина приватних будинків у країні матиме встановлені фотоелектричні системи на дахах. Економічна доцільність впровадження геліотермальних систем для підігріву води демонструє стабільне зростання. За розрахунками, такі установки можуть задовольнити потреби індивідуальних господарств у гарячому водопостачанні практично повністю протягом теплого сезону, тоді як у зимовий період забезпечать близько шостої частини необхідного об'єму. Комерційний сектор, хоча й має дещо обмеженіші можливості для застосування сонячних технологій, все ж демонструє значний потенціал для їх впровадження.

1.3 Аналіз досліджень з питання використання СЕС

Впровадження сонячних електростанцій до наявних електромереж, у поєднанні з масовим використанням силових електронних компонентів, суттєво впливає на характеристики енергетичних процесів. Це спричиняє трансформацію енергетичного балансу, генерацію небажаних спотворень потужності, коливання напруги та загальне зниження параметрів якості електропостачання.

При проєктуванні систем електропостачання варто враховувати високу чутливість інверторного обладнання СЕС до коливань напруги мережі. Неправильне підключення, з урахуванням специфіки електромережі, її хвильових характеристик та технічного стану наявного устаткування, може порушити стабільність синхронної роботи традиційної енергосистеми із сонячною електростанцією. Особливо критичним фактором виступає співвідношення потужностей взаємодіючих енергетичних систем.

Українські сонячні електростанції оснащуються високопродуктивними перетворювачами електроенергії від провідних глобальних виробників. Зокрема, на об'єкті дослідження, що під'єднаний до підстанційних шин напругою 10 кВ, функціонують інвертори компанії Huawei, чиї технічні параметри наведені на рис. 1.5.

Інвертор моделі SUN2000 представляє собою трифазний перетворювач, призначений для роботи з мережею, який здійснює конвертацію постійного струму від фотоелектричних масивів у змінний струм промислової частоти для подальшої передачі в енергосистему.

Технічні характеристики	SUN2000-60KTL-MO
	Ефективність
Макс. ефективність	98.9% @ 480 В, 98.6% @ 400 В
EU ефективність	98.7% @ 480 В, 98.5% @ 400 В
	DC контур
Макс. допустима напруга DC	1,100 В
Макс. сила струму на кожен MPPT	22 А
Макс. струм КЗ на кожен MPPT	30 А
Стартова напруга	200 В
Робочий діапазон MPPT	200 В ~ 1,000 В
Номінальна напруга DC	720 В / 480 В, 600 В / 400 В
Макс. кількість вводів	12
Кількість MPP трекерів	6
	АС контур
Номінальна активна потужність	60,000 Вт
Макс. повна потужність АС	66,000 ВА
Макс. активна потужність АС (cosφ=1)	66,000 Вт
Номінальна напруга АС	480 В, 3W+PE; 220 В / 380 В, 230 В / 400 В, за замовчуванням 3W+N+PE, 3W+PE опція
Номінальний струм АС	72.2 А @ 480 В, 86.7 А @ 400 В
Номінальна частота АС	50 Гц / 60 Гц
Макс. струм АС	79.4 А @ 480 В, 95.3А @ 400 В
Діапазон регулювання cosφ	0.8 LG ... 0.8 LD
Макс. коефіцієнт нелінійних викривлень	< 3%
	Захист
DC вимикач	В комплекті
Захист від секціонування	В комплекті
DC захист від невірної полярності	В комплекті
Моніторинг PV-стрінгів	В комплекті
ОПН по стороні DC	ТИП II
ОПН по стороні АС	ТИП II
Контроль ізоляції	В комплекті
Пристрій захистного відключення	В комплекті
	Комунікація
Дисплей	LED індикатори, Bluetooth + APP
RS485	В комплекті
USB	В комплекті
PLC (Комунікація по АС кабелю)	В комплекті
	Загальні
Розмір (Д×В×Ш)	1075 x 555 x 300 мм (42.3 x 21.9 x 11.8 дюймів)
Вага	73 кг (161 фунти)
Температура експлуатації	-25°C ~ 60°C (-13°F ~ 140°F)
Тип системи охолодження	Натуральна конвекція
Мах. висота експлуатації	4,000 м (13,123 фт.)
Допустима відносна вологість	0~100%
DC конектор	Amphenol Helios H4
АС конектор	Водонепроникний термінал PG + ОТ Конектор
Захист	IP65
Топологія	Без трансформатора

Рис. 1.5. Технічні характеристики інвертора Huawei SUN2000

В роботі проводились дослідження СЕС двох типів:

- промислові сонячні станції, що під'єднуються до загальної електромережі, характеризуються високою потужністю генерації. Основна частка виробленої ними електроенергії спрямовується до централізованої системи електропостачання через спеціальний прилад обліку. При цьому обсяг енергії, що витрачається на власні потреби таких установок, залишається мінімальним;
- незалежні сонячні електростанції проєктуються передусім для забезпечення енергетичних потреб власника. Їхня розрахункова потужність є меншою, оскільки визначається специфікою та кількістю наявних

електроспоживачів. Хоча такі установки також мають з'єднання із зовнішньою електромережею, вони передають до неї виключно надлишкову енергію, облік якої ведеться окремим вимірювальним пристроєм.

Сонячна електростанція, що має підключення до загальної електромережі, демонструє кращу економічну ефективність, оскільки власнику не потрібно інвестувати у дорогі акумуляторні системи зберігання енергії. Для оптимізації роботи фотоелектричних систем впроваджують спеціальний контролер з функцією MPPT (Maximum Power Point Tracking), який забезпечує динамічний пошук оптимальної робочої точки сонячних панелей. Цей алгоритм постійно аналізує вольт-амперні характеристики та автоматично коригує електричні параметри системи для максимально ефективного перетворення сонячної енергії в електричну.

При інтеграції фотоелектричних систем до загальної електромережі, багаторівневі перетворювачі виконують комплекс критично важливих функцій. Першочерговим завданням є генерація якісної синусоїдальної напруги та струму, які повинні точно синхронізуватися з параметрами мережі для ефективної передачі енергії.

Серед головних обмежень ізольованих фотоелектричних систем виділяється обов'язкове застосування систем накопичення енергії. Експлуатація свинцево-кислотних накопичувачів у режимі регулярного заряду-розряду суттєво скорочує термін їх служби. Враховуючи обмежений ресурс таких акумуляторів, який складає від 1500 до 2000 циклів, виникає потреба у їх періодичній заміні, що значно збільшує експлуатаційні витрати. Впровадження довговічних промислових систем накопичення енергії, таких як нікель-кадмієві або літій-іонні акумулятори, суттєво збільшує початкові капіталовкладення у фотоелектричну станцію. Важливо враховувати, що навіть високотехнологічні накопичувачі мають обмежену енергоефективність – близько 90% при циклах заряду-розряду, причому цей показник поступово знижується протягом експлуатації.

Висновки до розділу

Інтеграція сонячних електростанцій (СЕС) та інших альтернативних джерел енергії в сучасні системи електропостачання разом із активним впровадженням пристроїв силової напівпровідникової електроніки суттєво впливає на процеси енергообміну і перехідні процеси в мережі. Це, у свою чергу, змінює баланс електроенергії, спричиняє появу пульсацій, спотворень та інших небажаних явищ, а також впливає на параметри напруги, що призводить до погіршення якості електроенергії.

У дослідженні було розглянуто два типи сонячних електростанцій:

- мережеві СЕС – вони мають значно більшу потужність і підключаються до загальної електричної мережі. Майже вся вироблена енергія передається в мережу за допомогою спеціального двонапрявного лічильника, а власне споживання таких систем є мінімальним. Ці установки орієнтовані на забезпечення централізованого електропостачання та сприяють зниженню залежності від традиційних джерел енергії;

- автономні СЕС – такі станції розробляються насамперед для задоволення потреб власного енергоспоживання. Вони мають меншу потужність, яка визначається кількістю і типом використовуваних електроприладів. Хоча автономні системи здатні підключатися до зовнішньої мережі, надлишки виробленої енергії передаються до неї через окремий лічильник. Цей тип СЕС є ідеальним для приватних будинків і підприємств, що прагнуть до енергетичної незалежності.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Аналітичне дослідження перехідних режимів при синхронній роботі енергомережі та сонячної електростанції

Сучасний енергетичний сектор зазнає значних трансформацій завдяки стрімкому розвитку альтернативних джерел енергії (ВДЕ). Особливо помітним є прогрес у галузі сонячної енергетики, де впровадження інноваційних фотоелектричних модулів (ФЕМ) докорінно змінює принципи генерації електроенергії. Технологічний прорив у створенні сонячних електростанцій (СЕС) дозволяє досягати все вищих показників ефективності перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію.

Інтеграція сонячних електростанцій у традиційну енергетичну систему створює значні переваги для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів. Синхронна робота СЕС з основною електромережею формує додатковий рівень резервування потужності та підвищує стійкість всієї енергосистеми до можливих збоїв.

Ключовим елементом сонячної електростанції виступає комплексний перетворювальний пристрій. До його складу входить DC/DC конвертер, що забезпечує підвищення напруги з початкових 200 В до робочих 700 В. Невід'ємною частиною системи є трифазний інверторний міст на базі сучасних IGBT-транзисторних модулів, який здійснює перетворення постійного струму в змінний. Керування процесами перетворення забезпечується пропорційно-інтегральними (ПІ) регуляторами, що відповідають за стабілізацію струму та напруги. Швидкодія сучасних IGBT-транзисторних модулів характеризується періодом комутації в межах декількох мілісекунд, що створює оптимальні умови для реалізації широтно-

імпульсного модулювання (ШІМ). Такі часові характеристики перемикання забезпечують формування якісної синусоїдальної напруги на вихідних клеммах інверторного пристрою.

Серед ключових функцій, які реалізують трифазні інверторні пристрої, можна виділити:

- перетворення постійної напруги в симетричну трифазну систему змінних напруг із стабільною частотою (зазвичай 50 або 60 Гц) та амплітудою;
- забезпечення синхронізації вихідної напруги з параметрами електричної мережі, що особливо важливо для мережевих сонячних електростанцій;
- можливість роботи в режимі стабілізації напруги та компенсації реактивної потужності для покращення якості електропостачання;
- реалізація захисних функцій.

Процеси перемикання силових тиристорів та транзисторів у перетворювальних пристроях спричиняють спотворення синусоїдальної форми струмів і напруг електромережі. Внаслідок цього виникають вищі гармонічні складові, які негативно впливають на роботу електрообладнання.

Якісні характеристики електричної енергії визначаються комплексом параметрів, які відображають відхилення напруги та частоти від встановлених нормативних значень. В українській електроенергетиці нормування якості електричної енергії для точок приєднання споживачів до мереж загального призначення трифазного змінного струму (50 Гц) регламентується національним стандартом України ДСТУ EN 50160:2014, ідентичний європейському стандарту EN 50160:2010, який набрав чинність з 01.10.2014 року;

Дотримання вимог встановлених нормативів має обов'язковий характер, що зумовлює необхідність проведення детального аналізу впливу фотовольтаїчних установок на параметри якості електроенергії у розподільчій мережі.

Функціонування фотоелектричних станцій супроводжується зростанням рівня гармонічних складових, що негативно впливає на якість електроенергії в мережі. Це явище спричиняє підвищення як загального коефіцієнта викривлення синусоїдальної форми напруги (THD), так і окремих показників гармонічних компонентів. Моніторинг та підтримання нормативних значень показників якості електричної енергії (ПЯЕ) у мережах із фотоелектричними станціями є критично важливим завданням

Інтеграція фотовольтаїчної генеруючої установки у загальну електромережу спричиняє різноманітні ефекти на функціонування та надійність електроенергетичної системи, через яку відбувається транспортування виробленої енергії. Межа надійного функціонування електроенергетичної системи характеризується коефіцієнтом запасу статичної стійкості, який відображає віддаленість поточних параметрів режиму від критичних значень. Запас статичної стійкості характеризується коефіцієнтами запасу по активній потужності в перетинах енергосистеми і за напругою у вузлах навантаження. Розрахунок величини запасу активної потужності в контрольованому перетині енергосистеми здійснюється шляхом обчислення відповідного коефіцієнта:

$$K_P = \frac{P_{\text{ПР}} - P - \Delta P}{P}, \quad (2.2)$$

Процес розрахунку коефіцієнта запасу статичної стійкості для активної потужності у визначеному перетині передбачає покрокове моделювання навантаження. При цьому здійснюється поступове нарощування потоку потужності через досліджуваний перетин до моменту досягнення критичних значень, які відповідають межі стійкості системи.

Математичне обчислення показника запасу напруги в точках приєднання споживачів (вузлах навантаження) є важливим аспектом оцінки

стійкості енергосистеми. Цей параметр розраховується як співвідношення між фактичним та критичним рівнями напруги у конкретному вузлі:

$$K_U = \frac{U - U_{кр}}{U}, \quad (2.3)$$

У процесі експлуатації енергетичного обладнання здійснюється постійний контроль рівнів напруги у різних точках мережі для забезпечення нормативних запасів.

Для забезпечення надійного функціонування енергетичних систем встановлюються нормативні показники статичної стійкості. Ключовими параметрами є два типи коефіцієнтів: перший регламентує резерв активної потужності у критичних перетинах мережі, другий визначає необхідний запас напруги у точках приєднання споживачів.

Дослідження параметрів статичної стійкості при інтеграції фотоелектричної станції до електроенергетичної системи проведемо на базі електричної схеми, зображеної на рисунку 2.1.

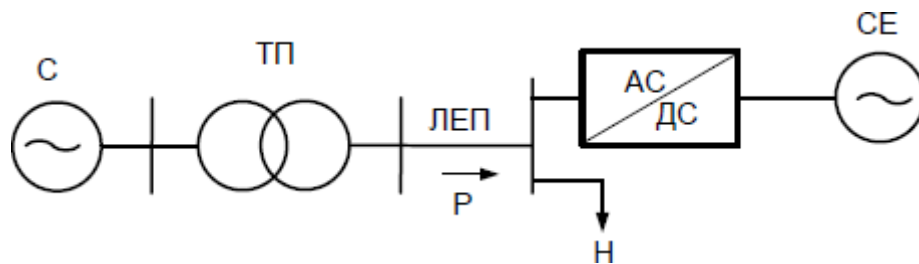


Рис. 2.1. Схема приєднання СЕС до мережі

Ключовим елементом аналізу виступає лінія електропередачі, яка формує перетин між генеруючим об'єктом та енергосистемою.

Інтеграція фотоелектричної станції в енергосистему призводить до перерозподілу потоків потужності. Зокрема, спостерігається зниження величини потужності, яка транспортується лінією електропередачі з надлишкової зони енергосистеми до дефіцитної. Зниження перетоку

потужності по ЛЕП має позитивний вплив на стійкість системи, адже спостерігається підвищення коефіцієнта запасу статичної стійкості за активною потужністю у контрольованому перетині. Додатково, інтеграція нових генеруючих потужностей сонячної електростанції покращує загальний баланс активної потужності енергосистеми, збільшуючи доступний обертовий резерв та зміцнюючи показники статичної стійкості.

Дослідження взаємодії між сонячною електростанцією (СЕС) та енергетичною системою (ЕС) базується на вивченні електромагнітних перехідних процесів (ЕМПП), що виникають у інверторному обладнанні.

Математична модель інвертора формується на основі аналізу фізичних процесів, які відбуваються під час його роботи, і описується системою рівнянь, що відображають взаємодію електричних та магнітних полів у компонентах пристрою. У загальному вигляді основні рівняння можна подати наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_a - U_{Ca} = L_a \frac{di_a}{dt} + i_a R_a \\ U_b - U_{Cb} = L_b \frac{di_b}{dt} + i_b R_b \\ U_c - U_{Cc} = L_c \frac{di_c}{dt} + i_c R_c \\ i_p = i_{clink} + i_{CC} \\ i_{CC} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \\ i_{clink} = C_{link} \frac{dU_{CC}}{dt} , \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Величини лінійних струмів і напруг описуються наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} U_{Ca} = E_m \cos \omega t \\ U_{Cb} = E_m \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_{Cc} = E_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_a = I_m \cos(\omega t + \varphi) \\ i_b = I_m \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi \right) \\ i_c = I_m \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi \right) \end{cases} \quad (2.5)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.6)$$

Враховуючи (2.1), напруга на виході інвертора визначається згідно виразів:

$$U_{dc} \begin{bmatrix} \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Ca} \\ U_{Cb} \\ U_{Cc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2 Математичне моделювання інвертора у двофазній системі координат

Використання ортогональної двофазної системи координат, де обмотки розташовані під кутом 90 градусів одна відносно одної, суттєво спрощує математичний апарат моделювання. Відсутність магнітного зв'язку між перпендикулярними обмотками дозволяє створити більш компактну систему диференціальних рівнянь для аналізу динамічних режимів.

Аналіз динамічних режимів у симетричних трифазних системах найбільш ефективно проводити після перетворення координат у синхронну систему d-q, що обертається з кутовою швидкістю мережі.

Механізм переходу до обертової системи координат d-q включає два послідовні етапи:

$$\begin{cases} f_d = \frac{2}{3} \left[f_a \cos \gamma + f_b \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + f_c \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ f_q = \frac{2}{3} \left[f_a \sin \gamma + f_b \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + f_c \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{cases} \quad (2.8)$$

Перетворення координат у просторі наочно демонструється на рисунку 2.2:

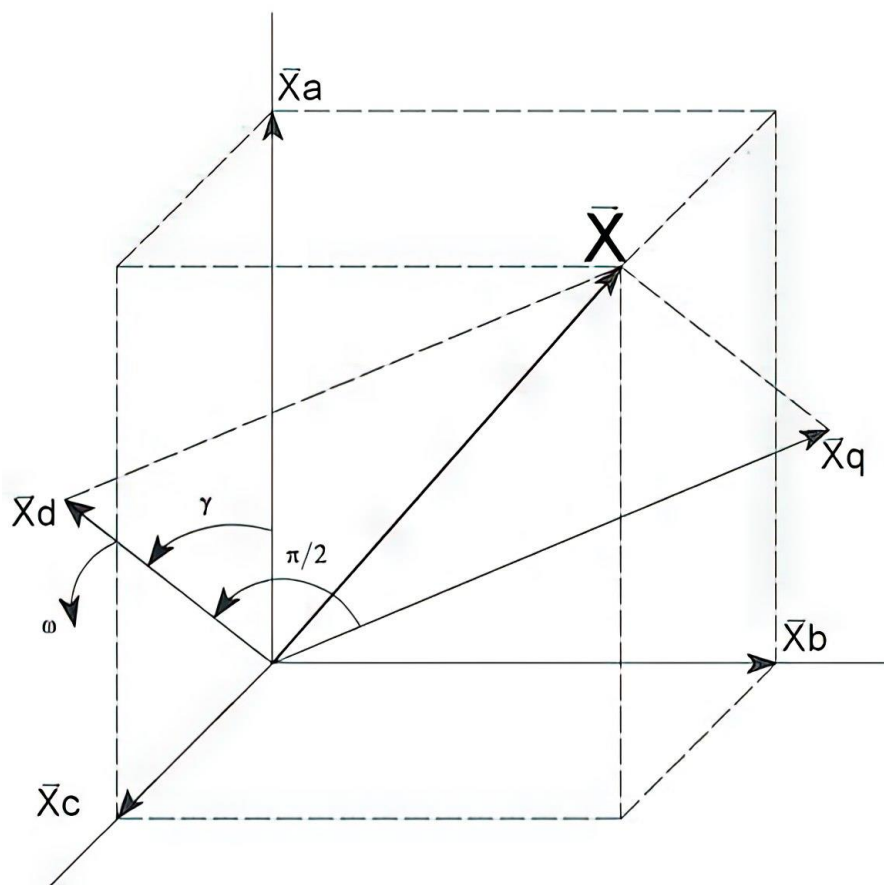


Рис. 2.2. Геометрична ілюстрація до перетворення координат

$$\begin{cases} f_A = f_d \cos \gamma + f_q \sin \gamma + f_0 \\ f_B = f_d \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + f_q \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) + f_0, \\ f_C = f_d \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) + f_q \sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) + f_0 \end{cases} \quad (2.9)$$

Математичні залежності, виражені формулами (2.4) і (2.5) прямого та зворотного перетворення, забезпечують взаємно однозначну відповідність між реальними електричними величинами трифазної системи та їх проекціями в синхронній системі координат d-q..

За допомогою перетворення Парка-Горєва та з урахуванням загальноприйнятих спрощень, динаміка електромагнітних процесів у синхронній системі координат описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + u_{sd} - \omega Li_q \\ u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + u_{sq} + \omega Li_d \end{cases}, \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{ca} \\ U_{cb} \\ U_{cc} \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

2.3 Дослідження впливу інверторів СЕС на рівні показників якості електроенергії

Інтенсивне впровадження сонячних електростанцій у розподільні мережі призводить до суттєвого погіршення якісних характеристик електроенергії. Особливо критичними є два параметри: девіація напруги на

трансформаторних підстанціях 10/0,4 кВ та зростання коефіцієнта гармонічних спотворень напруги (K_u) (рис. 2.3).

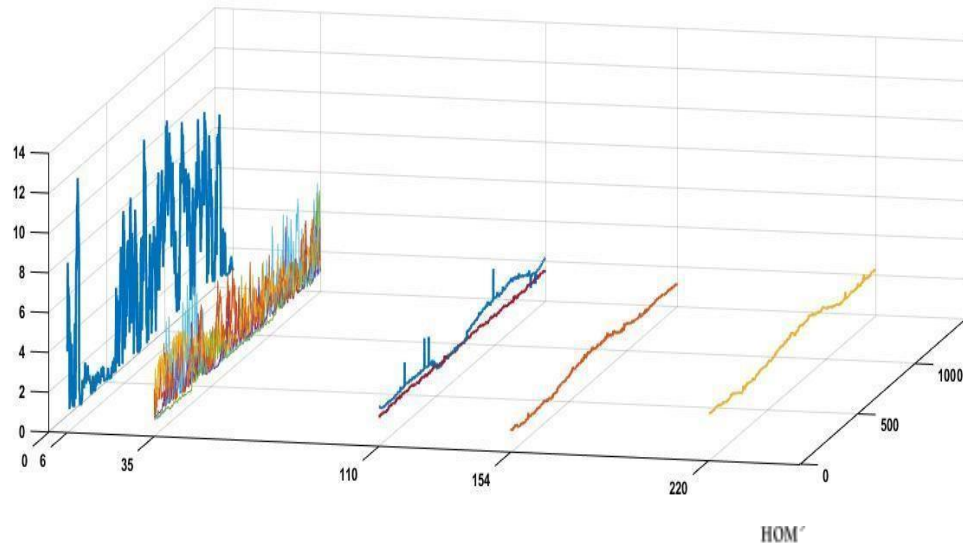


Рис. 2.3 Графік зміни коефіцієнта гармонічних спотворень напруги в первинних колах

Конструктивна структура сонячної електростанції відображена на схематичному зображенні 2.4. У складі фотоелектричної установки ключову роль відіграють наступні компоненти: масиви фотоелектричних модулів (сонячних панелей); перетворювач напруги (інвертор); комплексна трансформаторна підстанція; а також розподільчий вузол.



Рис. 2.4 Структурна схема СЕС

Ключовим компонентом сонячної електростанції виступає інверторний пристрій, який виконує низку критичних функцій. Насамперед, він здійснює конвертацію постійного струму в трифазний змінний, що необхідно для сумісності з електромережею. Інвертор також містить систему MPPT (Maximum Power Point Tracking), яка оптимізує роботу сонячних панелей шляхом постійного пошуку режиму максимальної потужності генерації. Важливою складовою є механізм PLL (Phase-Locked Loop), що забезпечує точну синхронізацію параметрів вихідної напруги з показниками загальної мережі.

В інверторах використовуються різні методи керування, серед яких можна виділити наступні:

- пропорційно-інтегральний регулятор (PI);
- пропорційно-резонансний регулятор (PR);
- прогнозуючий регулятор, також відомий як Deadbeat (DB) (див. рисунок 2.5).



Рис. 2.5 Класифікація існуючих законів автоматичного керування інвертором

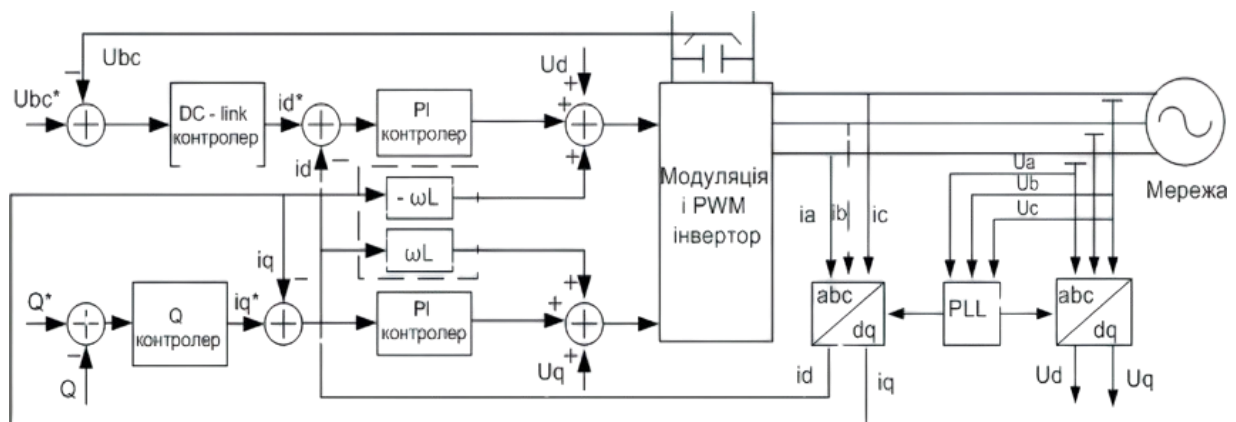
Показники якості електроенергії в електричній системі безпосередньо залежать від характеристик та режимів функціонування розосереджених джерел енергії (РДЕ), серед яких сонячні електростанції посідають важливе місце. Ключову роль у забезпеченні належної якості електропостачання відіграють силові перетворювачі – інвертори та їх системи керування.

У системах керування інверторами сонячних електростанцій (СЕС) широко застосовується пропорційно-інтегральний (PI) регулятор, який здійснює координатні перетворення електричних величин. Зокрема, відбувається трансформація параметрів із трифазної системи координат (abc) у синхронну систему координат (dq). Це перетворення, відоме як перетворення Парка, дозволяє спростити розрахунки та покращити якість регулювання.

Математична модель регулятора, що базується на PI-законі керування, описується характеристичною передатною функцією, яка визначається формулою (2.12):

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}, \quad (2.12)$$

Структурна схема ПІ-контролера інвертора СЕС приведена на рис. 2.6.



