

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

“Допущено до захисту”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“___” _____2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Дослідження режимів роботи систем
електропостачання з сонячними
електростанціями”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-21М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Олександр КОПТЄВ
«___» _____2022 р.
Керівник роботи
канд. техн. наук, професор
_____Лариса ВІХРОВА
«___» _____2022 р.
Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

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.

«___» _____ 2022 р.

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

Коптєва Олександра Андрійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження режимів роботи систем
електропостачання з сонячними електростанціями

Study of modes of operation of power supply systems with solar power plants

2. Керівник роботи (проекту) Віхрова Лариса Григорівна, канд. техн. наук., проф.
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2022 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є
створення та аналіз моделей роботи сонячної електростанції в різних
режимах, дослідження впливу сонячних електростанцій на роботу
енергосистеми, з якими вони зв'язані, та режимів роботи цих станцій у
децентралізованих системах електропостачання. Завдання роботи:
1. Провести аналіз сучасного стану сонячної енергетики України
2. Створити комп'ютерну модель в програмному комплексі Matlab з Simulink
для дослідження роботи мережі в різних режимах; 3. Виконати аналіз впливу
СЕС на показники якості електричної енергії системи та її загальну
надійність..

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<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>	4.10.22	
2	<i>Аналіз розвитку української сонячної енергетики, її проблематики</i>		
3	<i>Дослідження режимів роботи СЕС. Аналіз електромагнітних перехідних процесів взаємодії сонячної електростанції з енергосистемою</i>	14.10.22	
4	<i>Імітаційне моделювання СЕС на базі трифазного інвертору в різних режимах живлення</i>	5.11.22	
5	<i>Охорона праці</i>	5.11.22	
6	<i>Техніко-економічне оцінювання електричної мережі за показниками якості електричної енергії</i>	18.11.22	
7	<i>Висновки</i>	21.11.22	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	25.11.22	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	29.11.22	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Коптєв О. А. Дослідження режимів роботи систем електропостачання з сонячними електростанціями.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2022р.

Метою роботи є створення та аналіз моделей роботи сонячної електростанції в різних режимах, дослідження впливу сонячних електростанцій на роботу енергосистеми, з якими вони зв'язані, та режимів роботи цих станцій у децентралізованих системах електропостачання.

Основна увага була сконцентрована на дослідженні та аналізу впливу сонячних електростанцій на показники якості електроенергії, енергетичні залежності, що характеризують різноманітні параметри в автономному режимі роботи сонячних електростанцій та в режимі роботи з мережею, загальній надійності функціонування системи та виявленні чинників, що впливають на показники якості електроенергії. В процесі вирішення поставлених завдань були проведені узагальнення та аналіз матеріалів науково-технічної літератури, застосовані методи імітаційного моделювання в програмних пакетах Matlab / Simulink, математичного аналізу та методи теоретичних та експериментальних досліджень, методи обробки статистичних даних.

Ключові слова: система керування інвертором, сонячна електростанція, система електропостачання, імітаційне моделювання, якість електроенергії, активний силовий фільтр.

ANNOTATION

Koptiev O. A. Study of modes of operation of power supply systems with solar power plants.

Specialty 141 - "Electric power, electrical engineering and electromechanics". - "Electrical systems of power consumption". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2022

The purpose of the work is to create and analyze models of operation of a solar power plant in different modes, to study the influence of solar power plants on the operation of the power system with which they are connected, and the modes of operation of these plants in decentralized power supply systems.

The main attention was focused on the study and analysis of the impact of solar power plants on power quality indicators, energy dependencies characterizing various parameters in the autonomous mode of operation of the solar station and in the mode of operation with the network, the overall reliability of the functioning of the system and the identification of factors affecting the power quality indicators. In the process of solving the tasks, the generalization and analysis of the materials of scientific and technical literature were carried out, the methods of simulation modeling in the Matlab / Simulink software packages, mathematical analysis and methods of theoretical and experimental research, methods of statistical data processing were applied.

Keywords: inverter control system, solar power plant, power supply system, simulation modeling, power quality, active power filter.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ УКРАЇНСЬКОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, ЇЇ ПРОБЛЕМАТИКИ	11
1.1 Загальна характеристика ринку альтернативної енергії України	11
1.2 Рівень сонячної інсоляції в Україні.....	14
1.3 Потенціал сонячної енергетики в Україні	15
1.4 Стан та перспективи сонячної енергетики в умовах війни.....	16
1.5 Аналіз актуальних досліджень.....	18
Висновки до розділу	21
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СЕС. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ	22
2.1 Дослідження та аналіз перехідних процесів паралельної роботи енергосистеми і сонячної електростанції	22
2.2 Математична модель інвертору в двофазній системі координат	28
2.3 Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в енергосистемі.....	31
2.4 Вибір програмного середовища для здійснення імітаційного моделювання.....	39
2.4.1 Здійснення моделювання режимів роботи	40
2.4.2 Короткі теоретичні відомості про трифазні АІН	41
2.4.3 Реалізація силового ключа	48
2.4.4 Опис можливих режимів роботи інвертору	52
Висновки до розділу	54
РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕС НА БАЗІ ТРИФАЗНОГО ІНВЕРТОРУ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЖИВЛЕННЯ	56
3.1. Опис моделі інвертору при роботі у провідному та залежному режимах	56
3.1.1 Моделювання акумуляторної батареї	63
3.1.2 Моделювання трифазного інвертору	64
3.1.3 Моделювання навантаження.....	73
3.2 Моделювання роботи СЕС, що працює як активний фільтр для мережі...	75