Структурна схема ПІ-контролера інвертора СЕС

Д

ля підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій постійно відбувається модернізація алгоритмів керування інверторним обладнанням. Одним із ключових напрямків вдосконалення є оптимізація програмного забезпечення контролера інвертора СЕС. Характеристична передатна функція системи з PI-регулятором, представлена в трифазній системі координат abc, визначається математичним виразом (2.13):

$$G_{PI}^{(abc)}(s) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3}K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3}K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} \\ \frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3}K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} & K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3}K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} \\ -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s + \sqrt{3}K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} & -\frac{K_p}{2} - \frac{K_i s - \sqrt{3}K_i \omega_0}{2(s^2 + \omega_0^2)} & K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

Структурна схема системи керування інвертором сонячної електростанції, представлена на рисунку 2.6, демонструє архітектуру контролера з PI-регулятором. Ключовою особливістю цієї системи є імплементація перетворення Парка-Горева, яке забезпечує трансформацію електричних параметрів із нерухомої трифазної системи (abc) у синхронно обертову систему координат (dq). Система управління інвертором сонячної електростанції реалізує принцип синхронізованої роботи з електричною мережею. Контролер постійно відстежує параметри напруги на шинах підключення та блокує роботу інвертора при відсутності мережевої напруги. Такий механізм є критично важливим елементом захисту обладнання та забезпечення безпеки експлуатації СЕС. Після здійснення координатної трансформації електричних сигналів із трифазної системи abc у синхронну систему dq, компоненти струму спрямовуються до регуляторів, що функціонують за пропорційно-інтегральними алгоритмами керування. Оброблені керуючі сигнали надходять до широтно-імпульсного модулятора (PWM), який перетворює їх у послідовність імпульсів змінної тривалості. В результаті модуляції на силових виходах інвертора формується трифазна напруга із заданими параметрами. На структурній схемі (рис. 2.6) важливим елементом є система фазового автопідстроювання (PLL), яка забезпечує синхронізацію роботи інвертора сонячної електростанції з параметрами електричної мережі.

Пропорційно-інтегральний (PI) регулятор виділяється серед інших типів контролерів завдяки двом ключовим аспектам: нескладній архітектурі його технічного втілення та мінімальному рівню спотворень гармонічних складових вихідного сигналу при стандартних умовах функціонування локальних електричних систем (ЛЕС).

Основним обмеженням пропорційно-інтегрального (PI) контролера є його залежність від якості електроенергії на шинах сонячної електростанції (СЕС). За наявності гармонічних спотворень у мережі, викликаних різними факторами - будь то комутація розосереджених джерел енергії (РДЕ), раптове підключення або відключення потужних споживачів, або робота нелінійних навантажень - відбувається погіршення якості вихідного сигналу інвертора. Це проявляється у деформації синусоїдальних форм напруги та струму на виході перетворювача.

За останні десять років значно зросла популярність пропорційно-резонансних (PR) регуляторів у системах керування інверторами сонячних електростанцій. Цей тренд обумовлений їхньою здатністю ефективно фільтрувати небажані гармонічні компоненти у вихідному сигналі. Характерною особливістю PR контролерів є наявність вбудованого компенсатора, який ефективно придушує низькочастотні гармонічні складові. Важливо відзначити, що цей механізм фільтрації не створює негативного впливу на динамічні показники роботи регулятора в сонячних електростанціях, які функціонують у складі локальних енергетичних систем (ЛЕС), підключених до електроенергетичної системи (ЕЕС) (рис. 2.7).

Передаточна функція PR-контролера має вигляд:

$$G_{PR}(s) = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + \omega^2}, \quad (2.14)$$

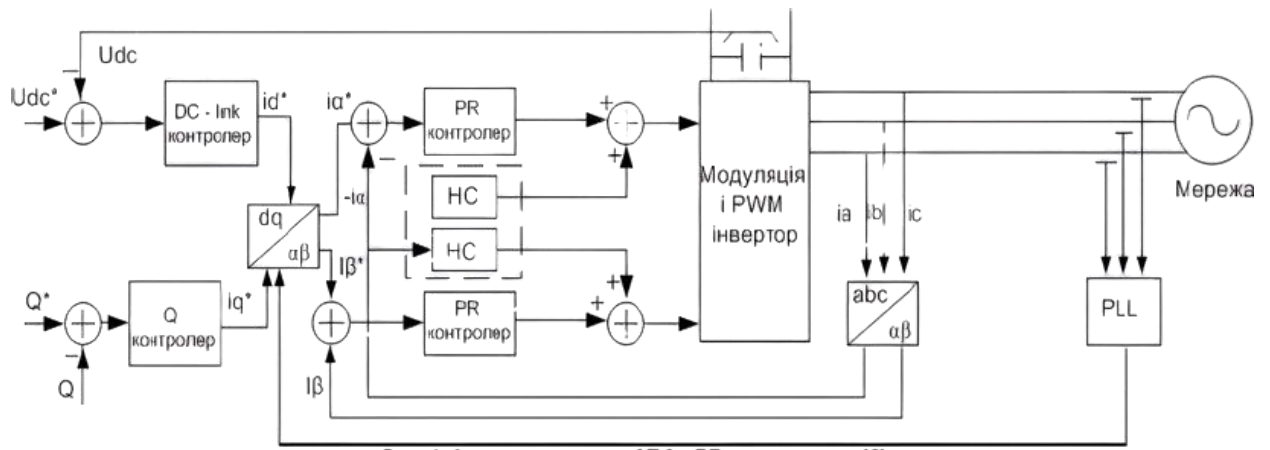


Рис. 2.7 Схема PR автоматичного керування інвертором

Передаточна функція ФНЧ знаходиться за формулою:

$$G_{HC}(s) = \sum_{h=3,5,7} K_i \frac{s}{s^2 + (\omega^2 h)}, \quad (2.15)$$

Математичний опис поведінки системи керування інвертором з PR-контролером у природній трифазній системі координат (abc) здійснюється через його передатну функцію (2.16):

$$G_{PR}^{(abc)}(s) = \begin{bmatrix} K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} & 0 & 0 \\ 0 & K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} & 0 \\ 0 & 0 & K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

Серед визначальних характеристик контролера типу DB (deadbeat) для інверторів сонячних електростанцій особливо виділяється інтеграція алгоритмів нечіткої логіки у програмне забезпечення. Для кращого розуміння принципів функціонування передатної функції інверторної системи з прогнозуючим DB-контролером, представлено спрощене однолінійне схематичне зображення (рис. 2.8).

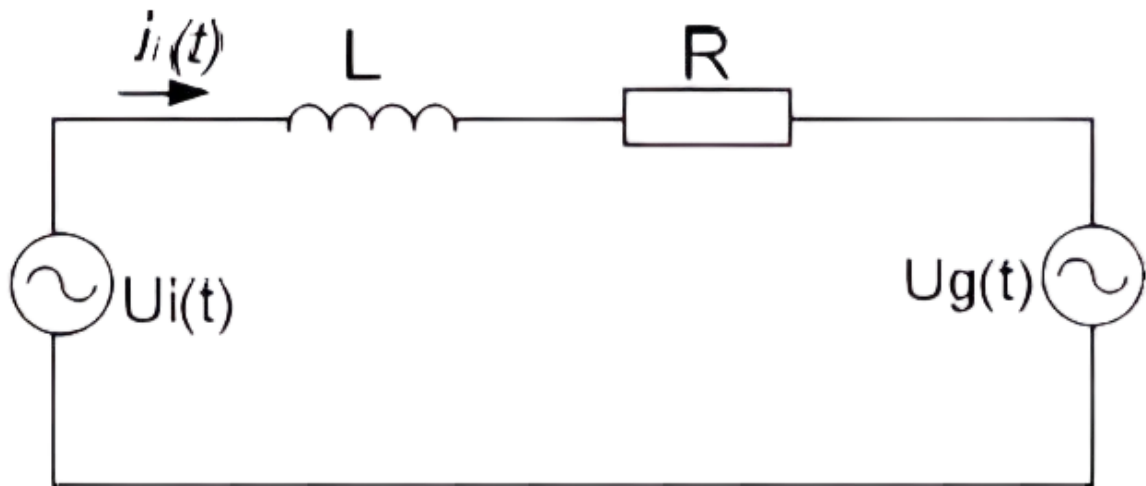


Рис. 2.8 Схема СЕС з DB-контролером

Струм інвертора визначається за формулою:

$$\frac{di_i(t)}{dt} = \frac{R}{L} i_i(t) + \frac{1}{L} (U_i(t) - U_g(t)), \quad (2.17)$$

Після деяких перетворень маємо:

$$i_i((k+1)T_s) = e^{-\left(\frac{R}{L}\right)T_s} i_i(kT_s) - \frac{1}{R_T} \left(e^{-\left(\frac{R}{L}\right)T_s} - 1 \right) (U_i(kT_s) - U_g(kT_s)), \quad (2.18)$$

Передаточна функція DB має вигляд:

$$G_{DB}^{(abc)} = \left(\frac{1}{b} \right) \left(\frac{1 - \alpha z^{-1}}{1 + \alpha z^{-1}} \right), \quad (2.19)$$

де $\alpha = e^{-\left(\frac{R}{L}\right)T_s}$, $b = -\frac{1}{R} \left(e^{-\left(\frac{R}{L}\right)T_s} \right)$, T_s – постійна інерції.

Архітектура даного контролера відрізняється наявністю двох ключових компонентів: LCL-фільтра та спеціалізованого обчислювального модуля.

Останній містить спрощену математичну модель електричної системи (ЕС) та здійснює розрахунок параметрів режиму функціонування на шинах сонячної електростанції. Така конфігурація забезпечує контролеру можливість оперативного виявлення розбіжностей між розрахунковими значеннями параметрів математичної моделі та фактичними показниками режиму роботи енергосистеми, що вимірюються на шинах сонячної електростанції.

Серед основних обмежень даного типу контролера особливо виділяється проблема часової затримки, яка суттєво впливає на динамічні характеристики системи керування. Це проявляється у зниженні швидкості відгуку та погіршенні якості регулювання при зміні режимних параметрів електричної системи.

2.4 Математична модель сонячного інвертора

Для імітаційного моделювання роботи сонячної електростанції в умовах децентралізованого енергопостачання було обрано програмне забезпечення Matlab. Вибір цього інструменту зумовлений низкою переваг, зокрема: Використання Matlab, високорівневої мови програмування для інженерних розрахунків у різноманітних галузях, є ефективним рішенням для моделювання режимів роботи сонячної електростанції в децентралізованих системах електропостачання. Важливою складовою Matlab є Simulink - інтерактивний інструмент, що дозволяє проводити імітаційне моделювання та аналіз динамічних систем, як лінійних, так і нелінійних, у безперервному або дискретному часі. Візуальне моделювання за допомогою Simulink надає широкі можливості для розробки та тестування складних технічних систем. Ця платформа дозволяє створювати графічні блок-діаграми компонентів, формуючи тим самим бібліотеку, що може бути використана для імітації функціонування складних пристроїв та систем. Simulink, будучи тісно інтегрованим з MATLAB, надає миттєвий доступ до широкого арсеналу інструментів для аналізу даних та моделювання, а також користується

перевагами алгоритмічних бібліотек MATLAB. Ця глибока інтеграція робить Simulink зручним та всеосяжним рішенням для графічного моделювання динамічних систем у різноманітних сферах науки та техніки.

MATLAB/Simulink є загальновизнаним та широко застосовуваним інструментом моделювання в інженерному та науковому середовищах. Ця платформа особливо корисна для моделювання складних енергетичних та електротехнічних систем. Ключовою перевагою MATLAB/Simulink є його всеосяжна бібліотека компонентів, що дозволяє точно відображати моделі реальних пристроїв енергетики, силових напівпровідникових елементів та інших електротехнічних систем.

Виходячи з переваг, які Matlab/Simulink продемонстрував для моделювання складних енергетичних та електротехнічних систем, цю платформу було обрано в якості основного інструменту для моделювання в межах даної роботи.

2.4.1. Моделювання режимів роботи сонячного інвертора. У підрозділі 1.5 було висвітлено, що фотоелектричні системи можуть функціонувати як автономні незалежні одиниці, так і бути інтегровані до централізованої енергетичної мережі. Відповідно до цього, у рамках даної магістерської кваліфікаційної роботи була розроблена імітаційна модель в середовищі Simulink для двох типів сонячних електростанцій (СЕС). Ці імітаційні моделі базуються на функціональних схемах (рис. 2.9) та диференціальних рівняннях, які описують електромагнітні процеси, що відбуваються в сонячних електростанціях.

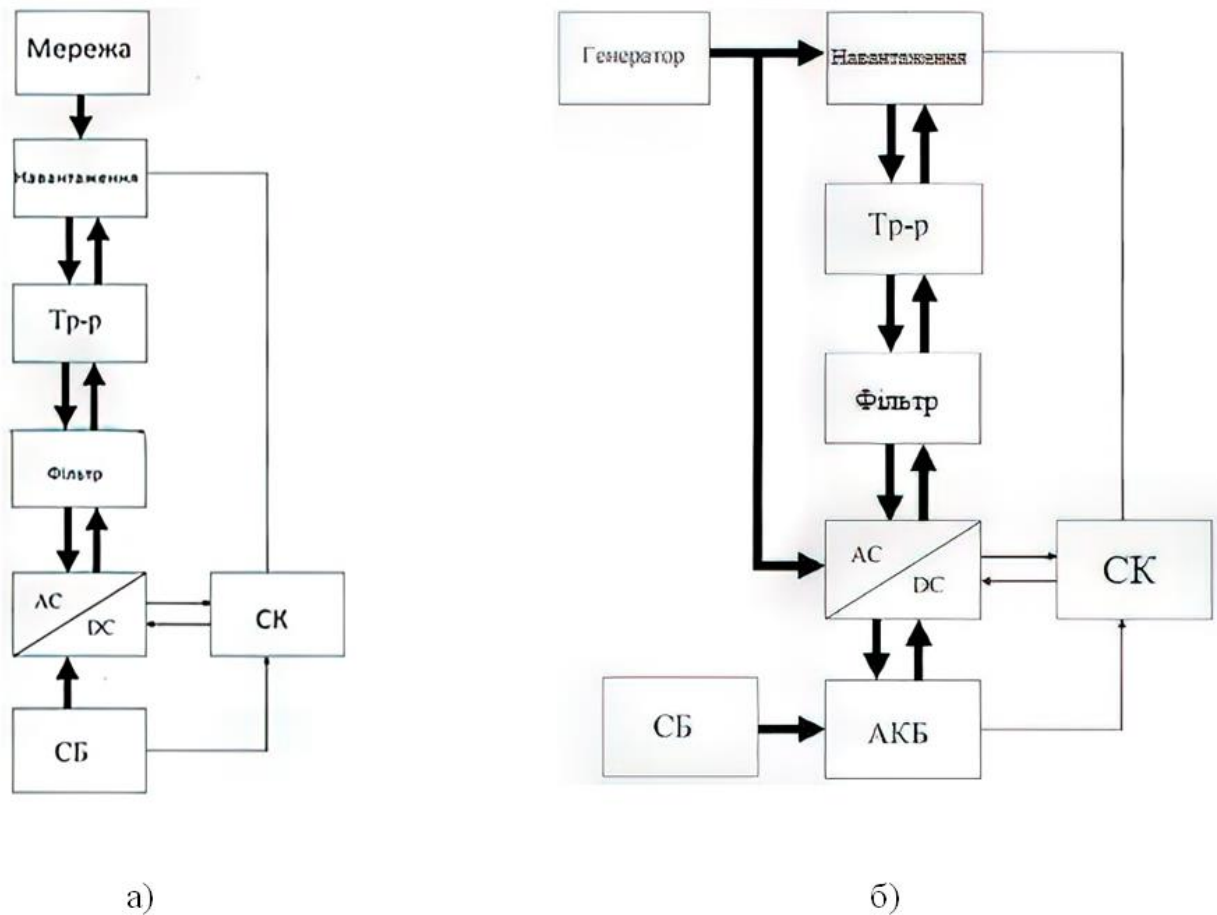


Рис. 2.9 Схеми інвертора:

а) СЕС, приєднана до мережі; б) автономна СЕС.

Оскільки інвертор є ключовим компонентом сонячної електростанції, наступний підрозділ буде присвячений детальному розгляду процесів, що відбуваються в інверторі.

2.4.2. Теоретичне дослідження трифазних інверторів. Перетворення трифазного живлення за допомогою транзисторних інверторів знаходить широке застосування у практичній сфері. Такі пристрої дозволяють створювати трифазні мережі змінного струму на різноманітних об'єктах, а також використовуються для керування трифазними електродвигунами.

Перший погляд на конструкцію трифазного інвертора може навести на думку про використання трьох однофазних перетворювачів, керованих із фазовим зміщенням в 120 градусів. Для виготовлення подібного інвертора потрібно 6 комутуючих елементів. Отримані фазні напруги мають форму

прямокутних імпульсів, зміщених один відносно одного на третину тривалості періоду. Однак цей підхід не є оптимальним з точки зору ефективності та практичного застосування,

З різноманіття топологій трифазних інверторів практичне застосування знаходить лише одна схема - так звана "бруківка" (bridge inverter), представлена на рис. 2.10.

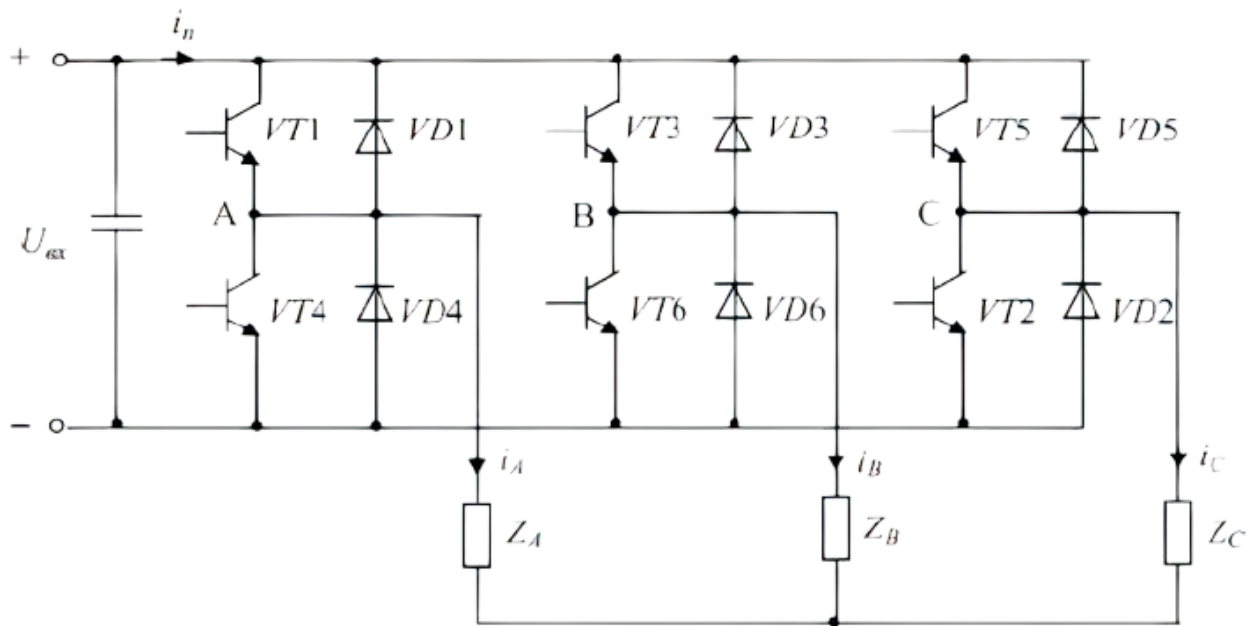


Рис. 2.10. Схема трифазного мостового інвертора

Тут навантаження організовано за зірковою схемою і безпосередньо під'єднана до клем А, В і С інвертора, який не містить трансформатора. Тут навантаження організовано за зірковою схемою і безпосередньо під'єднане до клем А, В і С інвертора, який не містить трансформатора. Однак, навантаження також може бути з'єднане за трикутною схемою. Крім того, для узгодження рівнів напруги інвертора і навантаження можуть використовуватися три однофазні трансформатори або один трифазний трансформатор, як і в звичайних трифазних системах змінного струму [9].

Електромагнітні процеси та характеристики інвертора визначаються такими основними факторами:

- 1) схемою з'єднання навантаження - в «зірку» або в «трикутник»;

- 2) способом управління транзисторами – 180°-градусним або 120°-градусним керуванням;
- 3) характером навантаження, який визначається коефіцієнтом:

$$K = \frac{R_H}{\omega} \cdot L_H \quad (2.20)$$

При 180-градусному управлінні кожен транзистор в інверторі знаходиться у відкритому стані протягом 180 градусів електричного кута. Це означає, що пари транзисторів, які утворюють вертикальні "стійки" інвертора, працюють в протифазі, подібно до схеми однофазного двотактного інвертора.

Управління вертикальними "стійками" транзисторів здійснюється з фазовим зсувом на 120 градусів електричного кута. Тобто, коли одна "стійка" відкрита, дві інші "стійки" закриті, а потім цей цикл повторюється з зсувом на 120 градусів. Розглянемо рисунок 2.11, який демонструє алгоритм керування транзисторами та відповідні діаграми напруг у схемі.

Компоненти на електронній схемі пронумеровані згідно з порядком їхнього ввімкнення. Розглядаючи принцип роботи схеми, можна зазначити, що керуючі імпульси надходять на наступний транзистор через кожні 60 градусів. Внаслідок цього, протягом одного періоду вихідної напруги утворюється шість сталих інтервалів I-VI, кожен з яких характеризується специфічною комбінацією відкритих транзисторів. Наприклад, на проміжку I активними є транзистори VT1, VT5 та VT6. Якщо за нульовий потенціал прийняти від'ємний полюс джерела живлення, то для першого інтервалу роботи схеми потенціали у визначених точках A, B, C, матимуть такі значення:

$$\varphi_A = U_{\text{вх}}; \varphi_B = 0; \varphi_C = U_{\text{вх}} \quad (2.21)$$

Лінійні напруги на першому інтервалі визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} u_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B = U_{BX}; \\ u_{BC} &= \varphi_B - \varphi_C = -U_{BX}; \\ u_{CA} &= \varphi_C - \varphi_A = 0. \end{aligned} \quad (2.22)$$

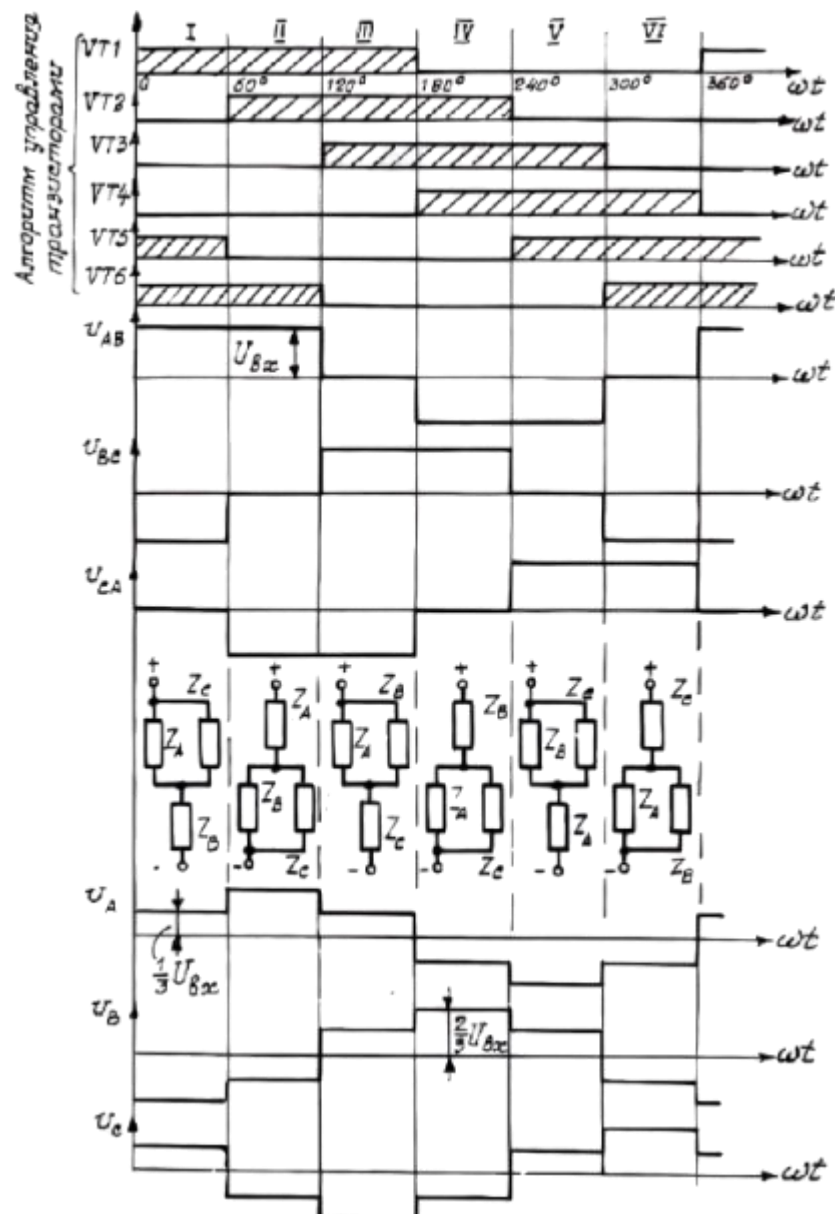


Рис. 2.11. Формування напруги для випадку 180-градусного керування у 3-х фазному мостовому інверторі

Напруги на інших ділянках мережі формуються аналогічним чином. В результаті на виході інвертора з'являються три лінійні напруги (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}), з амплітудою, рівною вхідній напрузі $U_{ВХ}$, та паузою на нульовому рівні тривалістю 60 градусів. Відповідно до електричної теорії, ці трифазні напруги перебувають у фазовому зсуві на 120 градусів. Наявність паузи на нульовому рівні тривалістю 60 градусів автоматично забезпечує достатньо високу якість вихідної змінної напруги, оскільки при цьому відсутні третя та кратні їй гармоніки.

Діюче значення лінійної напруги визначається за виразом:

$$U_{\text{Лєф}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ВХ}} = 0,816 \cdot U_{\text{ВХ}} \quad (2.23)$$

Фазні напруги легко визначаються для симетричного активного навантаження, коли опори фаз Z_A , Z_B та Z_C є рівними та активними ($Z_A = Z_B = Z_C = R_H$). На рис. 2.11 показано схеми підключення навантаження для кожного з шести інтервалів. На кожному із шести інтервалів схема підключення фазних навантажень до джерела живлення має наступний вигляд: дві фазні навантаження підключаються паралельно один до одного, а третя фаза підключається послідовно з ними. Через паралельно-послідовне підключення фазних навантажень, в умовах рівності опорів в фазах, напруги на фазах, де навантаження підключені паралельно, становлять $\pm \frac{U_{\text{ВХ}}}{3}$, у той же час, напруга на фазі, де навантаження підключене послідовно, дорівнює $\pm \frac{2}{3} U_{\text{ВХ}}$. У підсумку, фазні напруги U_a , U_b , U_c на виході інвертора мають двоступеневу форму. Перша сходинка має амплітуду $\frac{U_{\text{ВХ}}}{3}$ а друга $\frac{2}{3} U_{\text{ВХ}}$. Крім того, ці фазні напруги зміщені одна відносно одної на 120 градусів. Ефективне (діюче) значення фазної напруги інвертора може бути розраховане наступним чином:

$$U_{\Phi_{\text{ef}}} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{\text{BX}}}{3} = 0,471 \cdot U_{\text{BX}} \quad (2.24)$$

При активному симетричному навантаженні, криві струмів I_A , I_B , I_C повторюють форму фазних напруг відповідно.

При 120-градусному режимі управління кожен з ключових транзисторів у складі інвертора знаходиться в провідному стані протягом 120 градусів відповідно до алгоритму управління, проілюстрованого на рис. 2.12.. На відміну від 180-градусного управління, при якому одночасно відкритими є три ключі інвертора, у 120-градусному режимі завжди відкриті лише два ключі.

З аналізу схем підключення навантажень для кожного з шести інтервалів комутації транзисторів стає очевидним, що в будь-який момент часу дві фазні навантаження завжди підключені послідовно до джерела живлення, а третя фаза залишається в відключеному стані. Якщо припустити, що опори фазних навантажень є рівними та чисто активними, то вихідні фазні напруги інвертора будуть приймати значення або $\frac{U_{\text{BX}}}{2}$, або нуль на відповідних інтервалах комутації.

Діюче значення фазної напруги визначається за формулою:

$$U_{\Phi_{\text{ef}}} = \frac{U_{\text{BX}}}{\sqrt{6}} = 0,408 \cdot U_{\text{BX}} \quad (2.25)$$

Для лінійної напруги U_{AB} справедливий вираз:

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (2.26)$$

Тоді, справедливим буде наступний вираз:

$$u_{AB} = \frac{U_{BX}}{2} - \left(-\frac{U_{BX}}{2}\right) = U_{BX} \quad (2.27)$$

Аналогічно для 2-го інтервалу:

$$u_{AB} = \frac{U_{BX}}{2} - 0 = \frac{U_{BX}}{2} \quad (2.28)$$

Для третього інтервалу:

$$u_{AB} = 0 - \frac{U_{BX}}{2} = -\frac{U_{BX}}{2} \quad (2.29)$$

Отже, лінійна напруга має ступінчастий вигляд з амплітудою 1-го ступеню U_{BX} і 2-го $\frac{U_{BX}}{2}$.

Діюче значення лінійної напруги визначається за виразом:

$$U_{L\epsilon\Phi} = \frac{U_{BX}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot U_{BX} \quad (2.30)$$

При переході до активно-індуктивного навантаження, процеси в трифазному інверторі з 120-градусним управлінням стають більш складними. Це є певним недоліком 120-градусного методу управління, адже наявність реактивної складової в навантаженні ускладнює формування бажаної форми фазних напруг. Відповідно до теорії трифазних інверторів, співвідношення між лінійною і фазною напругою визначається обраним методом керування силовими транзисторами. Незалежно від обраного алгоритму, можна показати, що в ідеальному трифазному інверторі відношення лінійної напруги до фазної

становить $\frac{U_{ЛЗ\Phi}}{U_{ФЗ\Phi}} = \sqrt{3}$, що є характерним для стандартних трифазних систем з синусоїдальними електрорушійними силами.

Тип схемної реалізації інвертора, а саме двотактна чи однотактна, визначає характер роботи транзисторних ключів. У двотактній схемі можна виокремити пари ключів, що працюють у протифазному режимі - коли один ключ замикається, інший розмикається. Натомість в однотактній схемі всі ключі працюють синхронно.

Найважливіші характеристики автономного інвертора:

- коефіцієнт перетворення напруги K_U в автономному інверторі напруги (АІН) характеризує ефективність перетворення енергії. Цей коефіцієнт являє собою відношення максимально можливого діючого значення основної гармоніки вихідної напруги АІН до середнього значення напруги в ланці постійного струму;
- характеристики забезпечуваної напруги визначаються не лише її усередненою величиною, а й спектральним складом. Зокрема, ключовими параметрами є коефіцієнт гармонік для низькочастотної ділянки частотного діапазону, а також коефіцієнт компенсаційних гармонік для високочастотної частини.

2.4.3. Математична модель силового ключа. Для ефективної реалізації схеми автономного інвертора напруги ключі К повинні володіти властивостями двосторонньої провідності.

При проектуванні електронних схем важливо забезпечити контрольоване керування ключовими елементами транзисторних пристроїв. Система управління повинна точно визначати моменти комутації напівпровідникових приладів. Реалізація такого керованого ключового елемента можлива з використанням різноманітних компонентів. Щоб забезпечити двонаправлену провідність силового ключа, паралельно до керованого вентиля підключають зворотний діод. Така конфігурація дозволяє струму протікати в обох напрямках. (рис. 2.12).

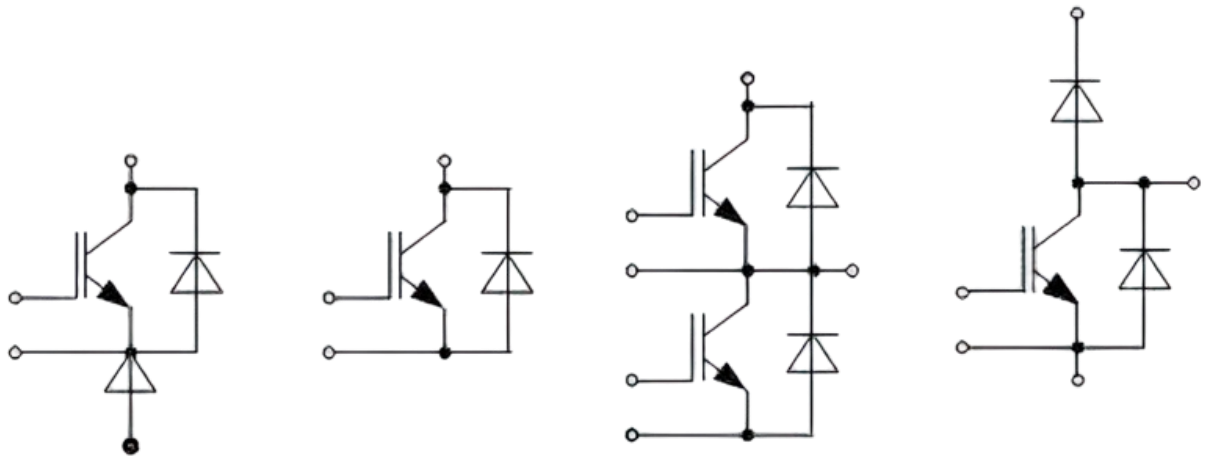


Рис. 2.12. Схеми ключів, зашунтованих діодами

При проходженні струму через відкритий вентиль або паралельно підключений зворотний діод, падіння напруги на ідеалізованому ключовому елементі прямує до нуля. У випадку, коли один із елементів плеча (транзистор чи зворотний діод) перебуває у закритому стані, а інший елемент цього ж плеча проводить струм, на закритому компоненті виникає позитивний потенціал, що дорівнює напрузі живлення E_d . Під час роботи електронної схеми необхідно враховувати особливості падіння напруги на компонентах. Коли транзистор перебуває у стані провідності, на ньому виникає певна додатна напруга (зазвичай 0.2-0.3 В для силових MOSFET та 0.7-2.0 В для біполярних транзисторів). Водночас, зворотній діод, який підключено паралельно до транзистора, характеризується падінням напруги близько 0.6-1.2 В (залежно від типу діода - кремнієвий, діод Шотткі тощо) у провідному стані, що створює негативний потенціал на його контактах.

Аналогічні процеси спостерігаються під час замкненого стану комутаційного елемента. У цьому режимі роботи напруга живлення E_d змінюється залежно від стану інших компонентів у тому самому плечі схеми. При відкритті супутнього діода відбувається сумування його падіння напруги з тоді як проведення паралельного транзистора призводить до зменшення результуючої напруги на величину його падіння напруги у відкритому стані.

Під час активної фази, коли транзистори перебувають у відкритому стані, енергія споживається із системи електроживлення. У наступній фазі, коли основні транзистори закриваються, а зворотні діоди переходять у провідний стан, напрямок струму в джерелі змінюється на протилежний. Накопичена в індуктивному навантаженні електромагнітна енергія не розсіюється, а повертається назад до системи живлення. Цей процес двонаправленого енергетичного потоку реалізується завдяки зворотнім діодам, які створюють контур для циркуляції струму.

Розглядаючи процес перетворення електричної енергії в інверторі, важливо зазначити, що на вході пристрою має бути встановлено компонент, здатний приймати та трансформувати електроенергію. Якщо ж у схемі відсутній конденсатор, то діоди випрямляча не зможуть пропускати струм у зворотному напрямку під час рекуперації електричної енергії.

Відома низка методів, за допомогою яких можна регулювати значення вихідної напруги автономного інвертора напруги (АІН):

- широтно-імпульсне регулювання;
- метод геометричного підсумовування;
- широтно-імпульсна модуляція.

Існує три основні методи керування вихідною напругою в інверторних системах через широтно-імпульсну модуляцію, які здобули широке практичне впровадження у промисловості та електроніці:

1. Керування вихідними параметрами відбувається за принципом прямокутної функції, при якому спостерігається синхронна зміна двох ключових характеристик сигналу - усередненого показника напруги та тривалості імпульсного впливу;

2. У випадку застосування трапецеїдального принципу керування, динаміка зміни усередненого значення напруги на виході характеризується формою, що відповідає геометричній фігурі трапеції;

3. При використанні синусоїдального закону керування, часова характеристика імпульсів напруги на виході змінюється відповідно до гармонічної функції.

Формування необхідної характеристики вихідної напруги забезпечується внутрішньою системою керування, яка здійснює комутацію силових елементів схеми. Ключовим параметром регулювання виступає тривалість імпульсів, що подаються на навантаження, звідки походить термін "широтно-імпульсне регулювання" (ШІР).

Модифікація вихідної напруги досягається шляхом часового зміщення фронтів імпульсів. При зсуві переднього фронту на кут α в напрямку затримки (або заднього фронту в бік випередження, чи одночасної зміни обох фронтів), відбувається зменшення параметра λ , який визначає тривалість імпульсів. Це безпосередньо впливає на ефективне значення напруги, що подається на навантаження:

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} E_d^2} = E_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} = E_d \sqrt{\frac{\lambda}{\pi}} \quad (2.31)$$

Аналізуючи отримане математичне співвідношення та часову залежність сигналу, можна зробити висновок, що пікове значення електричної напруги досягається в момент, коли кут α дорівнює нулю градусів, а при досягненні кутом $\alpha = \pi$ вихідний потенціал знижується до нульової позначки. Графічне відображення залежності вихідних параметрів, що базується на встановлених математичних співвідношеннях, представлене на зображенні 2.15. Дана методика контролю вихідної напруги демонструє значні переваги, оскільки керування параметрами на виході силового модуля реалізується через електронну систему управління, що повністю усуває потребу в механічних комутаціях силових частини схеми. Важливо відзначити, що таке рішення суттєво покращує швидкодію регулювання та динамічні характеристики інверторних систем.

Широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) поділяють на два основних типи, які відрізняються принципами формування імпульсів:

- однополярна ШІМ;
- двополярна ШІМ.

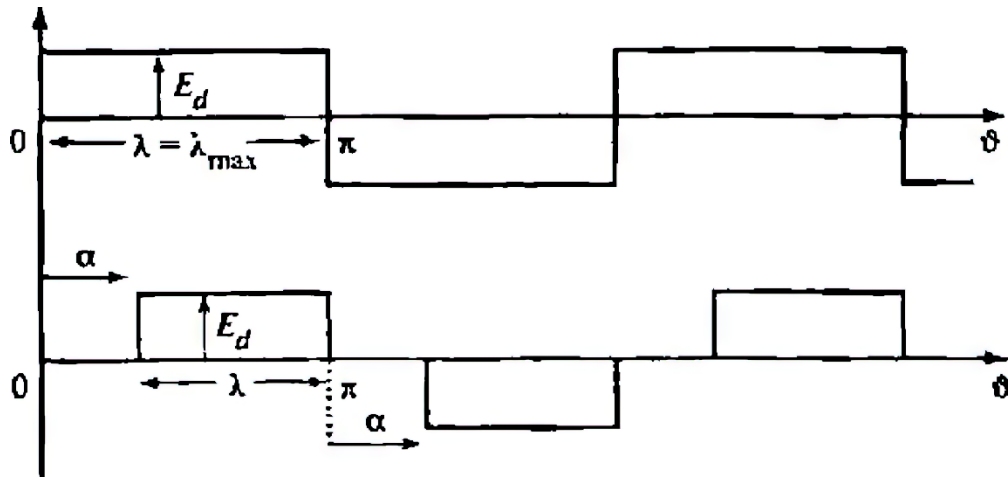


Рис. 2.13. Графічне зображення імпульсів ШІМ

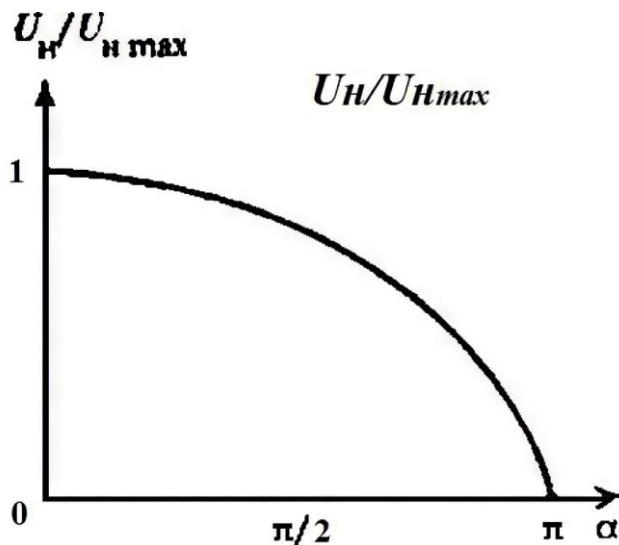


Рис. 2.14. Регулювальна характеристика інвертора

При використанні однополярної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) вихідна напруга складається з послідовності імпульсів однієї полярності, що генеруються протягом кожного півперіоду опорного сигналу (рис. 2.15, а). У випадку роботи з активно-індуктивним навантаженням, контролер керування має створити умови для циркуляції струму через пару напівпровідникових елементів. Цей процес передбачає замикання навантаження на одну з силових

шин живлення, що реалізується, наприклад, через одночасну активацію транзистора VT1 та діода VD3.

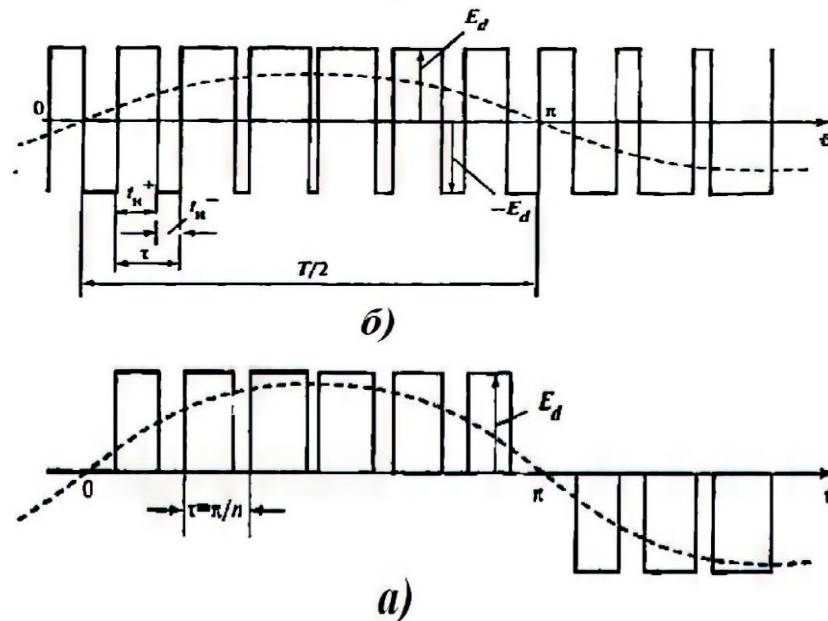


Рис. 2.15. 1-полярна (а) та 2-полярна (б) ШІМ

Метод двополярної широтно-імпульсної модуляції характеризується тим, що проміжки між імпульсами, які зазвичай утворюють паузи в однополярній ШІМ, заповнюються керуючими сигналами протилежного знаку (рис. 2.15, б).

Підвищення співвідношення між несучою (високочастотною) та модулюючою (низькочастотною) складовими призводить до того, що форма обвідної вихідного сигналу стає ближчою до ідеальної синусоїди. Такий ефект суттєво спрощує процес фільтрації високочастотних компонентів у вихідній напрузі.

2.4.4. Теоретичне дослідження режимів роботи сонячного інвертора. У початковому розділі кваліфікаційної роботи визначено основний об'єкт дослідження - сонячні електростанції двох типів: автономної та мережевої конфігурації. Визначальною характеристикою функціонування автономної системи виступає застосування спеціалізованого двонаправленого інвертора напруги, що забезпечує перетворення енергії у обох напрямках. Основне призначення даного перетворювального пристрою полягає у

забезпеченні двостороннього енергетичного обміну між колами постійного та змінного струму, керованого внутрішніми сигналами системи управління. Функціонування автономного інвертора напруги у колі змінного струму характеризується здатністю працювати у двох режимах: як ведучий або ведений перетворювач, що визначається сигналами системи керування. Застосування автономного інвертора напруги:

- ведучий режим: інвертор забезпечує живлення автономної мережі, регулюючи напругу та частоту в циклічному режимі заряду/розряду.);
- Ведений режим: інвертор стабілізує напругу автономної мережі, компенсуючи коливання шляхом додаткової подачі чи споживання потужності.);
- стабілізація напруги в централізованій мережі: Інвертор згладжує перепади напруги в загальній мережі, підтримуючи стабільне електропостачання.;
- безперебійне живлення: при наявності централізованої мережі інвертор працює як стабілізатор, а при її відсутності переходить у режим ведучого, забезпечуючи безперервну подачу електроенергії.).

Автономний інвертор напруги може працювати в наступних режимах:

- режим веденого інвертора – підтримує стабільну напругу на навантаженні;
- режим ведучого інвертора – забезпечує підтримання напруги на навантаженні в автономній мережі;
- режим підзарядки (за наявності такої можливості) – здійснює зарядку акумуляторних батарей в режимі веденого інвертора;
- активний фільтр – за допомогою блоку керування інвертор працює як активний фільтр, покращуючи якість електричної енергії.

При роботі в режимі керованого АІН функціонує наче інвертор, керований електромережею (або іншим джерелом) в циклічному режимі: споживаючи або рекуперуючи потужності на стороні змінного струму.

Керування споживанням/зарядженням та рекуперацією/розрядженням здійснюється за відповідною функцією зворотного зв'язку. Основна функція зворотного зв'язку - підтримувати напругу змінного струму в заданому діапазоні: при зниженні напруги АІН доповнює потужність (можливий розряд акумуляторної батареї), при перевищенні напруги мережі АІН споживає потужність (можливий заряд акумуляторної батареї).

У режимі ведучого АІН працює як джерело живлення мережі (відсутні інші джерела або вони є веденими) і генерує стабілізовану напругу. Це дозволяє забезпечувати сталість електропостачання та контролювати параметри мережі. При переході з режиму ведучого в режим веденого, АІН має відключитися безпосередньо перед підключенням іншого джерела до мережі (за сигналом) та повернутися в мережу вже у веденому режимі. Це необхідно для узгодження роботи різних джерел в електричній системі. У разі непередбаченого або запланованого відключення веденого джерела, АІН може перейти в режим ведучого. Це дозволяє забезпечити безперебійне електропостачання в автономній мережі навіть при втраті основного джерела живлення.

Крім того, особливістю роботи інвертора з мережею є можливість покращення показників якості електроенергії для споживачів за рахунок функціональності силового активного фільтру в блоці керування інвертора. Силкові активні фільтри компенсують гармоніки струму шляхом генерації рівного, але протилежного за фазою, струму компенсації. Силкові активні фільтри компенсують гармоніки струму шляхом генерації рівного, але протилежного за фазою, струму компенсації. Таким чином, вони діють як джерело струму, що вводить гармоніки, згенеровані навантаженням, але зі зсувом фази на 180 градусів. Силкові активні фільтри компенсують гармоніки струму, згенеровані навантаженням, шляхом введення протифазного струму компенсації. Це дозволяє придушувати гармонійні компоненти в струмі джерела, залишаючи його синусоїдальним і узгодженим з напругою.

Висновки до розділу

1. Трифазні інвертори виконують ряд ключових функцій, а саме перетворення постійного струму від джерел електроенергії у змінний струм, сумісний із електромережею; синхронізацію параметрів струму (частоти, напруги, фазового кута) з електромережею для безперебійної передачі енергії; стабілізацію вихідної напруги для підтримання її на оптимальному рівні; обмеження струмових перевантажень у разі короткого замикання, забезпечуючи захист обладнання.

2. Комутація напівпровідникових елементів, таких як тиристори та транзистори, супроводжується спотворенням форми струмових кривих у змінних мережах, що призводить до появи гармонійних спотворень. У мережах, де інтенсивно розгортаються сонячні електростанції, спостерігається погіршення ключових показників якості електроенергії.

3. Найбільш поширені проблеми – це значні відхилення напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ; зростання коефіцієнта спотворення синусоїдальної форми K_U напруги, що негативно впливає на роботу підключеного обладнання.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ВПЛИВУ НА РІВНІ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1 Комп'ютерна модель інвертора в залежному і провідному режимах

Розглянемо детально електронну модель, описану у схемотехнічній елементній базі Simulink, відображену на рис. 3.1. Дана модель містить такі основні компоненти: генератор, інвертор, системи керування інвертором, навантаження та акумуляторна батарея.

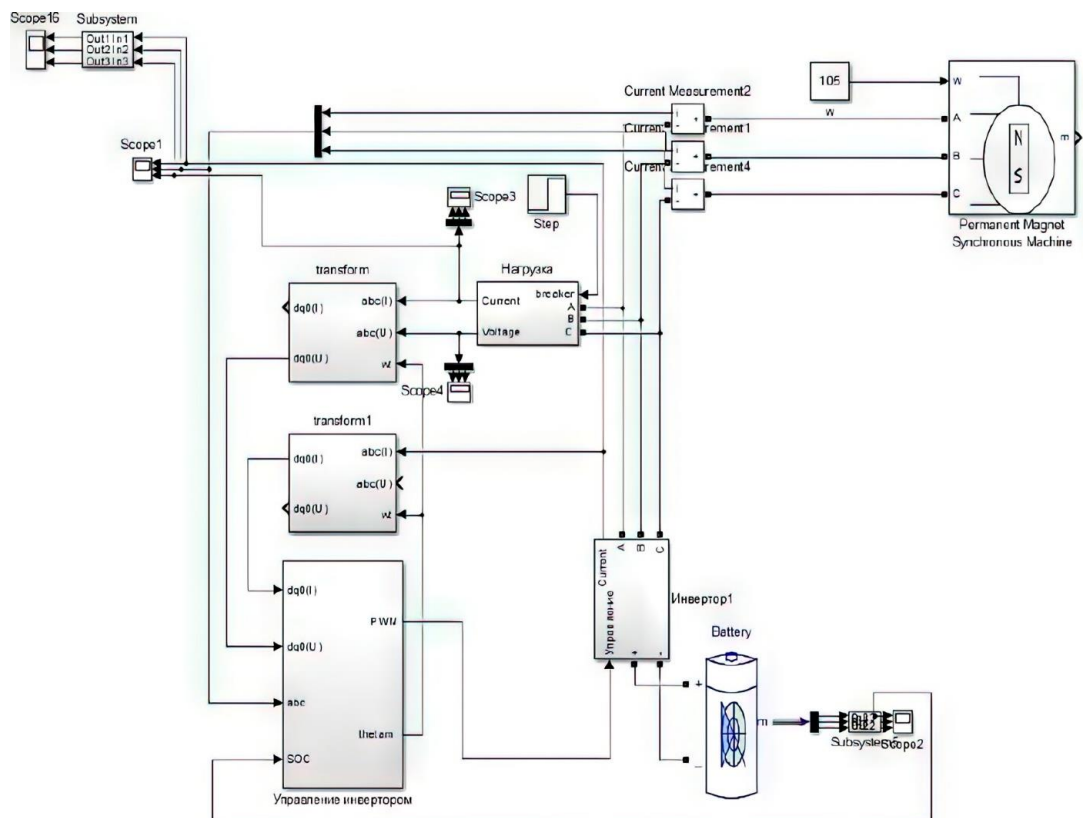


Рис. 3.1. Комп'ютерна модель для дослідження роботи СЕС в автономному режимі

Автономний режим передбачає використання дизель-генератора для резервного живлення власних потреб фотоелектричної станції в нічний час. Це забезпечує безперебійне функціонування станції за відсутності сонячної активності. Дизель-генератор оснащено шумопоглинаючим всепогодним капотом для встановлення на відкритому повітрі. Протягом світлої доби фотоелектрична станція може отримувати резервне живлення від власної генерації. У нічний час резервним джерелом живлення виступає дизель-генератор.

Для моделювання генератора в програмному середовищі Simulink застосовано блок Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) (рис. 3.2). (для моделювання генератора в середовищі Simulink використовувався блок Permanent Magnet Synchronous Machine (рис. 3.2).)

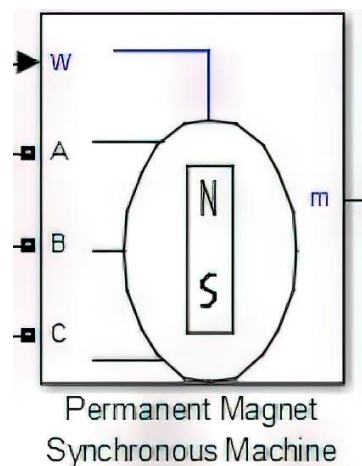


Рис. 3.2 Комп'ютерна модель блоку генератора

Параметри блоку були узгоджені із характеристиками ВДГ 190-600 (див. рис. 2.17)

Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.

The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor. Preset models are not available for this type of machine.

ConfigurationParametersAdvanced

Number of phases:
3

Back EMF waveform:
Sinusoidal

Rotor type:
Round

Mechanical input:
Speed w

Preset model:
No

Measurement output
☐ Use signal names to identify bus labels

Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.

The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor. Preset models are not available for this type of machine.

ConfigurationParametersAdvanced

Stator phase resistance Rs (ohm):
0.493

Armature inductance (H):
0.00835

Machine constant
Specify: Voltage Constant ($V_{peak} L-L / \text{krpm}$)

Flux linkage: 1.1762

Voltage constant: 640

Torque constant: 5.2928

Pole pairs p ():
3

Initial conditions [$\omega_m(\text{rad/s})$ $\theta_{\text{tam}}(\text{deg})$ $i_a, i_b(\text{A})$]:
[10,0,0,0]

Рис. 3.3. Параметри блоку генератора

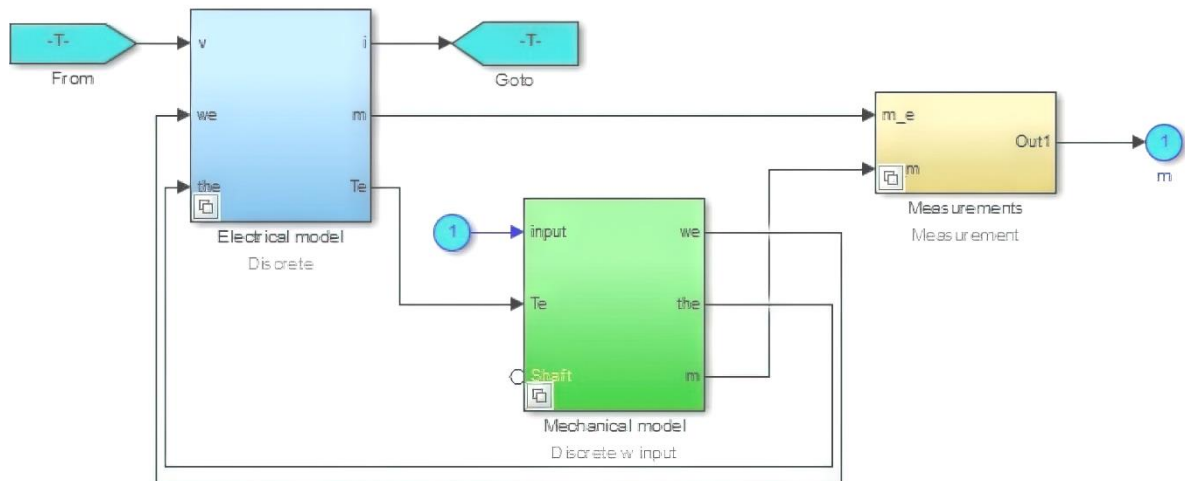


Рис. 3.4. Структура моделі блоку генератора

Модель генератора містить три основні компоненти: електричну частину, механічну частину та блок вимірювань (рис. 3.4):

Розглянемо електричну частину моделі генератора детальніше, як показано на рис. 2.21.:

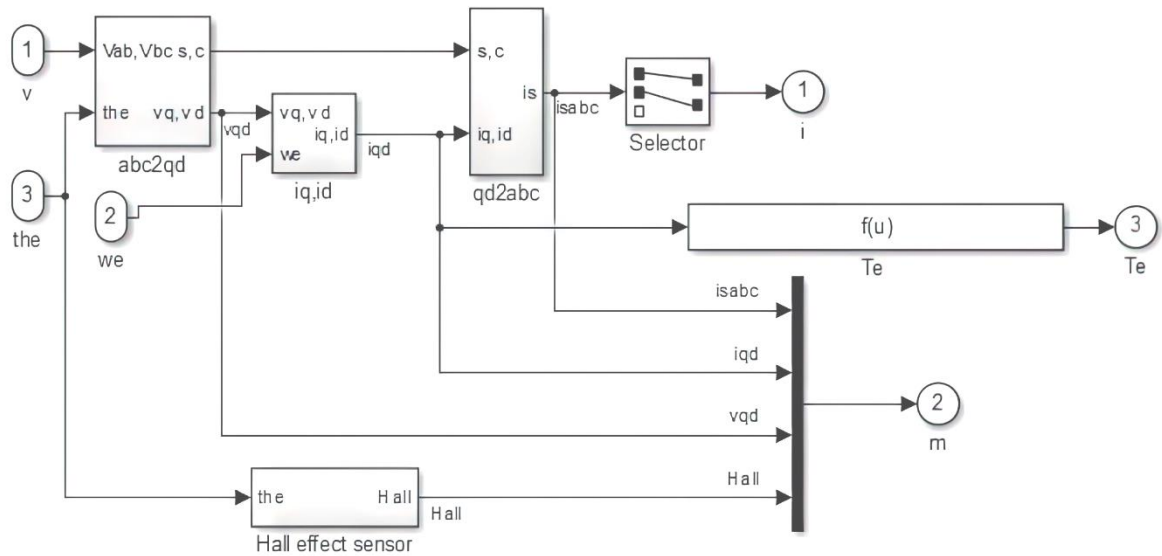


Рис. 3.5. Модель електричної частини генератора

Розрахунок векторних складових напруги проводиться шляхом застосування прямого перетворення Парка - Кларка. Розрахунок векторних складових напруги проводиться шляхом застосування прямого перетворення Парка - Кларка. Ці векторні складові струму визначають електромагнітний момент генератора.

Перетворення Парка - Кларка виконується в два етапи:

Спочатку струми перетворюються до двохкоординатної системи (рівняння 2.29). Це можливо, оскільки вони лежать в одній площині.

Далі ці компоненти перетворюються в обертову систему координат, спрямовану вздовж вектора потокозчеплення (рівняння 2.30). Це дозволяє виділити складову, що визначає електромагнітний момент:

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_a(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin(\theta_e) \\ -\sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Блок abc2qd, як показано на рис. 3.5, здійснює пряме перетворення Парка фазних напруг генератора в напругу поздовжньої та поперечної координат. Аналітично це записується як:

$$U_q = \frac{1}{3}(\cos(\theta_e) \cdot (2U_{ab} + U_{bc}) + (\sqrt{3} \cdot U_{bc} \cdot \sin(\theta_e))) \quad (3.3)$$

$$U_d = \frac{1}{3}(\sin(\theta_e) \cdot (2U_{ab} + U_{bc}) + (-\sqrt{3} \cdot U_{bc} \cdot \cos(\theta_e))) \quad (3.4)$$

Лінійні фазні напруги U_{ab} та U_{bc} визначаються за формулами:

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (3.5)$$

$$U_{bc} = U_b - U_c \quad (3.6)$$

У блоці на підставі фазних напруг поздовжньої і поперечної складової фазної напруги розраховуються відповідні складові фазних струмів i_d та i_q :

$$i_q = \int \left(\frac{U_q}{L_q} - \omega_E \cdot \frac{Flux}{L_q} - \frac{L_d}{L_q} \cdot \omega_E \cdot i_d - \frac{R}{L_q} i_q \right) dt \quad (3.7)$$

$$i_d = \int \left(\frac{U_d}{L_d} - \frac{L_d}{L_q} \cdot \omega_E \cdot i_d - \frac{R}{L_d} i_d \right) dt \quad (3.8)$$

Відповідно до рівняння, блок T_e (рис. 3.5) обчислює електромагнітний момент на основі складових струму:

$$1,5 \cdot p \cdot (Flux \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d) \quad (3.9)$$

Блок qd2abc (рис. 3.5) виконує зворотнє перетворення Парка-Кларка, обчислюючи амплітуди фазних струмів i_a , i_b , i_c на основі складових струмів i_d та i_q . Аналітично це записується як:

$$i_a = i_q \cdot \cos \theta_e + i_d \cdot \sin \theta_e \quad (3.10)$$

$$i_b = \frac{1}{2} \left(\cos \theta_e \cdot (-i_q - \sqrt{3} \cdot i_d) + \sin \theta_e \cdot (i_d + \sqrt{3} \cdot i_q) \right) \quad (3.11)$$

$$i_c = -(i_a + i_b) \quad (3.12)$$

$$T_e = \frac{1}{2} \left(PM \cdot p \cdot (Flux \cdot i_q + (PM \cdot L_d - PM \cdot L_q) \cdot i_q \cdot i_d) \right) \quad (3.13)$$

Механічна частина моделі генератора має на вході зовнішній та електромагнітний момент, а на виході обчислює кутову швидкість, електричний та фізичний кути ротора.

$$\omega_e = PM \cdot p \cdot \int \left(\frac{1}{J} \cdot (T_e - T_M) \right) dt \quad (3.14)$$

$$\theta_e = \int (\omega_e) \quad (3.15)$$

$$\omega = \frac{\omega_e}{PM \cdot p} \quad (3.16)$$

$$\theta = \frac{\theta_e}{PM.p} \quad (3.17)$$

3.1.1. Комп'ютерне моделювання акумуляторної батареї. Візуальне представлення елемента живлення (акумуляторного блоку) у програмному комплексі Matlab/Simulink можна побачити на зображенні 3.6.

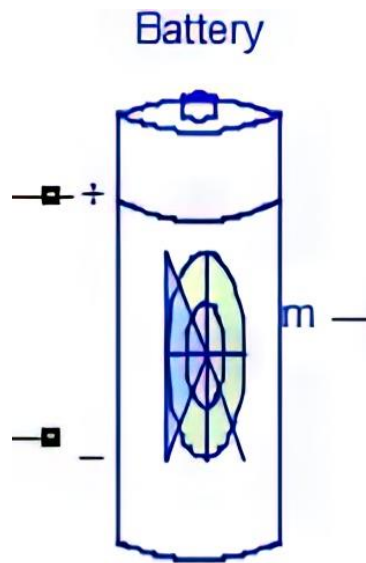


Рис. 3.6. Модель блоку акумуляторної батареї

У системі застосовано свинцево-кислотну акумуляторну систему, що характеризується робочою напругою 48 вольт та загальною ємністю 1250 ампер-годин. Конфігурація налаштувань батарейного блоку відображена на ілюстрації 3.7.

Parameters		Discharge	
Type:	Lead-Acid	☐ Determined from the nominal parameters of the battery	
Nominal voltage (V)	48	Maximum capacity (Ah)	275
Rated capacity (Ah)	250	Cut-off Voltage (V)	35
Initial state-of-charge (%)	50	Fully charged voltage (V)	55
Battery response time (s)	3	Nominal discharge current (A)	2
		Internal resistance (Ohms)	2
		Capacity (Ah) at nominal voltage	255
		Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[49 100]

Рис. 3.7. Параметри моделі акумуляторної батареї

На рис. 3.8. представлена структура блоку АКБ.

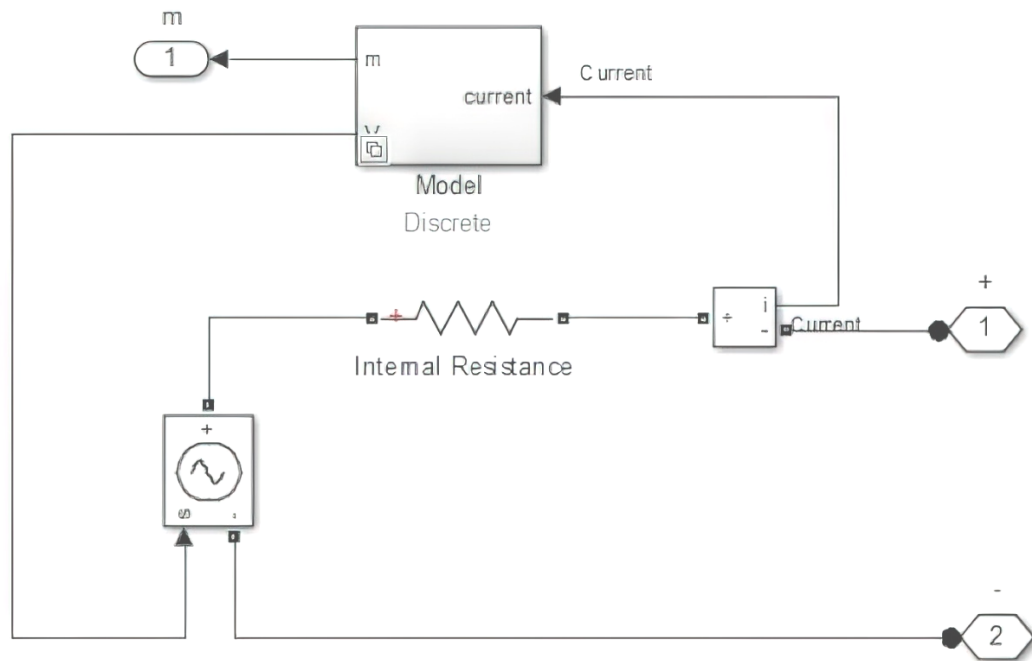


Рис. 3.8 Структура блоку АКБ

У блоці Model через вихідний порт m здійснюється моніторинг ключових параметрів акумуляторної системи, включаючи поточний стан заряду, показники напруги, величину зарядного/розрядного струму та загальний стан батареї.

3.1.2. Комп'ютерне моделювання трифазного інвертора.

Електричний перетворювач (DC / AC трансформатор) є пристроєм, призначеним для конвертації постійного струму в змінний, при цьому відбувається модифікація параметрів напруги або частоти. Згідно з рисунком 3.9, інвертор зазвичай являє собою пристрій, який генерує періодичну напругу, близьку до синусоїди або дискретного сигналу. Блок генератора в структурі інвертора відповідає за формування вихідного змінного струму.

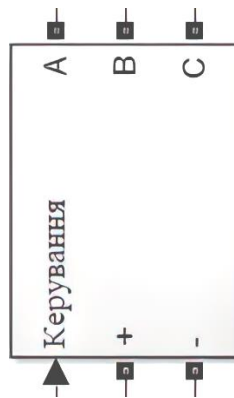


Рис. 3.9 Модель блоку інвертора

Робота інвертора напруги ґрунтується на періодичному перемиканні джерела постійної напруги, що призводить до зміни полярності напруги на навантаженні. Частота перемикання визначається сигналами управління, які формуються керуючою схемою (контролером).

Конверторний пристрій, відомий як інвертор, працює на основі попереднього високочастотного перетворення напруги постійного струму до амплітудного значення синусоїдальної вихідної напруги(рис.3.10). Цей процес дозволяє отримати необхідну форму вихідної напруги для живлення різноманітних електричних систем. Ця напруга постійного струму за допомогою мостового інвертора перетворюється у змінну напругу, наближену до синусоїдальної, завдяки застосуванню відповідних принципів керування транзисторами цього пристрою. Сучасні інвертори, як правило, використовують модуляцію широтно-імпульсного сигналу (ШІМ) для генерації змінної напруги. Принцип роботи ШІМ в інверторі полягає в тому, що відповідна пара транзисторів мостового інвертора комутується на високій частоті (багаторазово) протягом кожного напівперіоду вихідної напруги. Це дозволяє плавно регулювати амплітуду та частоту вихідного сигналу змінного струму. Тривалість високошвидкісних комутаційних імпульсів коливається за синусоїдальною кривою. Синусоїдальна складова вихідної напруги інвертора виділяється за допомогою високочастотного фільтра нижніх частот.

Конструкція інвертора передбачає використання 6 IGBT транзисторів, з'єднаних зустрічно-паралельно з діодами. Така схема дозволяє забезпечити двонаправлений потік електричної енергії. Падіння напруги на відкритих IGBT транзисторах становить близько 2 Вольт, а на діодах - близько 0.8 Вольт.

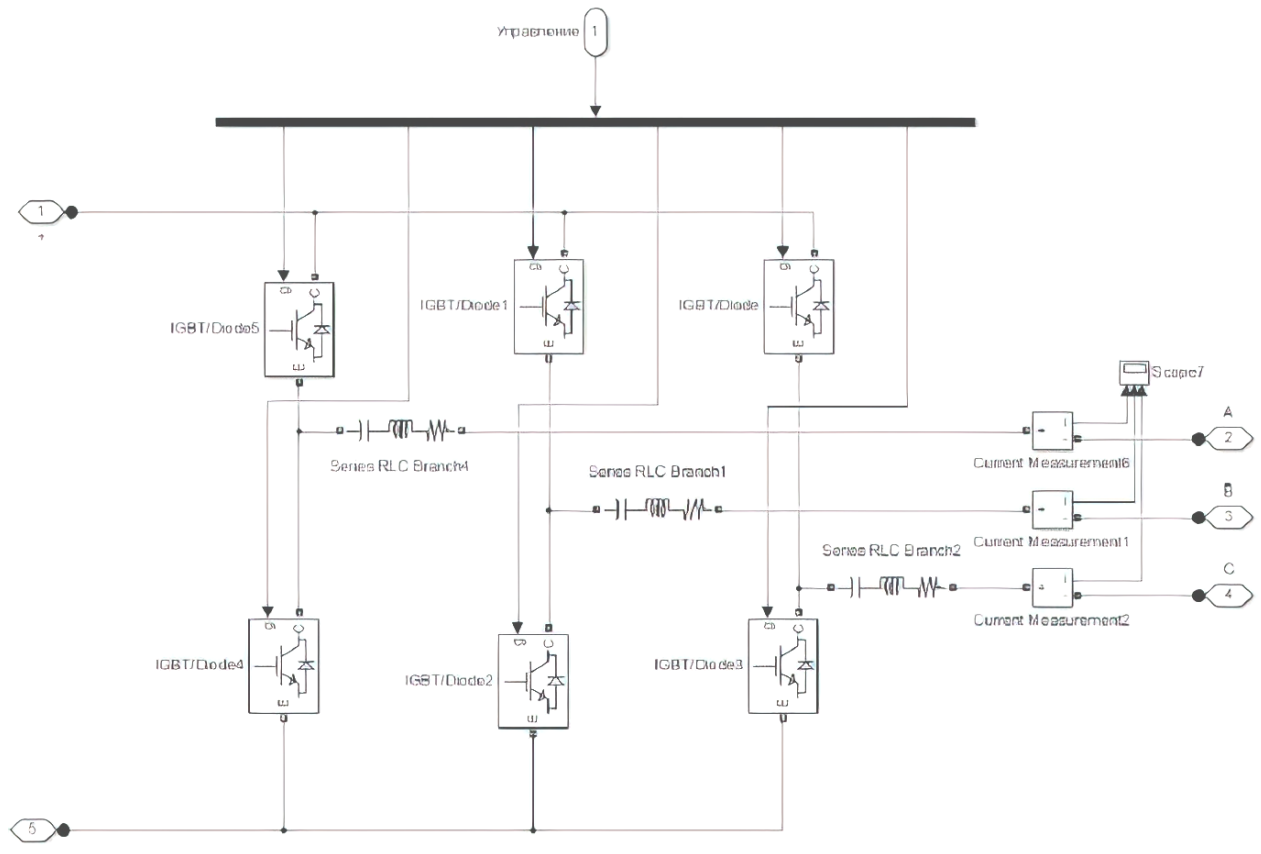


Рис. 3.10. Структура моделі блоку сонячного інвертора

Робота інвертора керується широтно-імпульсним сигналом, що надходить на кожен з шести транзисторів. Цей сигнал формується блоком управління, який реалізує необхідний алгоритм комутації напівпровідникових ключів. Параметри ключових транзисторів, що використовуються в інверторі, наведені на рис. 3.11.

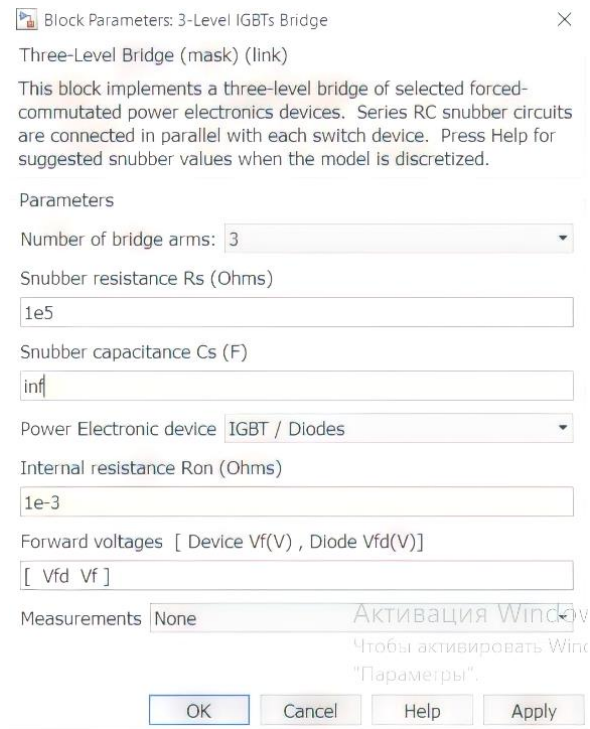


Рис. 3.11. Параметри моделі транзисторів

Для генерування необхідних керуючих сигналів використовується блок управління, схему якого наведено на рис. 3.12. Цей блок відіграє ключову роль в забезпеченні коректної роботи інвертора.

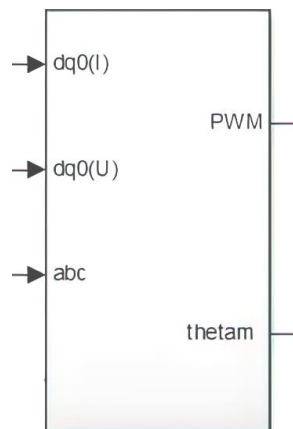


Рис. 3.12 Модель блок керування інвертором

Структурна схема даного блоку показана на рис. 3.13.

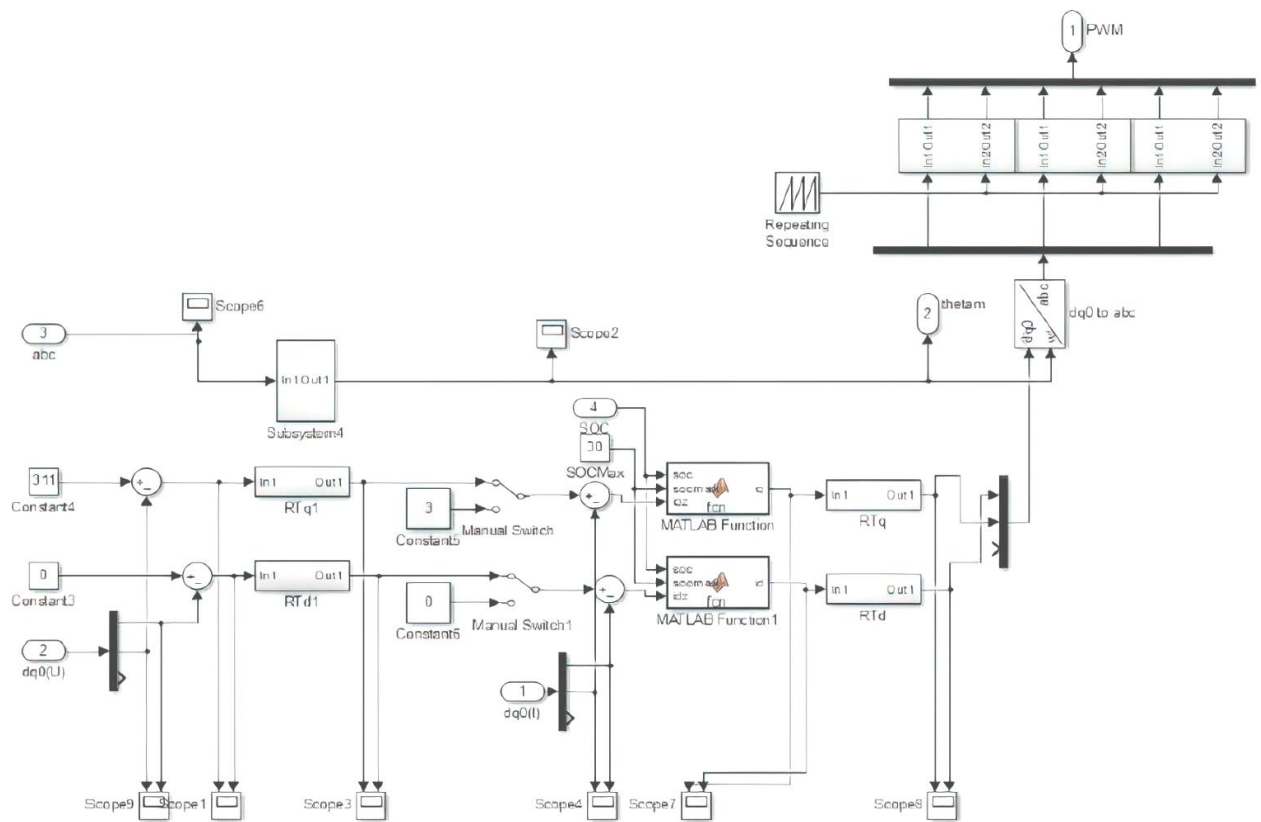


Рис. 3.13 Структурна схема блоку керування сонячним інвертором

Режими ведучого і веденого можна перемикати залежно від наявності напруги в мережі. Відповідний блок синхронізує мережу у режимі веденого, визначає наявність напруги для зміни режимів, а також задає кут у режимі ведучого. Технологія забезпечує стабільну роботу електричної системи, дозволяючи адаптуватися до різних умов її функціонування.

Розглянемо більш детально складові блоку керування інвертором (рис. 3.14)

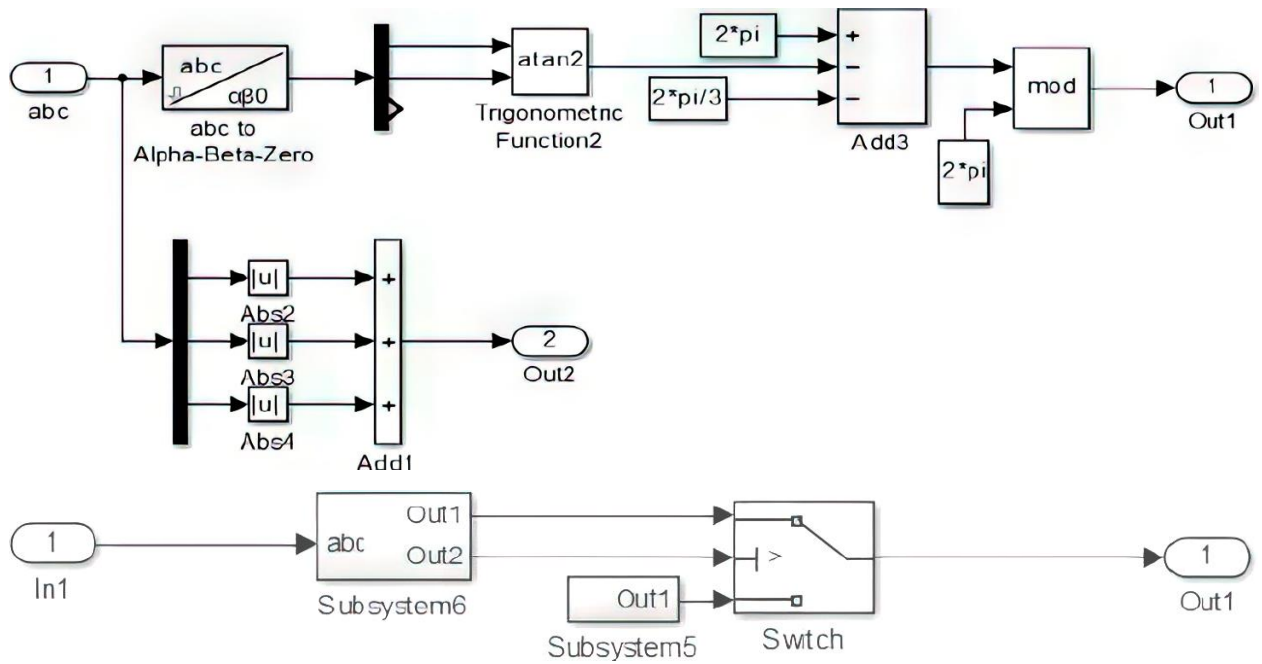


Рис. 3.14. Схема блоку синхронізації з мережею

На рис. 3.15 наведена схема регулятора контуру напруги

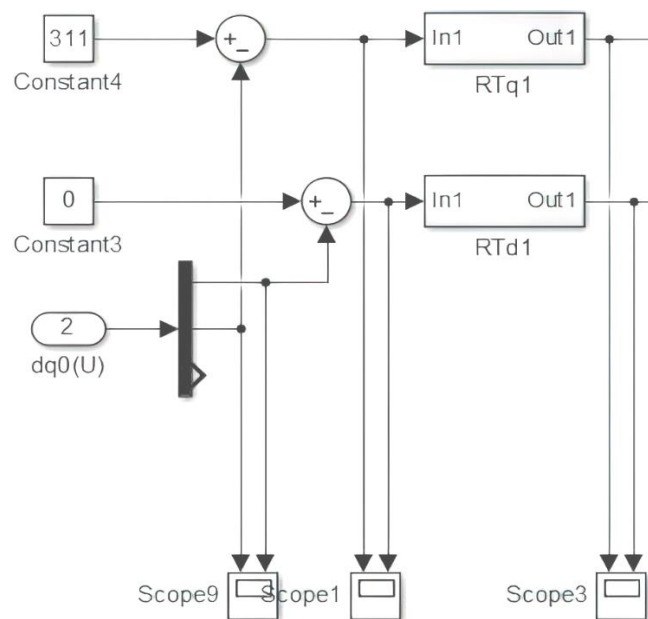


Рис. 3.15. Модель регулятора контуру напруги

Параметри моделі регулятора напруги показані на рис. 3.16:

PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design)

Controller: **PI** Form: **Parallel**

Time domain:

☒ Continuous-time

☐ Discrete-time

Main **PID Advanced** Data Types State Attributes

Controller parameters

Proportional (P): **5** [compensator formula](#)

Integral (I): **0.3** $P + I \frac{1}{s}$

Tune...

Initial conditions

Source: **internal**

Integrator: **0**

External reset: **none**

☐ Ignore reset when linearizing

☒ Enable zero-crossing detection

Рис. 3.16. Параметри моделі регулятора контуру напруги

На рис. 3.17 наведено модель контуру задання струму:

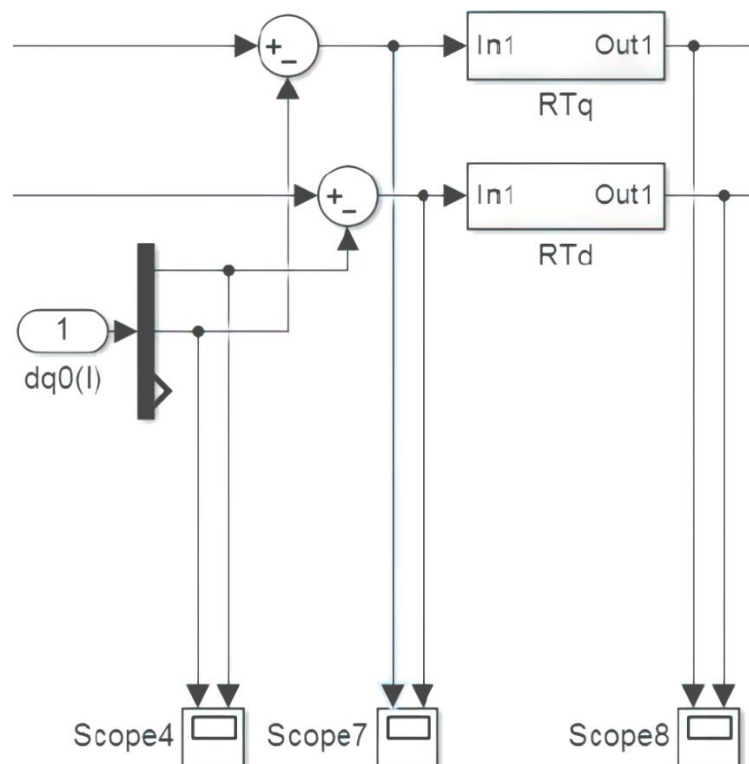


Рис. 3.17. Модель контуру регулятора струму

Параметри моделі цього регулятора показан на рис. 3.18

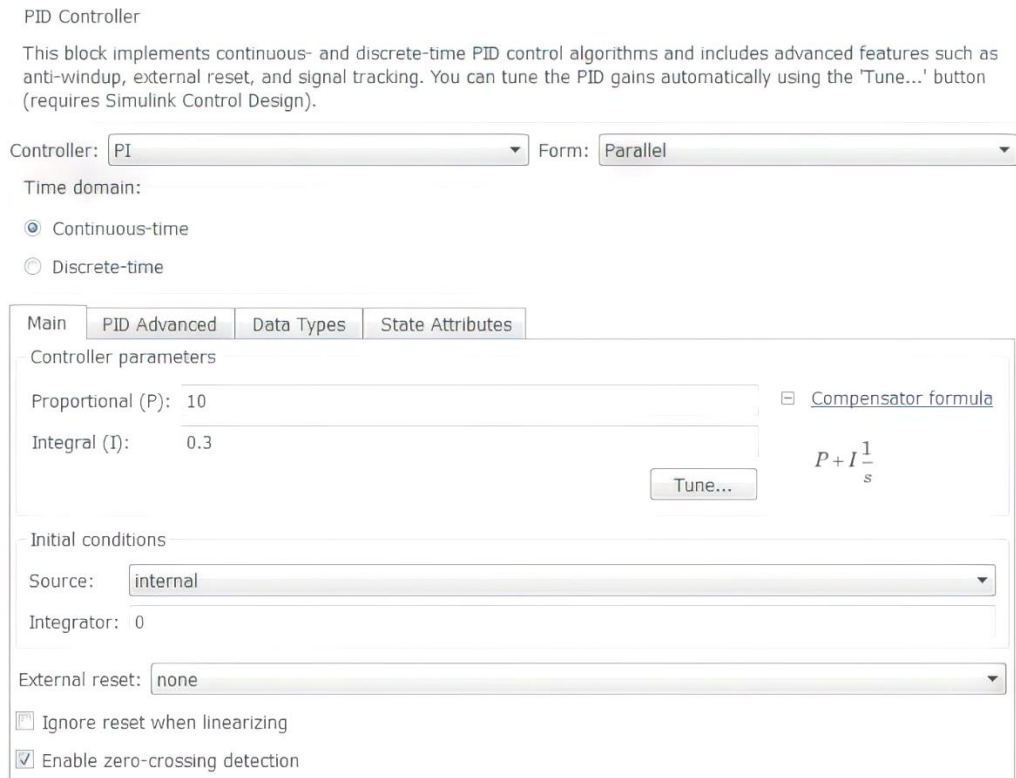


Рис. 3.18 Параметри моделі регулятора струму

Для перетворення заданих значень струму в трифазну систему потрібно використати блок зворотного перетворення Парка-Кларка (рис. 3.19). Це дозволяє отримати три фазні струми, які можна подавати на трифазну мережу:

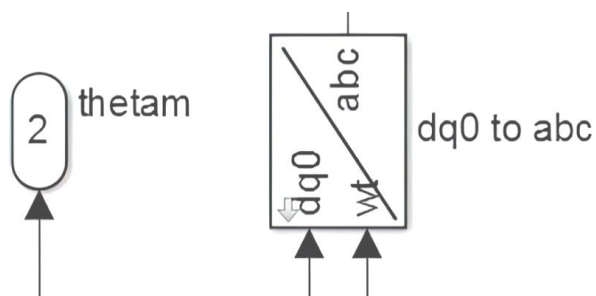


Рис. 3.19. Модель блоку зворотного перетворення

Блоки зворотного перетворення Парка-Кларка надходять на блоки, що генерують ШІМ-сигнал (рис. 3.20).

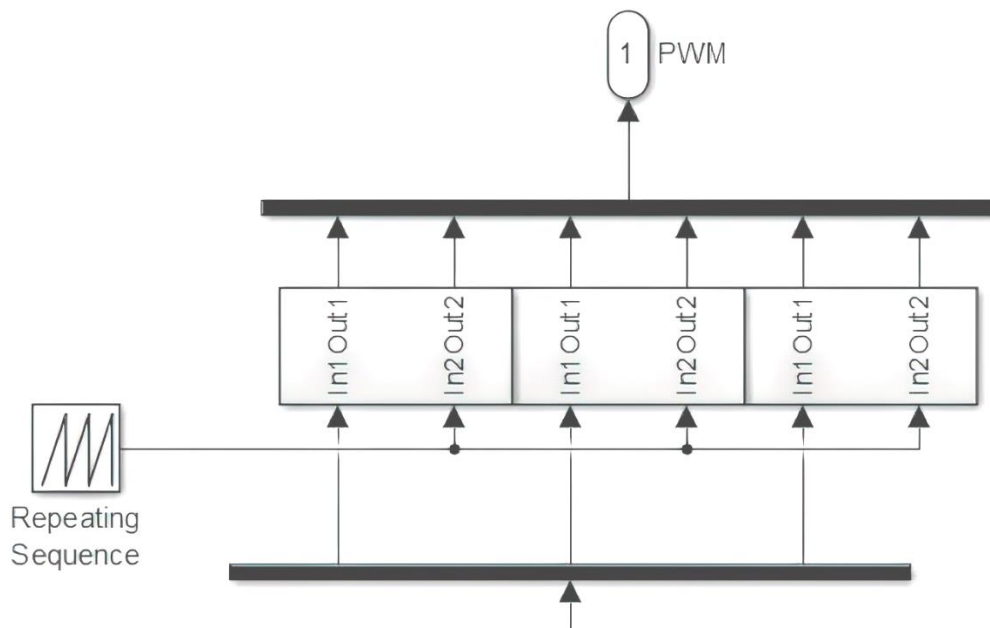


Рис. 3.20. Модель блоку генерації ШІМ-сигналу

Структурна схема моделі цього блоку показана на рис. 3.21.

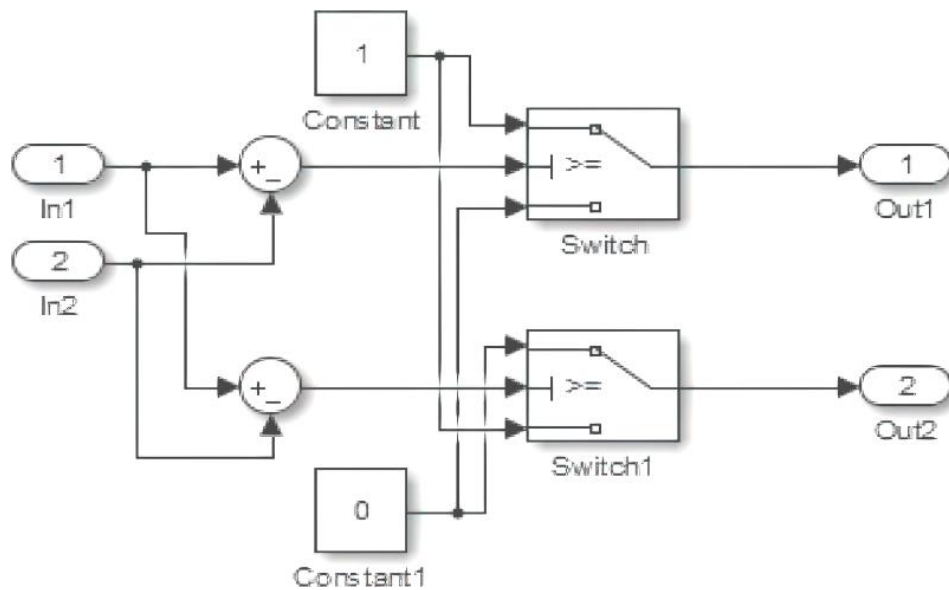


Рис. 3.21 Модель блоку генерації ШІМ-сигналу інвертора

Для створення контурів напруги та струму, а також для синхронізації інвертора з мережею, необхідно виконати ряд перетворень. Ці процеси ілюструє рис.3.22.



Рис. 3.22. Модель блоків перетворення

«abc to dq0» – пряме перетворення Парка-Кларка:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

«dq0 to abc» – зворотне перетворення:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

«abc to αβ0» – перехід від 3-фазної системи до 2-фазної:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Для здійснення перетворення Парка-Кларка, необхідним є подання на вхід блоку значення кутової частоти ωt . Цей алгоритм дозволяє виконувати пряме і зворотне перетворення сигналів. Варто додати, що при виконанні Rotating Frame Alignment за умови $\omega t = 0$ необхідно встановити значення "Aligned with Phase A axis". В іншому випадку, інвертор може генерувати

струм, який не співпадає за фазою зі струмом мережі. Це призведе до неправильного підсумовування струмів на навантаженні та збільшення струму, який видає інвертор.

3.1.3. Комп'ютерне моделювання електричного навантаження.

Модель блоку навантаження показаний на рис. 3.23:

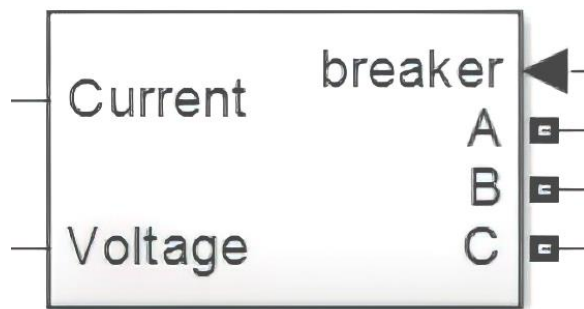


Рис. 3.23 Модель блоку електричного навантаження

Для демонстрації функціональних можливостей розробленої системи було застосовано декілька варіантів тестового навантаження. Основним елементом випробувального стенду виступав комплект однакових за номіналом резистивних елементів, з'єднаних за схемою, що зображена на рисунку 3.24.

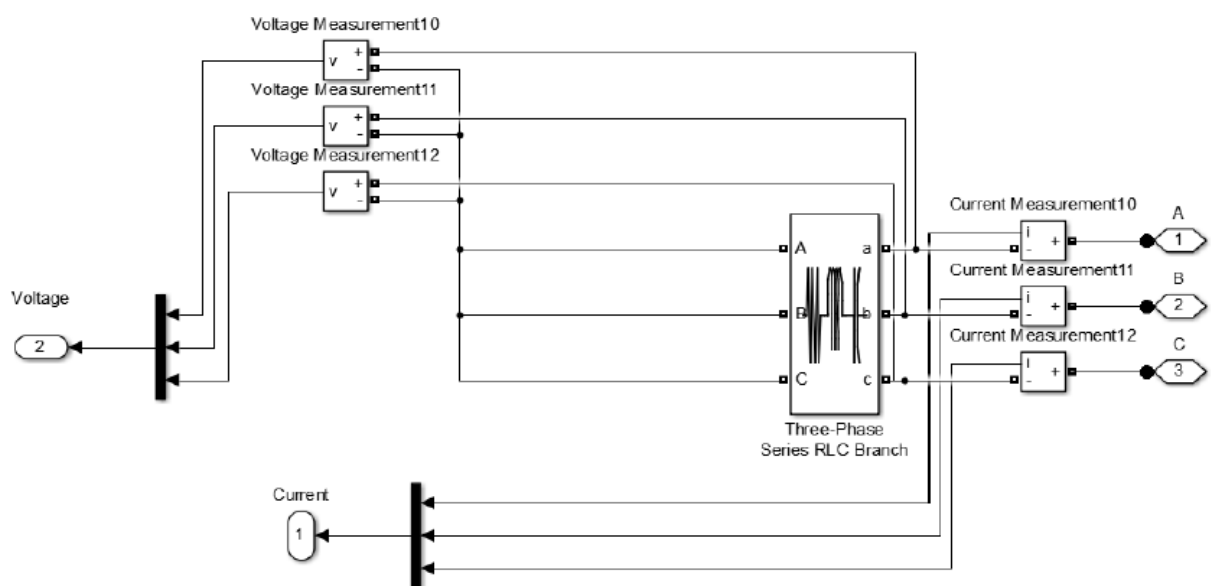


Рис. 3.24 Модель блоку електричного навантаження для варіанту резисторів з однаковим значенням опорів

Альтернативна конфігурація випробувального стенду передбачала використання подвійних резистивних елементів на кожен фазний вивід. При цьому схема складалася з постійно підключеного базового резистора та додаткового елемента опору, що комутувався за допомогою спеціального перемикача. Керування комутацією здійснювалося через зовнішній контрольний сигнал, як показано на схематичному зображенні (рис.3.25).

В обох конфігураціях випробувального стенду блок навантаження оснащено спеціалізованими інформаційними виводами – Current для моніторингу струму та Voltage для відстеження напруги.

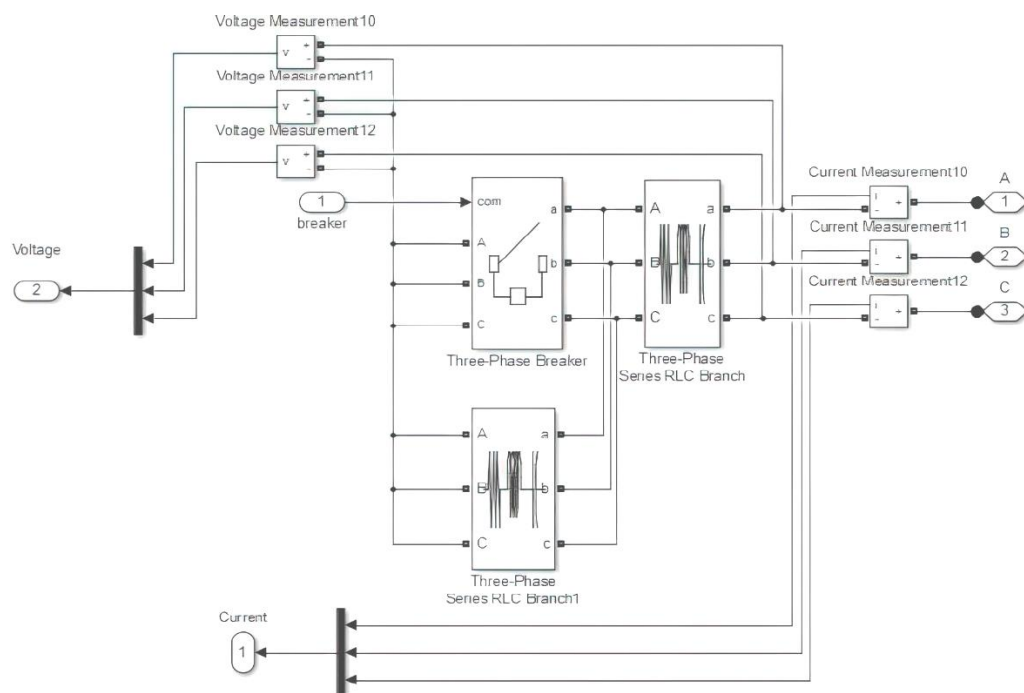


Рис. 3.25. Модель блоку електричного навантаження з послідовно з'єднаними резисторами

3.2 Комп'ютерне моделювання СЕС в режимі активного фільтру мережі

Запропонована сонячна електростанція (СЕС) здатна функціонувати не лише як генератор електроенергії, але й як активний фільтруючий елемент, що оптимізує параметри якості електропостачання. Для детального дослідження такого режиму роботи було розроблено комп'ютерну модель у

середовищі Matlab/Simulink, яка відтворює взаємодію всіх компонентів системи.

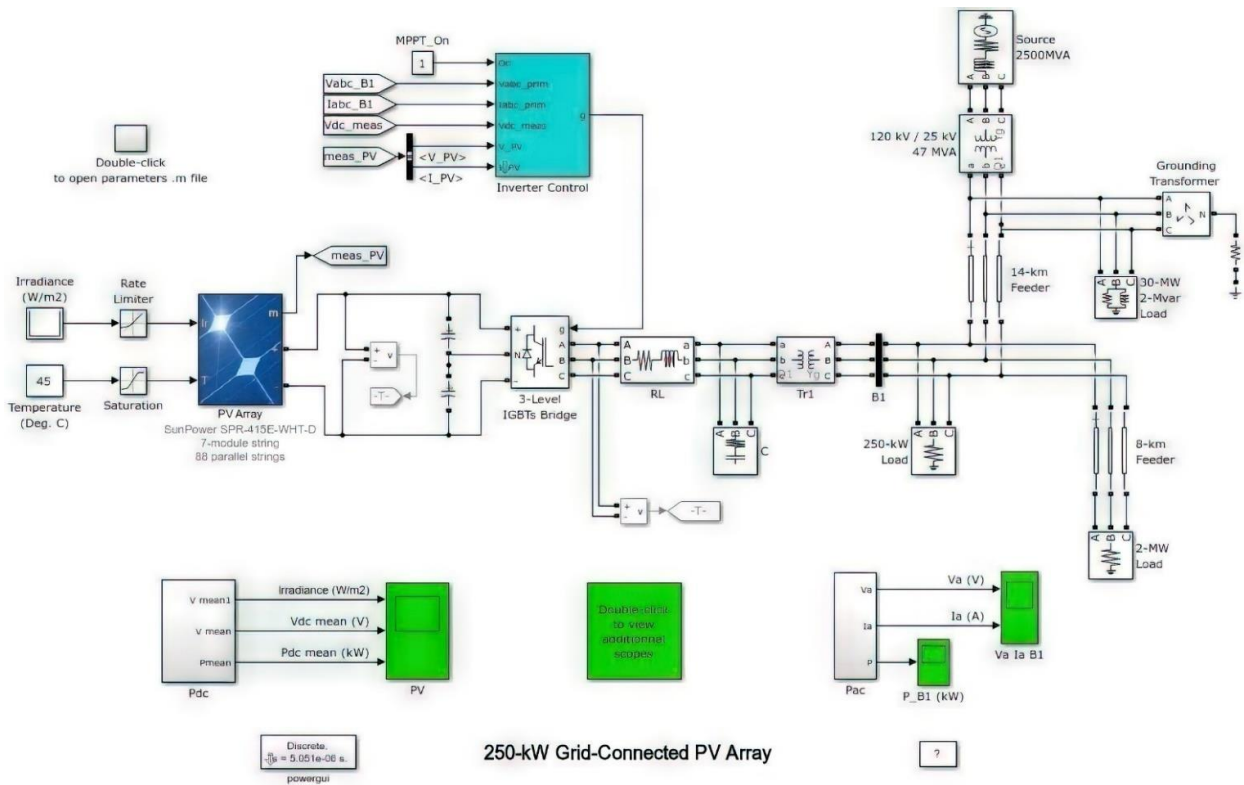


Рис. 3.26. Модель мережі з СЕС

При створенні точної математичної моделі необхідно виконати детальний розрахунок параметрів кожної обмотки трансформатора окремо. Зокрема, визначенню підлягають активні опори, індуктивні опори розсіювання та власні індуктивності для всіх рівнів напруги – високої (ВН), низької (НН) та, за наявності, середньої напруги (СН). Ключовим параметром для розрахунку характеристик трансформатора є напруга короткого замикання U_K , % яку необхідно визначити окремо для кожної пари обмоток. У випадку двообмоткового трансформатора, U_K обчислюється як відносна величина:

$$U_{K(B)} = U_{K(H)} = 0,5U_K \quad (3.20)$$

Параметри обмоток трансформатора, а саме їх активний опір r_T у омах, повний Z_T та реактивний X_T імпеданс, а також величина індуктивності L_T у генрі, визначаються за допомогою наступних математичних співвідношень, що детально описані в фундаментальній праці:

$$r_T = 3 \cdot \frac{P_K \cdot U_\Phi^2}{S_{T_НОМ}^2} \quad (3.21)$$

$$Z_T = 3 \cdot \frac{u_K}{100} \frac{U_\Phi^2}{S_{T_НОМ}} \quad (3.22)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2} \quad (3.23)$$

$$L_T = \frac{X_T}{2\pi f} \quad (3.24)$$

У представленій електричній схемі моніторинг та фіксація даних здійснюються за допомогою вимірювальних модулів серії «Pac, Pdc». Ці спеціалізовані блоки забезпечують точне вимірювання фазних електричних параметрів (струмів та напруг), а також контролюють ключові показники навколишнього середовища.

З метою оптимізації якісних показників електричної енергії в мережі пропонується використати сонячну електростанцію (СЕС) як активний фільтр гармонійних складових. Структурна організація розробленої моделі представлена на рисунку 3.27, де детально показано взаємозв'язок основних компонентів системи. На рисунках рис. 3.28 та 3.29 відповідно наведено розгорнуті схеми ключових функціональних блоків - Grid (мережевого компонента) та SES (сонячної електростанції):

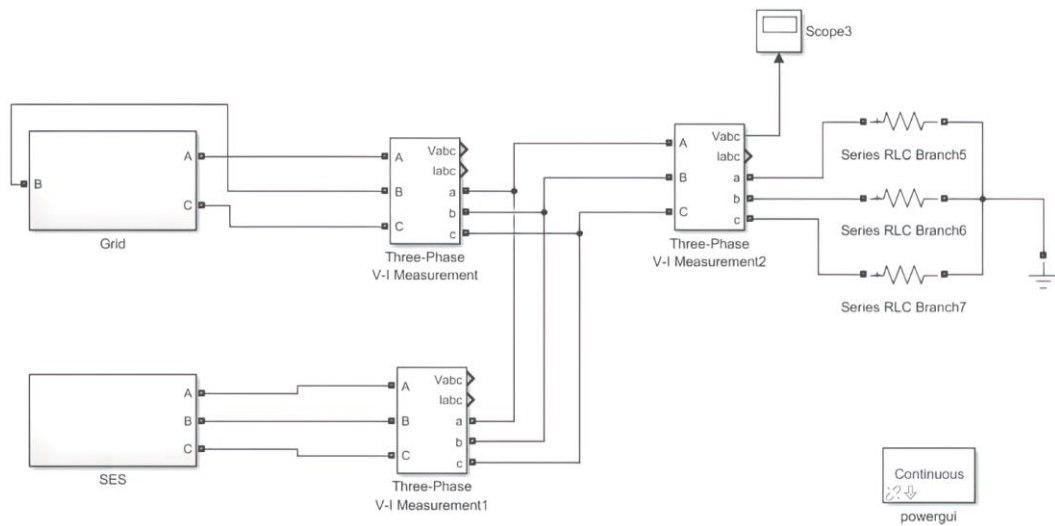


Рис. 3.27. Модель, для дослідження СЕС в режимі активного фільтру

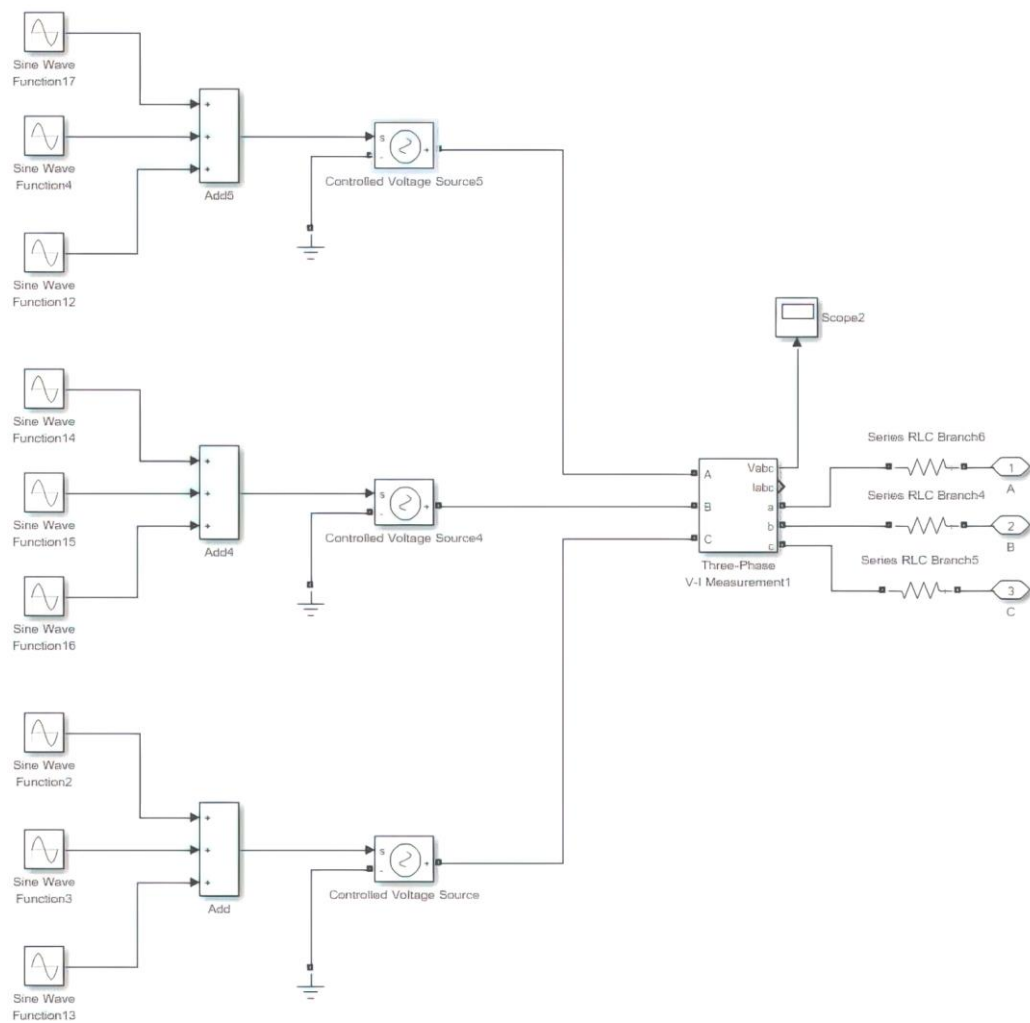


Рис. 3.28. Модель блоку Grid

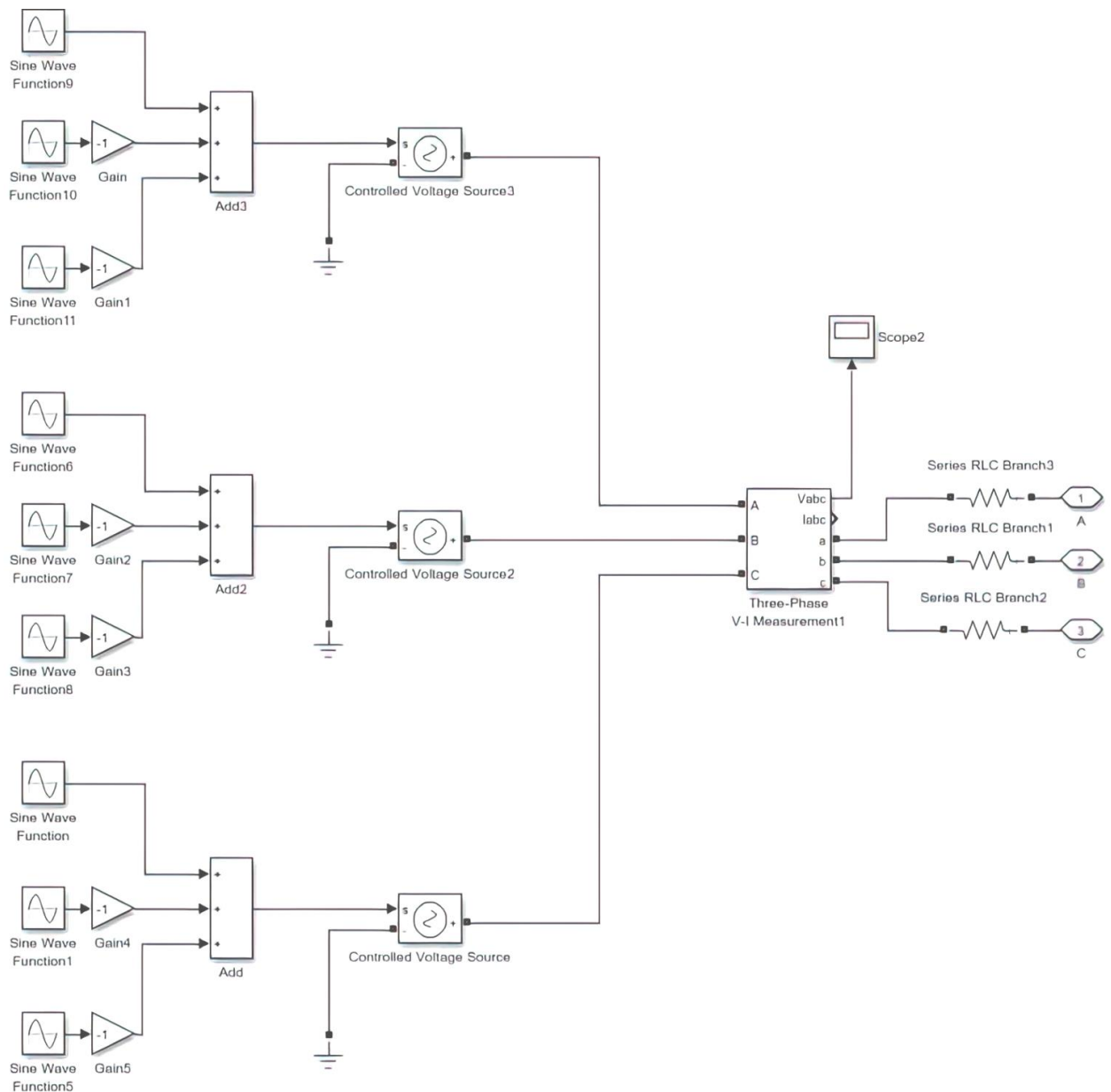


Рис. 3.29. Модель блоку SES

3.2.1. Визначення параметрів активного силового фільтру.

Принцип функціонування силових активних фільтрів базується на генерації компенсаційного струму, який за амплітудою дорівнює небажаним гармонікам, але має протифазну спрямованість. Активний фільтр виступає як кероване джерело струму, що формує компенсаційні гармонічні складові з фазовим зміщенням на 180° відносно гармонік, які продукуються навантаженням. Активний фільтр ефективно нейтралізує гармонічні складові, присутні у струмі споживача, забезпечуючи тим самим синусоїдальну форму струму, що надходить від джерела живлення. При

цьому досягається синфазність струму та напруги відповідної фази мережі. Описаний підхід є універсальним та може бути реалізований для різноманітних видів електричного навантаження. За таких умов електророзподільна мережа взаємодіє з комбінацією нелінійного споживача та активного фільтруючого пристрою як з еквівалентним лінійним опором. На рисунку рис. 3.30 представлено функціональну схему, що демонструє основні елементи та принцип функціонування силового активного фільтра.

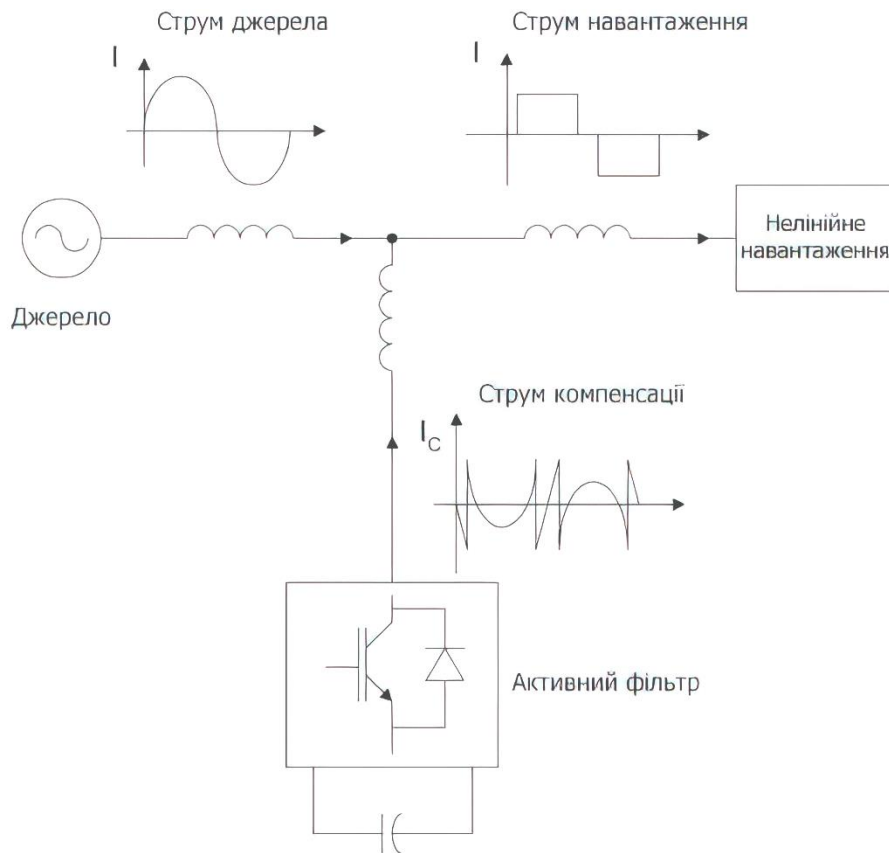


Рис. 3.30. Ілюстрація до принципу дії активного фільтра

3.2.2. Система автоматичного керування СЕС в режимі активного фільтру. Система керування активним силовим фільтром виконує три ключові функції: обчислення еталонної форми струму окремо для кожної фази інверторного блоку, стабілізацію напруги на заданому значенні та формування керуючих імпульсів. Структурну організацію та взаємозв'язки

між компонентами системи керування силовим активним фільтром відображено на рисунку 3.31.

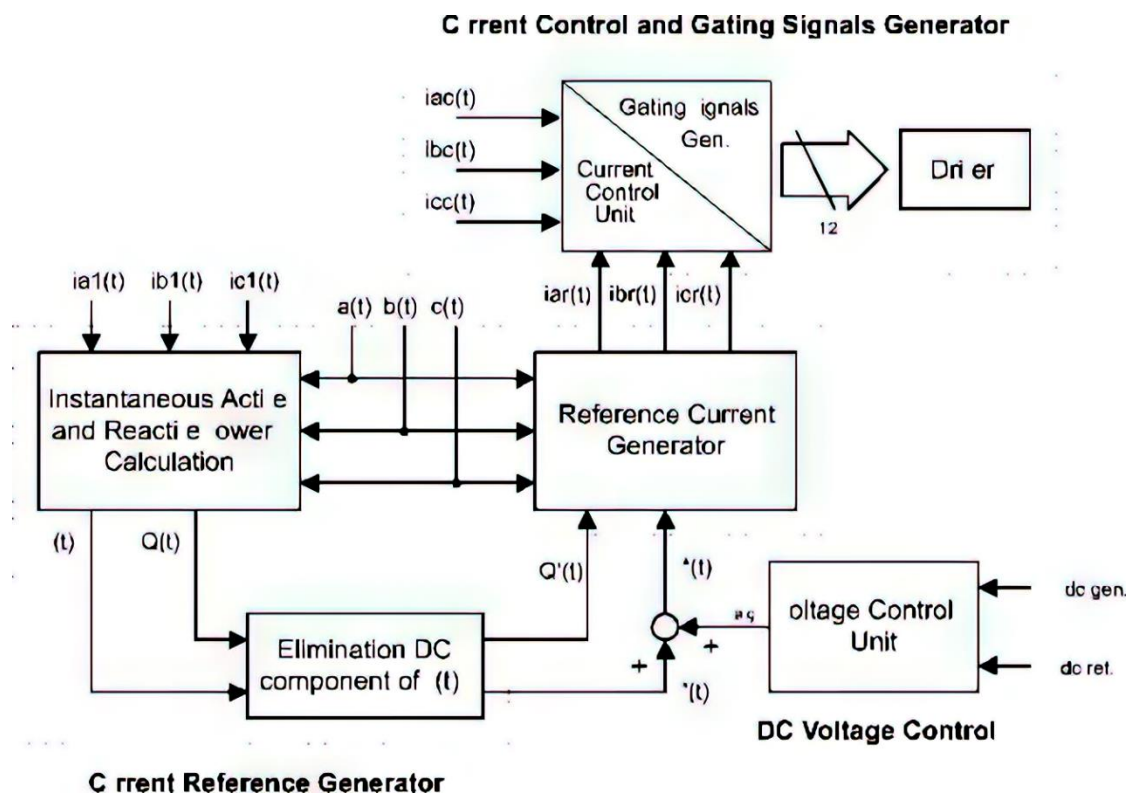


Рис. 3.31. Модель системи автоматичного керування активним фільтром

Створення опорного струму необхідне з двох ключових причин: компенсування гармонічних складових струму споживача та забезпечення стабільного рівня напруги на накопичувальному конденсаторі. Продуктивність та якість роботи активного фільтра визначається його спроможністю максимально точно та швидко відтворювати форму опорного сигналу з мінімальними часовими затримками.

Існує широкий спектр методів розрахунку та формування опорного струму, який застосовується для нейтралізації впливу нелінійних споживачів електроенергії. Основне призначення активних фільтрів полягає у двох ключових аспектах: збалансування реактивної складової потужності та усунення низькочастотних гармонічних спотворень, що виникають внаслідок роботи нелінійних навантажень. Метод визначення опорного струму інвертора, що базується на теорії миттєвої реактивної потужності (відомий як

теорія Акагі), здобув широке визнання завдяки своїй ефективності та практичній цінності. Сутність цього підходу полягає у математичному перетворенні традиційної трифазної системи координат (a,b,c) у двовимірну систему ортогональних координат (α та β) (рис. 3.32).

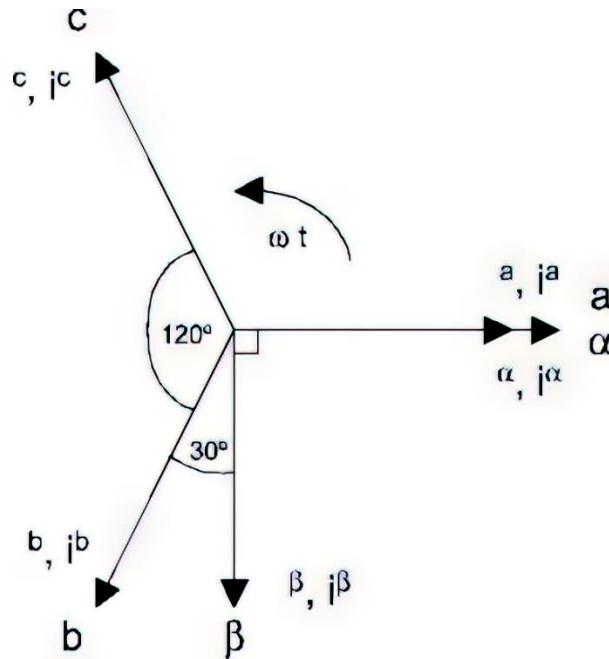


Рис. 3.32. Векторна діаграма перетворення систем координат abc- $\alpha\beta$

Для визначення миттєвих параметрів електричних величин у системі ортогональних координат α - β використовують наступні математичні залежності:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (3.25)$$

Описана математична трансформація стає можливою та коректною виключно за дотримання двох ключових умов: $u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0$, наявності збалансованого режиму та синусоїдальної форми напруг у системі.

У системі ортогональних координат $\alpha\beta$ розрахунок миттєвих значень потужності здійснюється наступним чином:

$$p(t) = u_{\alpha}(t) \cdot i_{\alpha}(t) + u_{\beta}(t) \cdot i_{\beta}(t), \quad (3.26)$$

$$q(t) = -u_{\alpha}(t) \cdot i_{\beta}(t) + u_{\beta}(t) \cdot i_{\alpha}(t), \quad (3.27)$$

Можна впевнено стверджувати, що функція $p(t)$ відповідає класичному визначенню миттєвої активної потужності у системі координат абс. Для глибшого розуміння концепції миттєвої реактивної потужності професор Хідекі Акаджі запропонував інноваційний підхід, ввівши новий векторний простір миттєвих значень, що описується математичним співвідношенням або відповідним векторним рівнянням:

$$\vec{q} = \vec{u}_{\alpha} \cdot \vec{i}_{\beta} + \vec{u}_{\beta} \cdot \vec{i}_{\alpha} \quad (3.28)$$

У тривимірному просторі розташований вектор $\vec{q}$ є перпендикулярним який утворює прямий кут із координатною площиною $\alpha\beta$. Слідуючи правилу правої руки в векторній алгебрі (коли великий палець вказує напрямок результуючого вектора), цей вектор q перетинає площину координат. При цьому важливо зазначити, що компонента $\vec{u}_{\alpha}$ створює ортогональність із базисним вектором $\vec{i}_{\beta}$, в той час як складова $\vec{u}_{\beta}$ розміщена перпендикулярно до одиничного вектора $\vec{i}_{\alpha}$. В результаті математичного аналізу виявляється, що вектор $\vec{q}$ не може представляти миттєву потужність системи. Це пояснюється тим, що він формується як векторний результат взаємодії між напругою однієї фази та струмом іншої фази, а не їх прямим добутком у межах однієї фази. На відміну від попереднього випадку, скалярні добутки

$u_\alpha i_\alpha$ та $u_\beta i_\beta$ у рівнянні 3.25, безпосередньо відображають миттєву потужність системи. У рівнянні 3.27 професор Акаджі запровадив новаторську концепцію - 'миттєву уявну потужність'. Ця інноваційна електрична величина визначається через специфічний добуток миттєвих значень напруги та струму різних фаз.

На основі теорії миттєвої потужності, співвідношення між струмами в ортогональній системі координат α - β та миттєвою потужністю можна представити наступним чином:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Декомпозиція струмів у координатній площині α - β може бути представлена як сукупність декількох компонентів:

$$i_{\alpha p} = \frac{u_\alpha p}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (3.30)$$

$$i_{\alpha q} = \frac{u_\beta q}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (3.31)$$

$$i_{\beta p} = \frac{u_\beta p}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (3.32)$$

$$i_{\beta q} = \frac{-u_\alpha q}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad (3.33)$$

Розглянувши математичні вирази, представлені формулами (3.26) і (3.27), можемо здійснити декомпозицію параметрів p і q , розділивши їх на дві

ключові частини. Перша частина відображає сталі величини, тоді як друга включає змінні компоненти систем:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (3.34)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (3.35)$$

Щоб ефективно нейтралізувати гармонічні спотворення, які виникають внаслідок роботи нелінійних споживачів електроенергії, керуючий сигнал активного силового фільтра має охоплювати три ключові компоненти потужності: $\tilde{p}$, $\bar{q}$, $\tilde{q}$. У даній ситуації опорний струм для фільтра визначається за допомогою наступної формули:

$$\begin{bmatrix} i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Компенсуючі струми, зокрема струми нульової послідовності, обчислюються за допомогою такої формули:

$$\begin{bmatrix} i_{c,a}^* \\ i_{c,b}^* \\ i_{c,c}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Наведені блоки, які потрібні для формування опорного струму, визначеного за формулою (3.37), на рисунку 3.33:

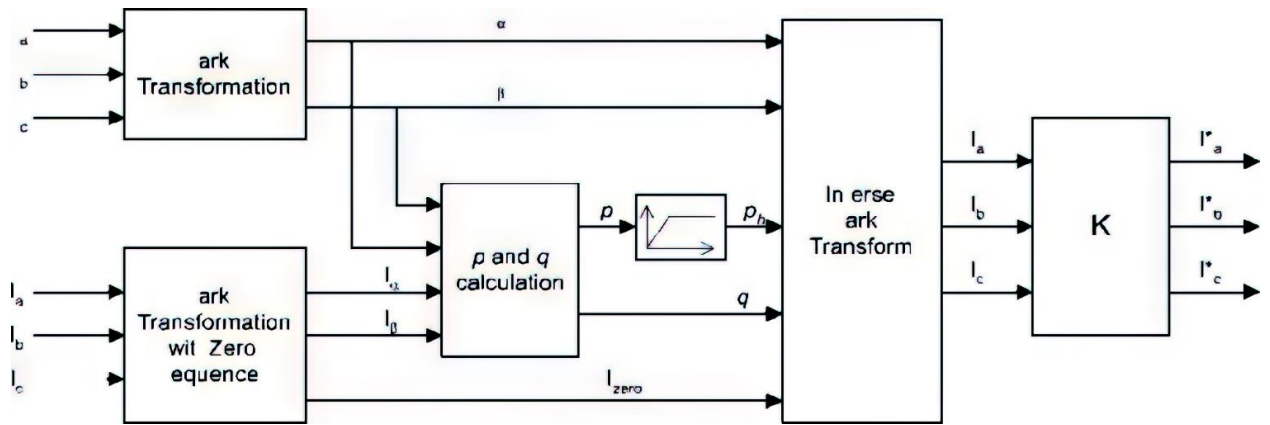


Рис. 3.33. Модель блоку створення опорного струму

P-q теорія має суттєву перевагу в тому, що вона дозволяє представити потужності (як активну, так і реактивну) через сталі компоненти. Виділення цих величин здійснюється шляхом застосування низькочастотної фільтрації. Завдяки тому, що цільовий сигнал має постійний характер в системі координат $\alpha\beta$ процес його фільтрації демонструє стійкість до фазових спотворень, які можуть виникати при роботі низькочастотного фільтра. Така особливість суттєво підвищує ефективність компенсації гармонік активним фільтром.

Продуктивність та якість роботи активних фільтрів значною мірою визначається особливостями побудови системи регулювання струму. При цьому технічна реалізація модуляційних процесів в таких фільтрах безпосередньо пов'язана з обраним алгоритмом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

На зображенні 3.34 продемонстровано принцип трикутної модуляції, що базується на зіставленні похибки сигналу з опорною трикутною хвилею, яка має сталі параметри амплітуди та частоти. Перед здійсненням компарації з трикутним сигналом відбувається попередня обробка сигналу похибки через пропорційно-інтегральний регулятор (PI-регулятор), що забезпечує належне підсилення.

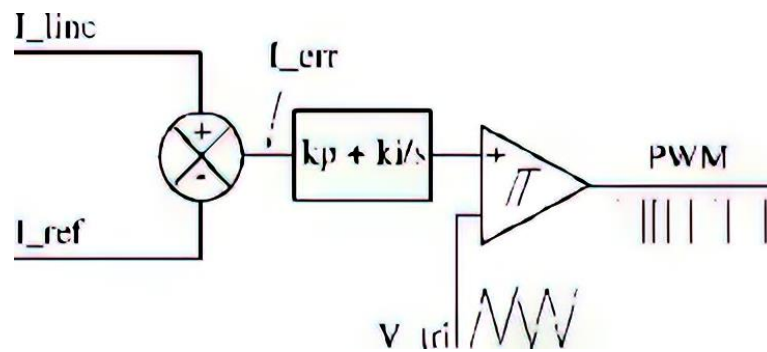


Рис. 3.34 Схема роботи трикутного ШІМ

3.2.3. Розрахунок параметрів конденсатора. Динамічні коливання споживаної навантаженням потужності викликають флуктуації напруги накопичувального конденсатора. Регулювання розмаху таких напругових осциляцій досягається шляхом оптимального підбору ємнісних параметрів конденсатора. Варто підкреслити, що система регулювання напруги в ланці постійного струму забезпечує стабілізацію потенціалу накопичувального конденсатора протягом певної кількості робочих циклів. Розрахункова величина ємності накопичувального елемента, визначена згідно з даним критерієм, перевищує параметри, що були встановлені виходячи з умови допустимого рівня пульсацій напруги в ланці постійного струму. Внаслідок збільшеної ємності накопичувального елемента досягається зниження коефіцієнта нелінійних спотворень напруги на конденсаторі. Для розрахунку необхідної ємності конденсатора застосовується наступне математичне співвідношення:

$$C = \frac{1}{\Delta U} \int_{t_1}^{t_2} i_C(t) dt \quad (3.38)$$

Усереднене значення струму в ланці постійного струму, що призводить до найбільшого перевищення напруги, можна розрахувати за допомогою наступного підходу: (3.39):

$$\int_{t_1}^{t_2} i_c(t) dt = I_{inv} \int_{t_1}^{t_2} [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 120^\circ)] dt \quad (3.39)$$

Спираючись на представлений теоретичний аналіз та виконані обчислення, розроблено комп'ютерну модель паралельного активного фільтра компенсації потужності, схематично зображену на рисунку 3.35:

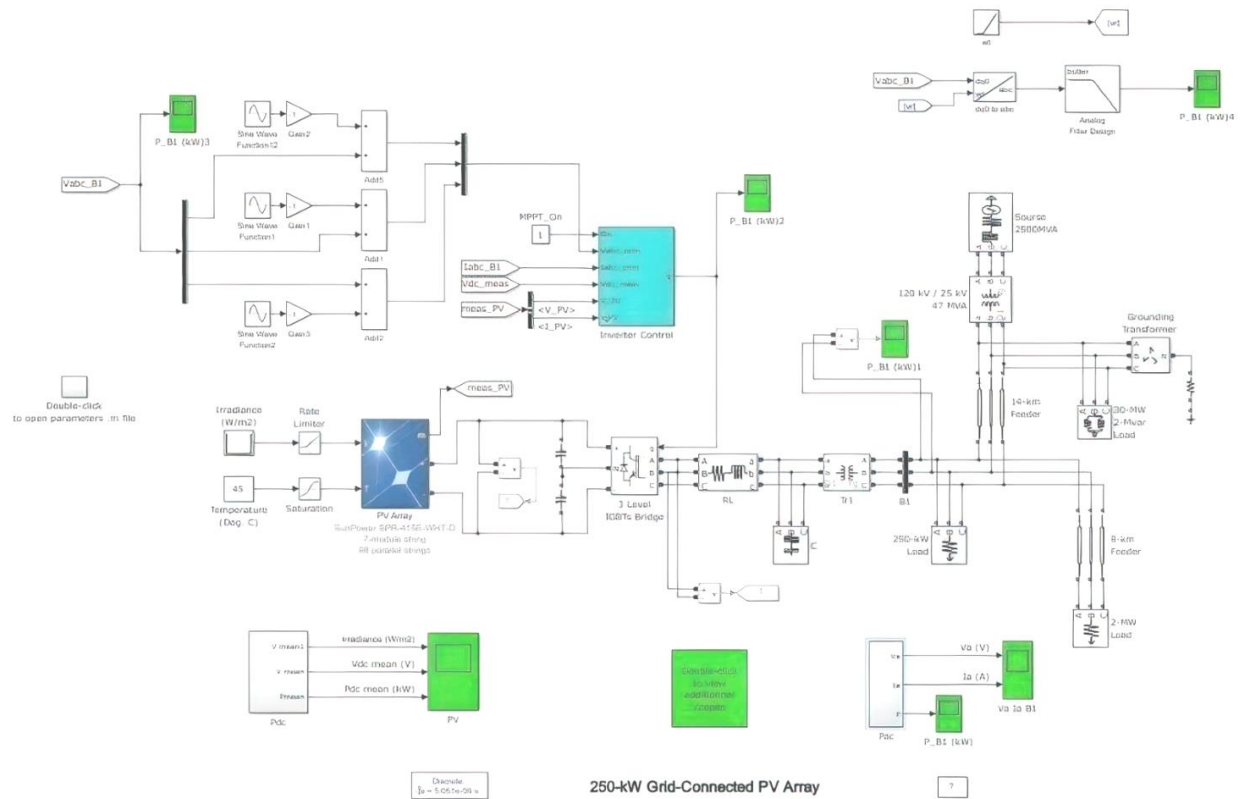


Рис. 3.35. Комп'ютерна модель паралельного активного фільтра

3.3 Аналіз результатів комп'ютерного імітаційного моделювання мережі з СЕС

В процесі дослідження проведено комплексне тестування системи з верифікацією наступних експлуатаційних режимів:

- функціонування пристрою як веденого елемента з регулюванням напруги;
- робота в режимі ведучого джерела з підтриманням стабільної

напруги;

- динамічний перехід з веденого стану в ведучий;
- функціонування як активного фільтра.

В ході дослідження різних режимів функціонування виникла необхідність внесення локальних модифікацій до моделі. Коригування торкнулися виключно підсистеми керування інвертором (рис. 3.12).

3.3.1. Підтримка рівня напруги в залежному режимі. Модель контуру струму наведена на рис. 3.36.

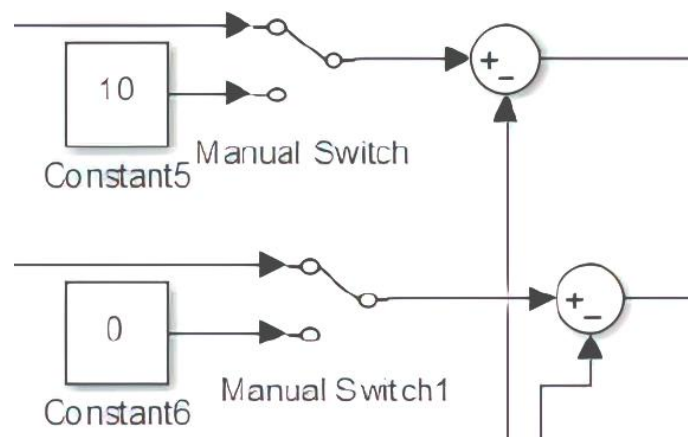


Рис. 3.36 Модель замкнутого контуру струму

На часовій позначці 50 мс було виконано коригування значення навантажувального опору. Динаміка процесу та отримані експериментальні характеристики відображені графічно на діаграмах 3.37 та 3.38.

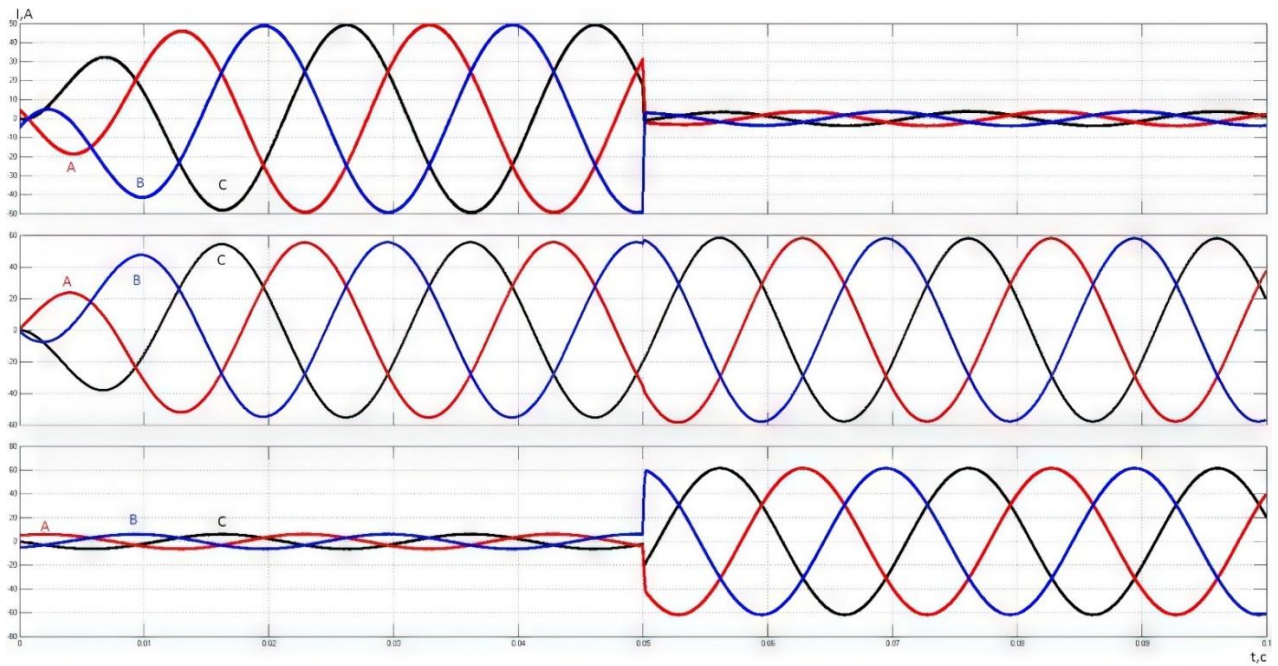


Рис. 3.37 Графіки струмів інвертора, генератора та навантаження

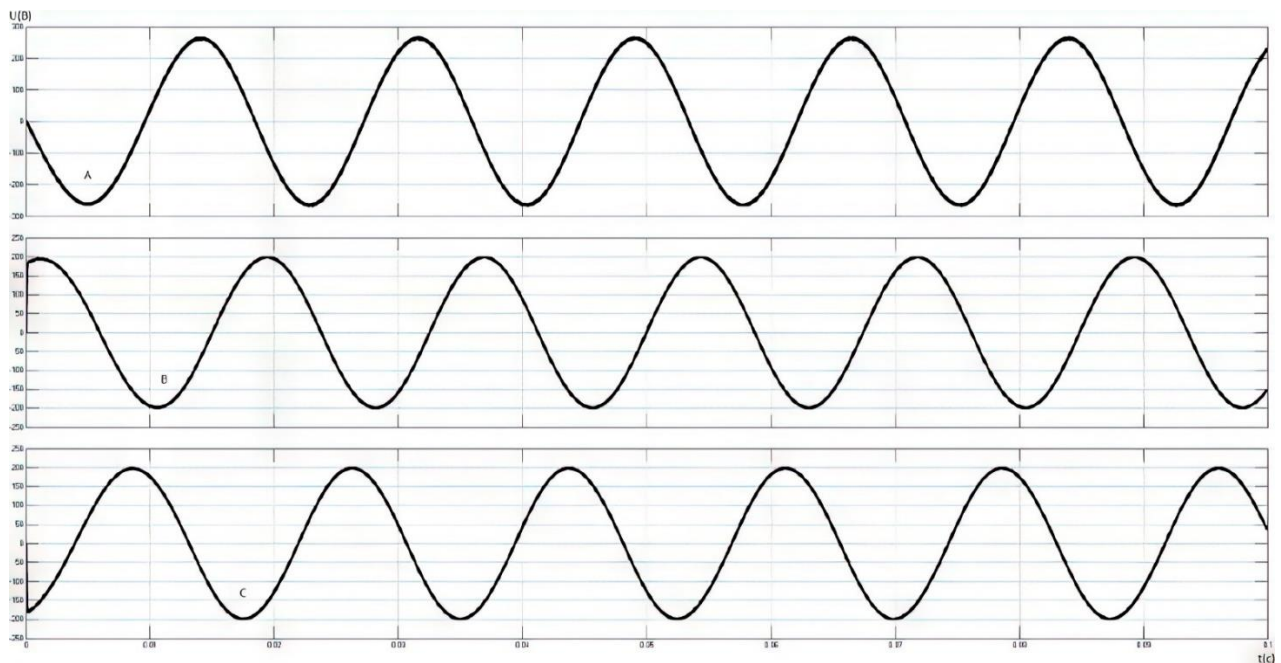


Рис. 3.38. Графіки фазних напруг на електричному навантаженні

3.3.2. Підтримка рівня напруги в ведучому режимі. Зміна операційного статусу системи від підпорядкованого до головного здійснюється за командою, що надходить із вищого рівня керування. Моделювання сигнальних процесів у системі реалізовувалось через бінарне

переключення станів між нульовим та одиничним рівнями для різних операційних режимів, що відображено на графічному представленні 3.39.

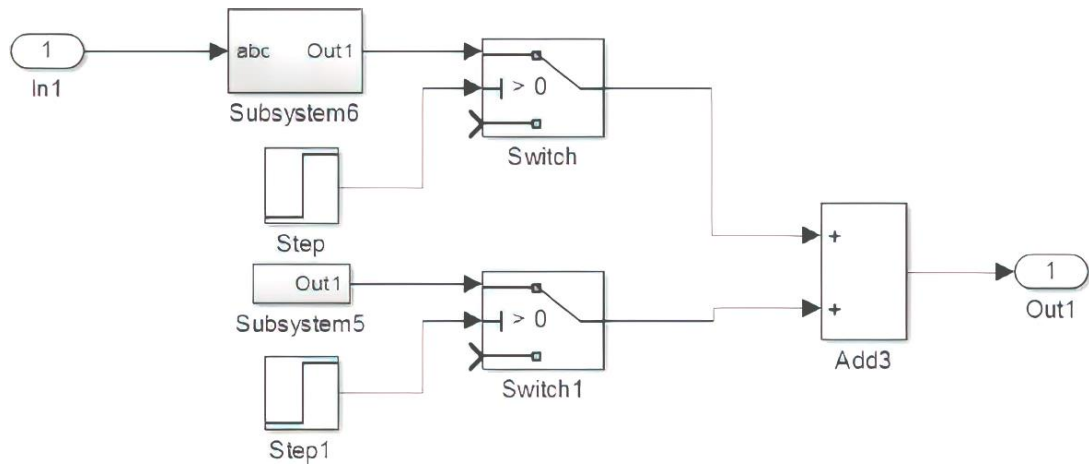


Рис. 3.39 Модель вибору режиму роботи

Експериментальне дослідження роботи інвертора характеризувалося фіксованими логічними рівнями для кожного з режимів функціонування. Зокрема, при налаштуванні пристрою як ведучого застосовувався стабільний високий рівень сигналу (логічна 1), тоді як для веденого режиму підтримувався незмінний низький рівень (логічний 0).

Графічні залежності, представлені на ілюстраціях 3.40 та 3.41, демонструють розподіл струмів через інвертор та елементи навантаження.

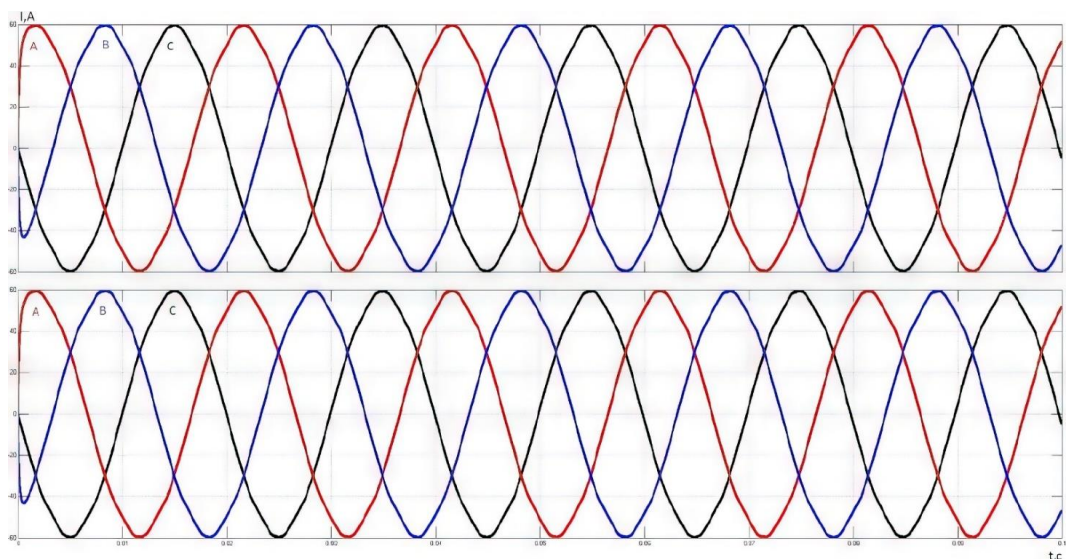


Рис. 3.40. Графіки струмів інвертору і навантаження

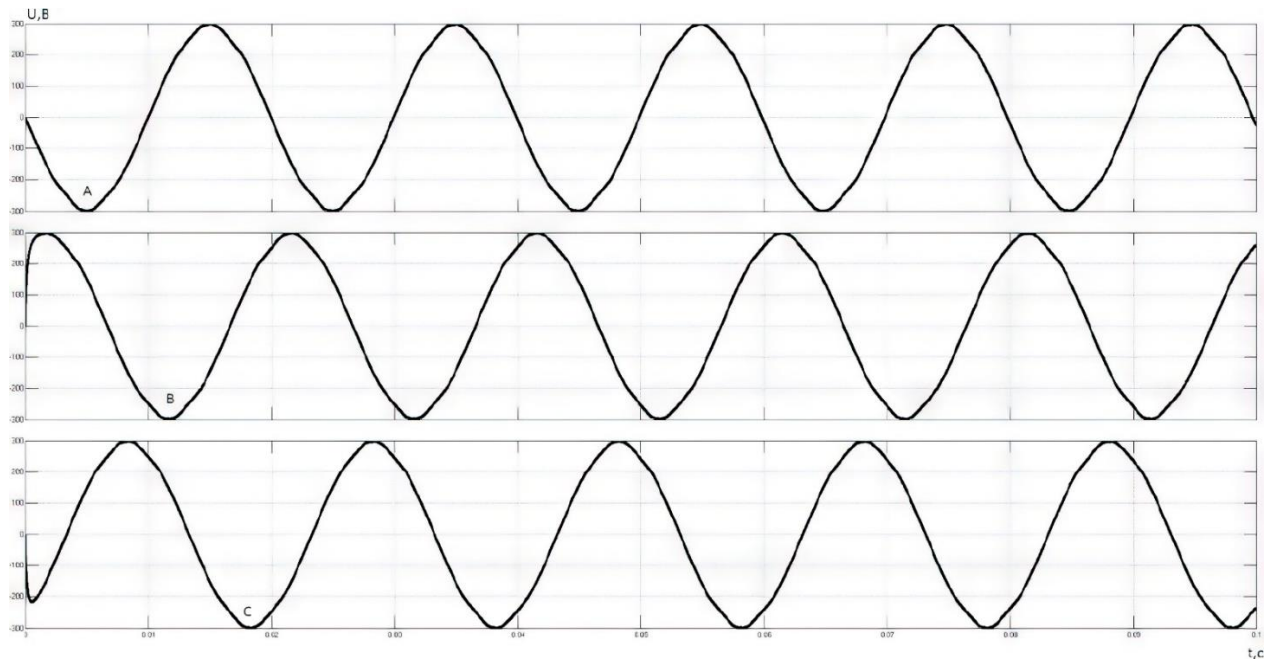


Рис. 3.41 Графік напруги на електричному навантаженні

3.3.3. Підтримка рівня напруги в процесі переходу від режиму провідного в режим залежного. Для реалізації динамічного переходу інвертора в режим ведучого було проведено модифікацію синхронізаційного блоку. Зокрема, внесені зміни торкнулися компонентів, відповідальних за синхронізацію з мережею та формування кутових параметрів струмової синусоїди. Ключовим моментом модифікації стало налаштування автоматичного перемикання режиму роботи на часовій позначці 0.05 секунди від початку моделювання.

На вихідному контурі генератора було інтегровано трифазний вимикач (Three-Phase Breaker), налаштований на спрацювання при досягненні часової відмітки 0.05 секунди. Детальна конфігурація параметрів цього комутаційного елемента відображена на графічному представленні 3.42.

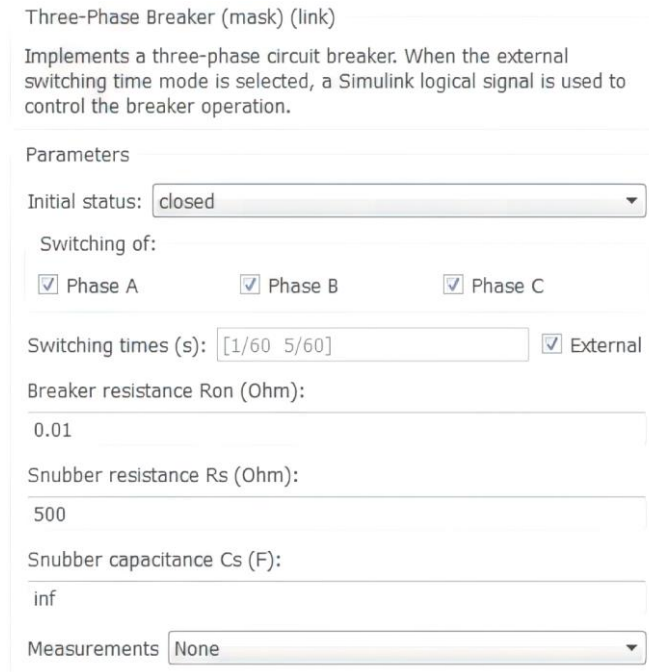


Рис. 3.42 Параметри моделі блоку вимикача

Для моніторингу режимів функціонування системи в синхронізаційно-кутовий блок було інтегровано вимірювальний прилад Scope3, візуалізація якого представлена на ілюстрації 3.43.

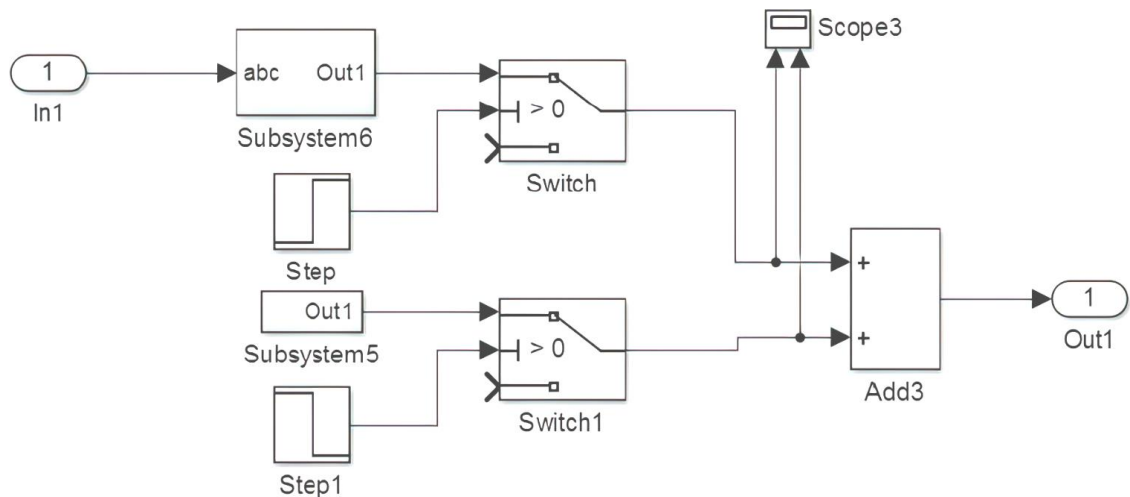


Рис. 3.43. Модель блоку вибору режимів роботи

При налаштуванні осцилографа в якості веденого пристрою, другий канал має відображати нульове значення. Натомість, коли прилад працює як ведучий, на екрані спостерігаємо діапазон значень, що варіюється від нуля до 2π радіан. У випадку зворотної конфігурації (тобто коли осцилограф

виступає ведучим) ситуація змінюється на протилежну. Проаналізуємо характерні криві електричних струмів у системі, представлені на графічному зображенні (рис.3.44), що демонструють взаємодію між основними компонентами: інвертором, генератором та навантаженням.

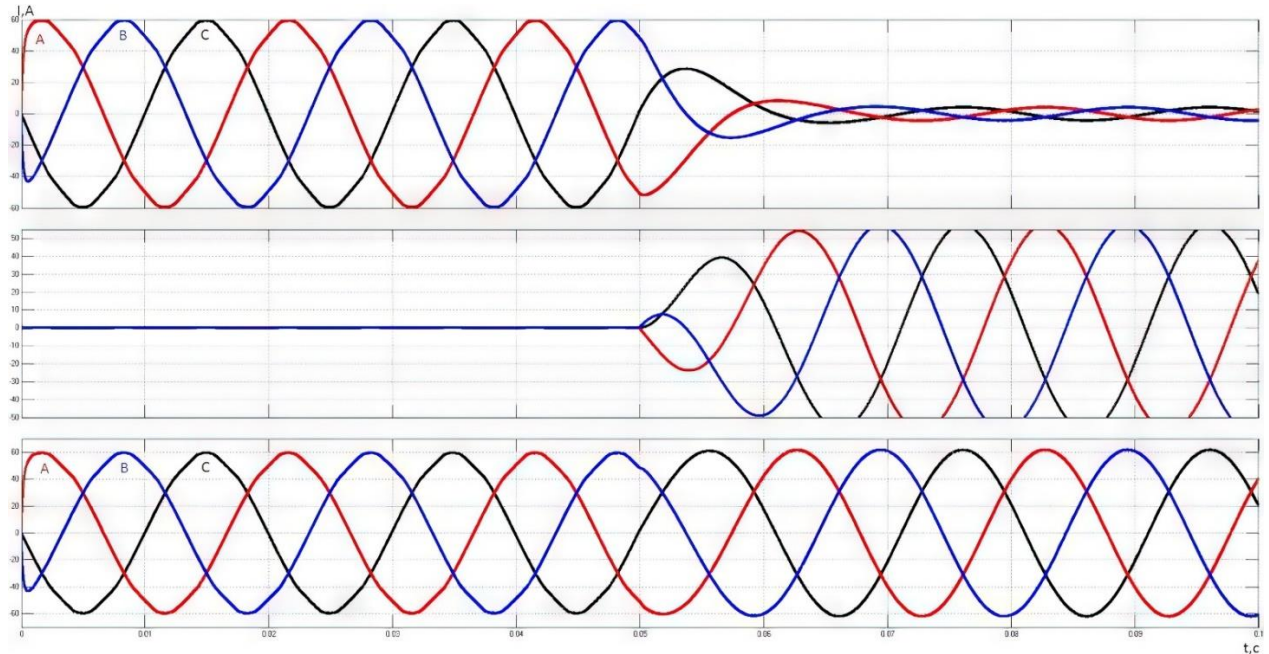


Рис. 3.44 Графіки струмів інвертора, генератора і електричного навантаження

Протягом початкових 50 мс система перебувала в стані, коли генераторна установка ще не здійснювала подачу електроенергії до електромережі. На основі експериментальних даних, зафіксованих вимірювальним осцилографом Scope3 (представлених на рисунку 3.45), спостерігається характерна зміна режиму функціонування системи.

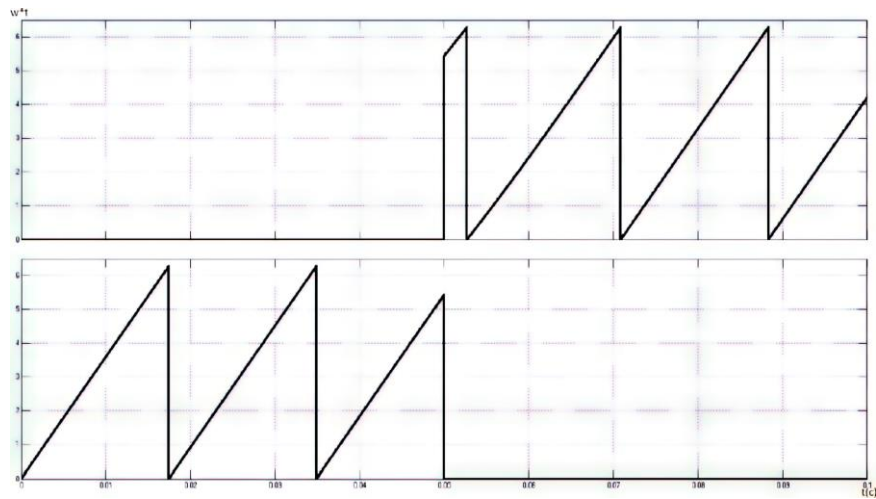


Рис. 3.45 Завдання значень кутів в режимах провідного та залежного

На основі експериментальних даних, зафіксованих вимірювальним осцилографом Score3 (представлених на рисунку 3.46), спостерігається характерна зміна режиму функціонування системи.

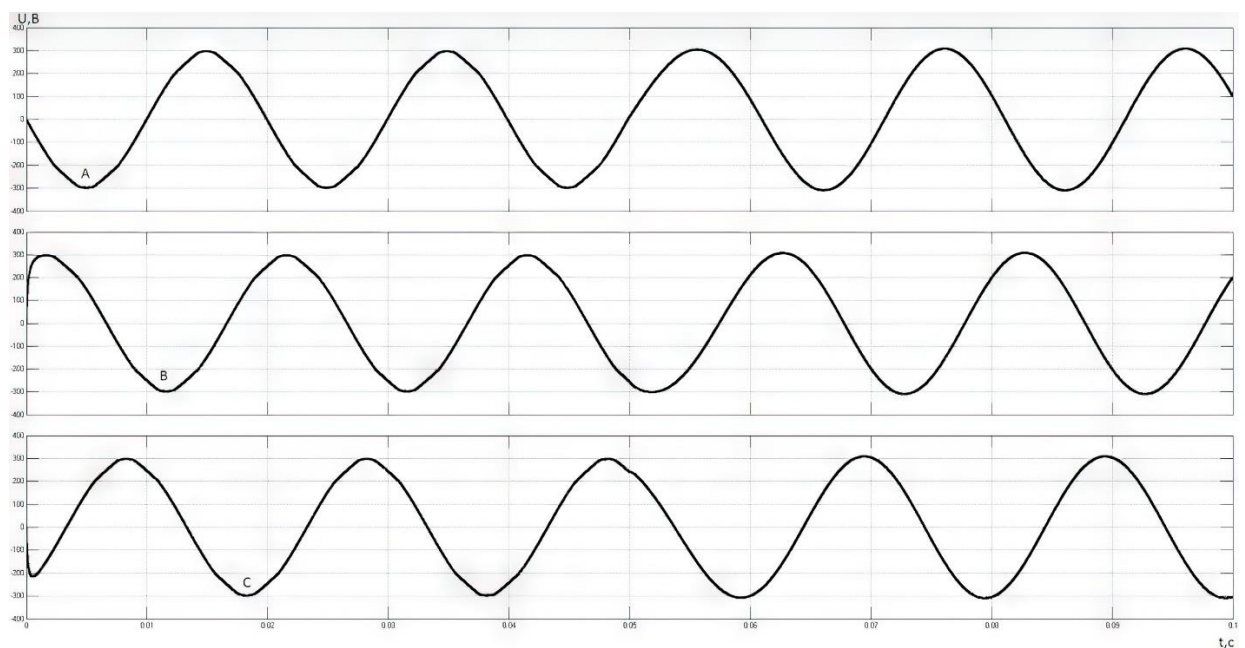


Рис. 3.46. Графік напруги на електричному навантаженні

3.3.4. Результати комп'ютерного моделювання та порівняльний аналіз засобів з покращення якості електроенергії. Здійснимо детальний розбір результатів функціонування сонячної електростанції в режимі активної фільтрації, базуючись на структурній схемі, візуалізований на рисунку 3.47.

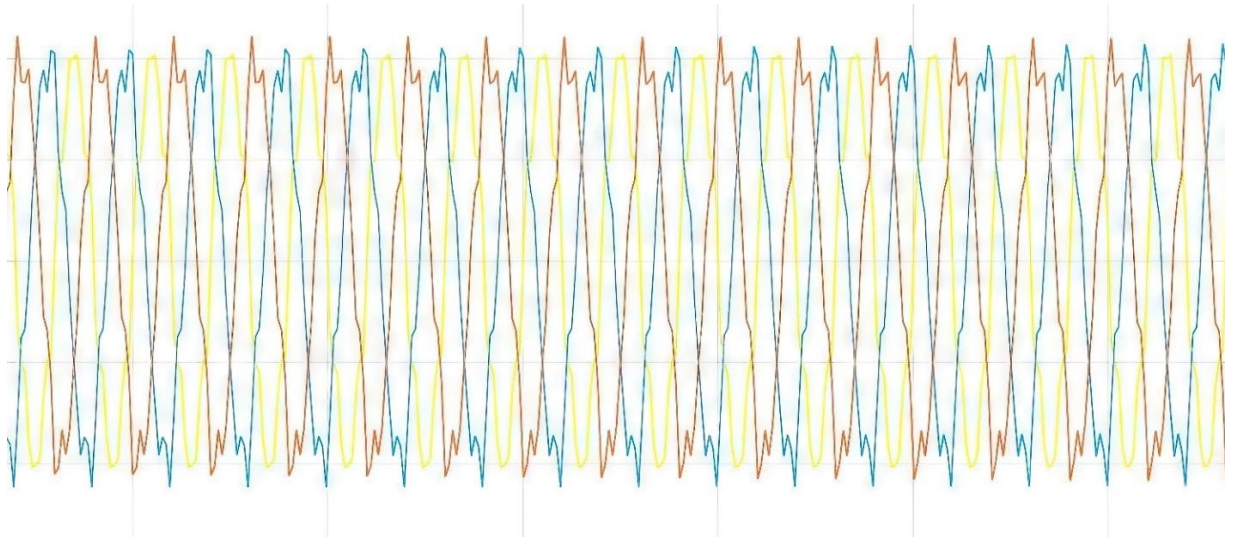


Рис.3.47. Графік напруги мережі з понаднормовим рівнем несинусоїдальності

Аналіз експериментальних даних, відображених на рисунку 3.48, демонструє результати впровадження компенсаційного струму, який за амплітудою дорівнює, але має протифазу відносно гармонійних складових:

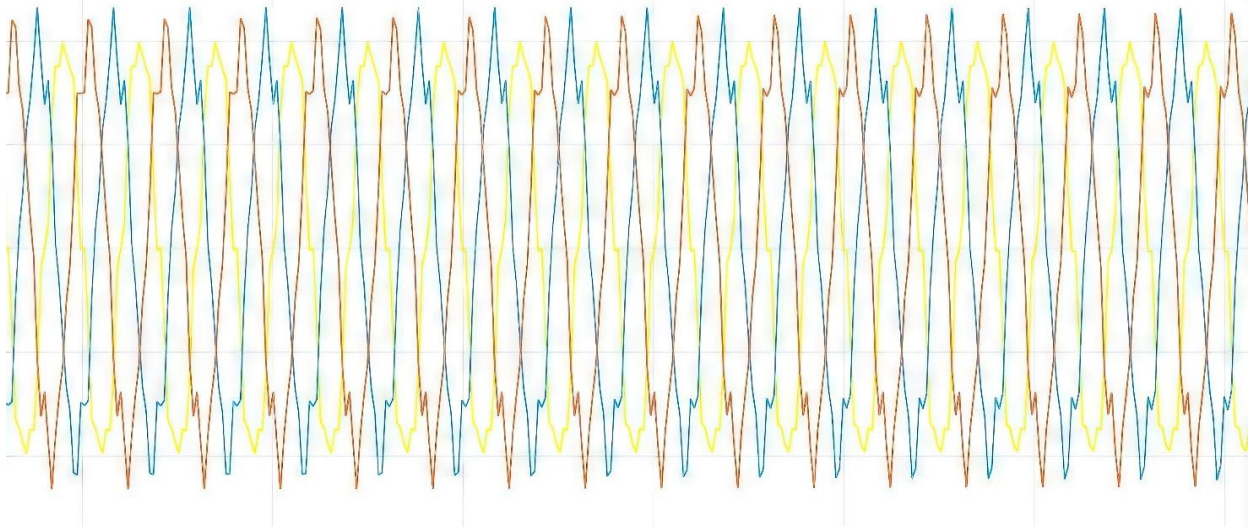


Рис. 3.48. Вихідний струм СЕС, який генерується з фазовим зсувом 180°

Активний фільтр ефективно нейтралізує гармонічні складові, присутні в струмі навантаження. Внаслідок цього форма струму, що надходить від джерела живлення, зберігає чисту синусоїдальну форму та синхронізується за фазою з напругою відповідної фази, як продемонстровано на рисунку 3.49.

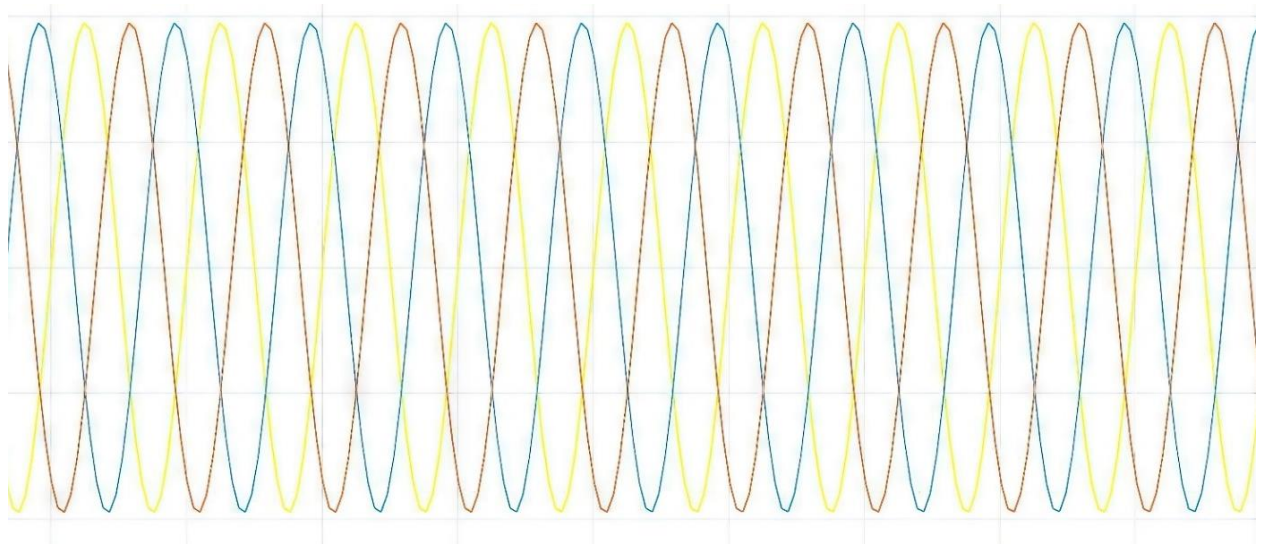


Рис. 3.49 Результуюча форма струму у споживача

Інтеграція моделі сонячної електростанції з системою активної фільтрації дозволила провести детальний аналіз електричних параметрів. Отримані осцилограми та спектральні характеристики демонструють суттєві зміни у якості електроенергії до та після встановлення фільтруючого обладнання.

Візуалізація на рисунку 3.50 відображає характерну форму фазного струму, що споживається нелінійним навантаженням до імплементації фільтру.

Проведений частотний аналіз із застосуванням методу швидкого перетворення Фур'є виявив, що показник загального гармонічного спотворення струму навантаження сягає 17.19%. Це значення суттєво перевищує нормативний поріг у 12%, встановлений стандартами якості електроенергії. Із спектру гармонік бачимо, що в кривій струму переважають гармоніки з частотами 250, 350, 550, 650, 850, 950 і т.д. Гц, що зумовлено характером нелінійного навантаження.

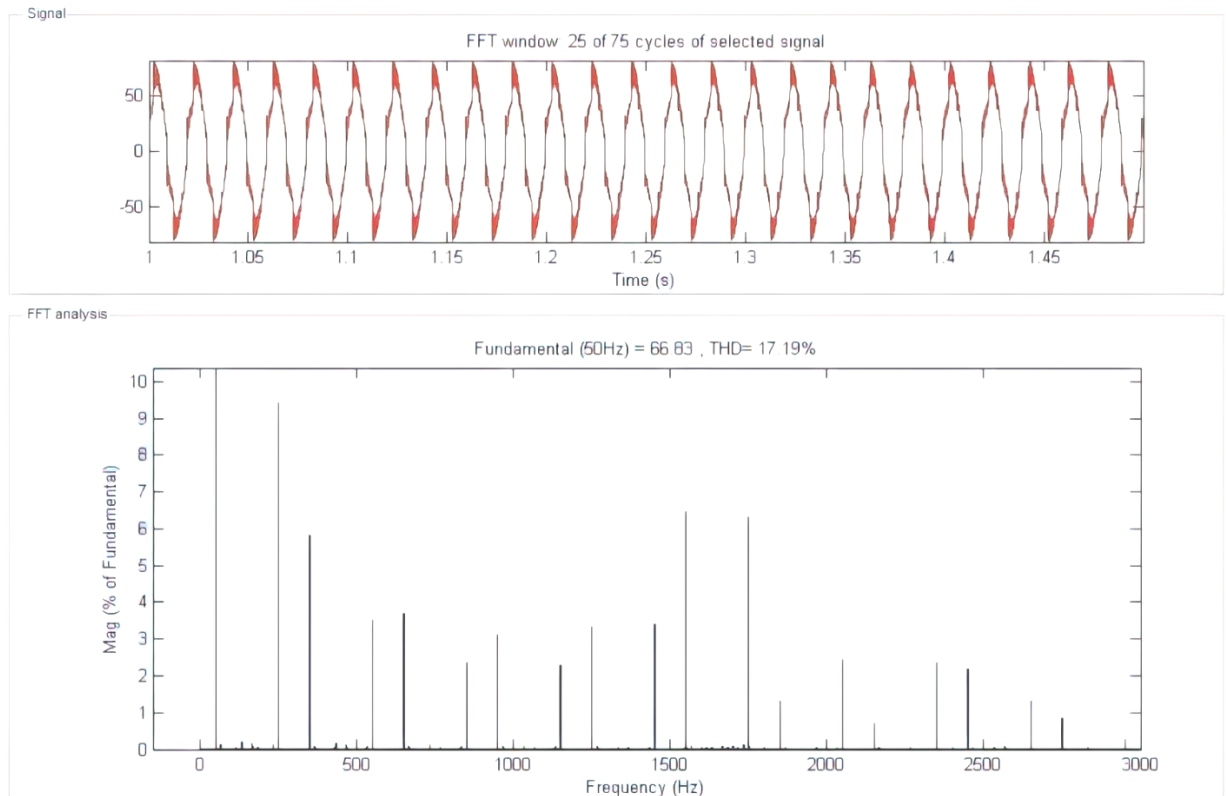


Рис. 3.50. Струм електричного навантаження та спектр фазного струму до застосування активного фільтра

Проведений аналіз Фур'є (FFT) для сигналу струму, представленого на рисунку 3.51, демонструє значне покращення якості електроенергії після встановлення фільтраційного обладнання. Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD) знизився до рівня 2.54%, що суттєво нижче критичного порогу в 5%.

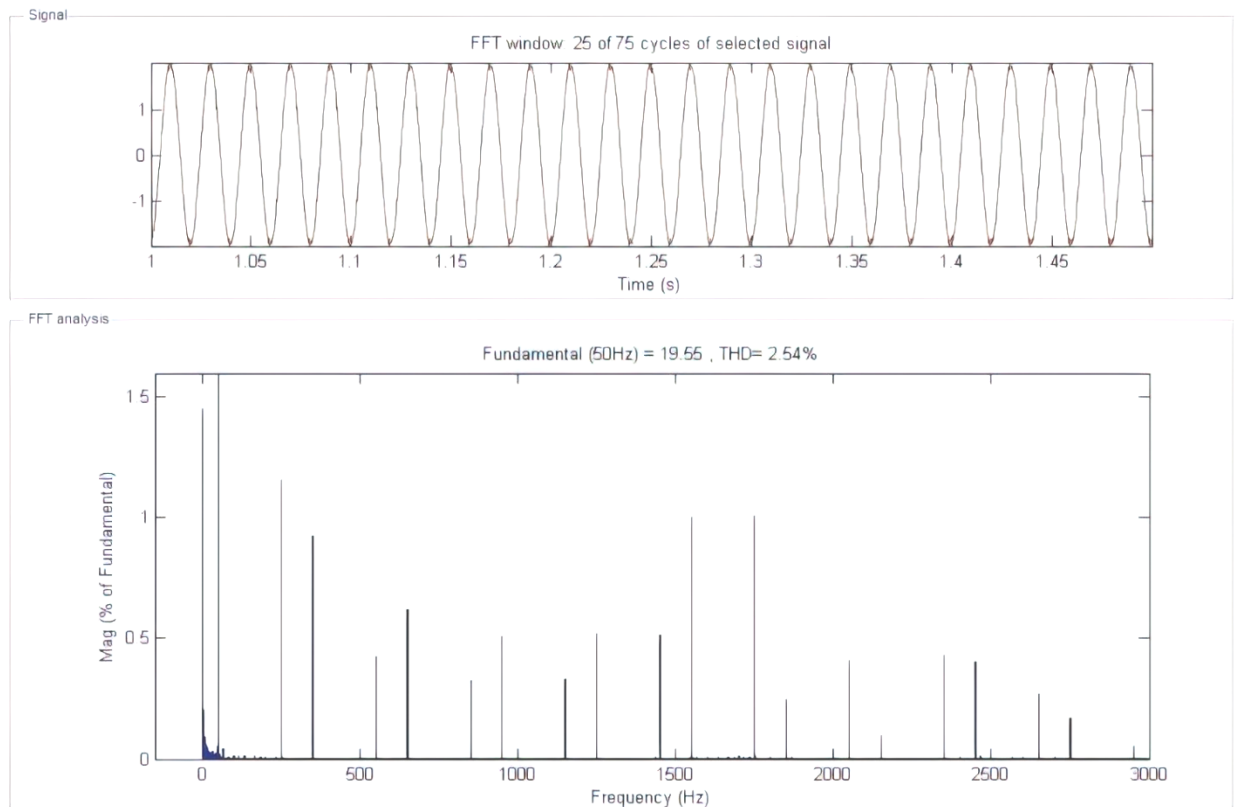


Рис. 3.51. Струм електричного навантаження та спектр фазного струму після застосування активного фільтра

Імплементація активного силового фільтра в електричну мережу демонструє вражаючі результати щодо оптимізації електромагнітної сумісності між нелінійними навантаженнями та системою електропостачання. Таке технічне рішення забезпечує комплексне покращення параметрів якості електроенергії, що позитивно впливає на стабільність функціонування всієї енергетичної інфраструктури.

Висновки до розділу

1. У межах виконаної роботи була розроблена комп'ютерна модель інвертора сонячної електростанції (СЕС), здатного функціонувати у провідному та залежному режимах. Модель створено з використанням схемотехнічної елементної бази в середовищі Simulink.

2. Проведено моделювання роботи СЕС, що може діяти як активний елемент мережі. Такий тип СЕС не лише виконує функцію джерела живлення, але й може бути використаний як активний фільтр для поліпшення показників якості електроенергії, що передається в мережу.

3. У ході дослідження було перевірено такі режими роботи інвертора: режим залежного підтримування напруги – інвертор реагує на параметри мережі, забезпечуючи стабільність напруги; режим провідного підтримування напруги – інвертор самостійно визначає параметри, необхідні для стабілізації напруги; перехідний режим – зміна роботи інвертора від залежного до провідного режиму; режим активного фільтра – інвертор компенсує гармонійні спотворення та покращує якість електроенергії в мережі.

4. Для забезпечення коректної роботи в кожному з зазначених вище режимів були внесені незначні коригування до моделі. Зокрема, основні зміни стосувалися блоку керування інвертором, що дозволило адаптувати модель до різних сценаріїв роботи

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Роботи, які виконуються під час експлуатації сонячних електростанцій, відносяться до категорії шкідливих (І категорія). Тому їх виконання потребує використання спеціального захисного обладнання та суворого дотримання вимог з техніки безпеки. Для забезпечення захисту персоналу застосовуються засоби, що попереджають фізичні травми і ураження електричним струмом. Обслуговування та експлуатація обладнання повинні виконуватися фахівцями відповідного рівня кваліфікації, які мають групу допуску з електробезпеки не нижче третьої.

Для мінімізації ризику механічних травм персоналу надаються спеціальні засоби індивідуального захисту, такі як рукавички, діелектричне взуття (боти) і каски. Перед початком робіт проводиться обов'язковий інструктаж із питань охорони праці, спрямований на запобігання виникненню аварійних ситуацій.

Задля підвищення рівня безпеки персоналу та забезпечення стабільної роботи СЕС реалізується низка технічних рішень, серед яких: монтаж систем блискавкозахисту, облаштування захисного заземлення, встановлення огорож та інших конструктивних елементів.

Одним із найважливіших заходів безпеки під час роботи з електроустановками є забезпечення захисного заземлення. Цей метод передбачає навмисне електричне з'єднання неструмоведучих металевих частин обладнання із землею. Таке обладнання може опинитися під напругою через замикання, витік потенціалу, вплив індуктивного струму або розряд блискавки.

Метою заземлення є усунення або значне зниження ризику ураження струмом при контакті з корпусом електроустановки або іншими частинами, які можуть опинитися під напругою. Це досягається за рахунок вирівнювання

потенціалу між заземленим обладнанням і точкою контакту працівника, що знижує рівень напруги до безпечних значень.

Робоче заземлення. Цей тип заземлення забезпечує правильне функціонування електроустановок у штатному або аварійному режимі. Воно передбачає з'єднання струмоведучих елементів, таких як нейтральні точки генераторів і трансформаторів, із землею. Робоче заземлення може виконуватися безпосередньо або через спеціальні пристрої, наприклад, розрядники чи резистори.

Заземлення блискавкозахисту. Цей тип заземлення використовується для відведення струмів блискавки від блискавкоприймачів до землі. Це дозволяє уникнути пошкоджень обладнання внаслідок атмосферних явищ.

Принцип дії захисного заземлення знижує небезпечну напругу доторкання і кроку, що може виникати через замикання на корпус. Це забезпечується зменшенням опору заземлювача та створенням вирівняного потенціалу між заземленим обладнанням і платформою, де знаходиться працівник. Додатково, для покращення захисту на сучасних СЕС застосовують дистанційний моніторинг стану заземлюючих контурів і автоматичні системи аварійного відключення. Це дозволяє оперативно виявляти несправності та запобігати можливим інцидентам.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Інтеграція сонячних електростанцій (СЕС) та інших альтернативних джерел енергії в сучасні системи електропостачання разом із активним впровадженням пристроїв силової напівпровідникової електроніки суттєво впливає на процеси енергообміну і перехідні процеси в мережі. Це, у свою чергу, змінює баланс електроенергії, спричиняє появу пульсацій, спотворень та інших небажаних явищ, а також впливає на параметри напруги, що призводить до погіршення якості електроенергії.

2. У дослідженні було розглянуто два типи сонячних електростанцій: мережеві СЕС – вони мають значно більшу потужність і підключаються до загальної електричної мережі. автономні СЕС – такі станції розробляються насамперед для задоволення потреб власного енергоспоживання. Хоча автономні системи здатні підключатися до зовнішньої мережі, надлишки виробленої енергії передаються до неї через окремий лічильник.

3. Для аналізу роботи сонячних електростанцій у системах децентралізованого електропостачання було проведено імітаційне моделювання в середовищі Matlab із використанням модуля Simulink.

4. В роботі була розроблена комп'ютерна модель інвертора сонячної електростанції (СЕС), здатного функціонувати у провідному та залежному режимах. Модель створено з використанням схемотехнічної елементної бази в середовищі Simulink. Також проведено моделювання роботи СЕС, що може діяти як активний елемент мережі. Такий тип СЕС не лише виконує функцію джерела живлення, але й може бути використаний як активний фільтр для поліпшення показників якості електроенергії, що передається в мережу.

5. У ході дослідження було перевірено такі режими роботи інвертора: режим залежного підтримування напруги – інвертор реагує на параметри мережі, забезпечуючи стабільність напруги; режим провідного підтримування напруги – інвертор самостійно визначає параметри, необхідні для стабілізації напруги; перехідний режим – зміна роботи інвертора від

залежного до провідного режиму; режим активного фільтра – інвертор компенсує гармонійні спотворення та покращує якість електроенергії в мережі.

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. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
5. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.
6. 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.
7. Впровадження сонячних електростанцій та дослідження їх впливу на роботу електроенергетичних систем. – 2017. – 20 с.
8. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЕС. / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько - УДК

621.316

9. Mariappan, Balasubramanian, Baylon G. Fernandes, and Mylavarapu Ramamoorthy. "A novel single-stage solar inverter using hybrid active filter with power quality improvement." IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2014.

10. Geury, Thomas, Sonia Pinto, and Johan Gyselinck. "Current source inverter-based photovoltaic system with enhanced active filtering functionalities." IET Power Electronics 8.12 (2015): 2483-2491.

11. Devassy, Sachin, and Bhim Singh. "Control of solar energy integrated active power filter in weak grid system." 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS). IEEE, 2017.

12. Bhattacharya, Indranil, Yuhang Deng, and Simon Y. Foo. "Active filters for harmonics elimination in solar photovoltaic grid-connected and stand-alone systems." 2nd Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED). IEEE, 2010.

13. Devassy, Sachin, and Bhim Singh. "Implementation of solar photovoltaic system with universal active filtering capability." IEEE Transactions on Industry Applications 55.4 (2019): 3926-3934.

14. Devassy, Sachin, and Bhim Singh. "Control of a solar photovoltaic integrated universal active power filter based on a discrete adaptive filter." IEEE Transactions on Industrial Informatics 14.7 (2017): 3003-3012.

15. Wu, Tsai-Fu, et al. "A single-phase inverter system for PV power injection and active power filtering with nonlinear inductor consideration." IEEE Transactions on Industry Applications 41.4 (2005): 1075-1083.

16. Smaida, Elyas, et al. "Solar-powered shunt active power filter using an advanced inverter topology ZSI: A Review." 2023 IEEE AFRICON (2023): 1-6.

17. Flores, Patricio, et al. "Static var compensator and active power filter with power injection capability, using 27-level inverters and photovoltaic cells." IEEE Transactions on Industrial Electronics 56.1 (2008): 130-138.