3.2.1 Розрахунок активного силового фільтру	79
3.2.2 Система керування	80
3.2.3 Розрахунок конденсатора	87
3.3 Результати моделювання	89
3.3.1 Підтримка напруги в режимі залежного	89
3.3.2 Підтримка напруги в режимі провідного	90
3.3.3 Підтримка напруги з переходом від режиму провідного в режим залежного	92
3.3.4 Результати моделювання та порівняльний аналіз технічних засобів з покращення якості електроенергії.....	95
Висновки до розділу	99
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	100
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що можуть бути присутніми на СЕС, а також заходи по їх усуненню	100
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	102
5.1 Вимоги до показників якості електричної енергії, затверджені чинними нормативними документами.....	102
5.2 Пошук оптимуму при закладанні рівня якості функціонування електричної мережі	104
Висновки до розділу	110
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії

ЕЕ – електрична енергія

ОЕС – об'єднана енергосистема

ЕС – енергосистема

СЕС – сонячна електростанція

ЯЕ – якість електричної енергії

ПЯЕ – показники якості електричної енергії

ЛЕП – лінія електропередавання

АКБ – акумуляторна батарея

АІН – автономний інвертор

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВЕС – вітрові електростанції

ФЕМ – фотоелектричний модуль

ВСТУП

Сонячна енергетика – це перспективна галузь відновлювальної енергетики, що стрімко розвивається на території України протягом останніх двох десятиліть. В той же час, поява альтернативних джерел генерації в сучасних електричних мережах створює нові виклики та проблеми, які, в свою чергу, потребують новітніх підходів до їх вирішення.

Зокрема, застосування потужних напівпровідникових приладів в електричних мережах призводить до збільшення загальних втрат електроенергії, а також викликає появу вищих гармонік, що негативно відбивається на показниках якості електричної енергії. Для того, щоб дотримуватися актуальних стандартів якості, забезпечувати високу надійність та ефективність роботи енергосистеми України, необхідно своєчасно реагувати на виклики, що створюються новітніми галузями енергетики.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи є створення та аналіз моделей роботи сонячної електростанції в різних режимах, дослідження впливу сонячних електростанцій на роботу енергосистеми, з якими вони зв'язані, та режимів роботи цих станцій у децентралізованих системах електропостачання.*

Для реалізації описаної мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Створити комп'ютерну модель в програмному комплексі Matlab з Simulink для дослідження роботи мережі в різних режимах;
2. Виконати аналіз впливу СЕС на показники якості електричної енергії системи та її загальну надійність.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси, що протікають в обладнанні сонячних електростанцій.

Предмет дослідження – визначення параметрів обладнання сонячної електростанції в різних режимах роботи.

Методи дослідження. В ході виконання роботи використовувалося імітаційне моделювання в середовищі MatLab, комп'ютерна обробка отриманих результатів в ході моделювання та ін..

Наукова цінність роботи полягає в обґрунтуванні доцільності використання СЕС в загальній системі електропостачання в режимі активного фільтру завдяки застосуванню сучасних інверторів.

Практична цінність полягає в створенні позитивного впливу СЕС на показники якості електричної енергії та стабільність і надійність енергосистеми в цілому.

Структура роботи: Кваліфікаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 113 сторінок. Основна частина викладена на 103 сторінках друкованого тексту, містить 71 рисунок та 4 таблиці. Список використаних джерел містить 20 джерел та викладений на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РОЗВИТКУ УКРАЇНСЬКОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, ЇЇ ПРОБЛЕМАТИКИ

1.1 Загальна характеристика ринку альтернативної енергії України

Сонячна енергетика – одна з найперспективніших галузей альтернативної енергетики. Як наслідок, можна спостерігати високі темпи розвитку даного напрямку як в Україні, так і у світі.

У 2019 році Україна увійшла у ТОП-10 країн світу за темпами розвитку зеленої енергетики, а у 2020 – у ТОП-5 європейських країн за темпами розвитку сонячної енергетики. Загальна потужність об'єктів зеленої енергетики на початок 2022 року досягла 9 656 МВт. За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, у 2021 році майже 15 тисяч українських родин встановили сонячні установки. Це вдвічі більше, ніж у 2020 році. Загалом на кінець 2021 року в Україні нараховується близько 45 тисяч домогосподарств, які використовують сонячні панелі та заощаджують на рахунках за електроенергію. Загальна потужність таких СЕС перевищила 1,2 ГВт. Станом на 24 лютого 2022 року ставки на продаж електроенергії за зеленим тарифом становили:

- при підключенні в 2022-2024 роках - €0,163/кВт·год;
- при підключенні в 2025-2029 роках - €0,146/кВт·год.

Сонячна енергетика стає більш популярною. Якщо у 2017 році домашніми господарствами в енергомережу було додано всього 34 МВт, то за 2021 рік – понад 400 МВт. Лідерами є Дніпропетровська та Закарпатська області, половина від усіх нових станцій у 2021 році була побудована саме в цих областях.

За даними регулятора, сукупна встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики в Україні станом на кінець 2021 досягла 8451 МВт.



Рис.1.1 Темпи розгортання встановлених потужностей ВДЕ

При цьому минулого року найбільше потужностей додалося у вітроенергетиці: було введено в експлуатацію 359 МВт вітроелектростанцій (ВЕС) – у 2,5 раза вище за показник 2020 року (144 МВт) і в 1,2 раза вище за показник введених в експлуатацію сонячних електростанцій (СЕС), які традиційно лідирують у галузі (286 МВт). Хоча у 2020 році промислових СЕС було запущено у 7,6 рази вище, ніж ВЕС, коли СЕС додали одразу 1102 МВт (вчетверо більше за показник 2021 року). Таким чином, за результатами 2021 року ВЕС додали 27,3% потужностей, а СЕС – лише 4,8%. На кінець 2021 року загальна потужність ВЕС становить 1673 МВт, а промислових СЕС – 6226,9 МВт.

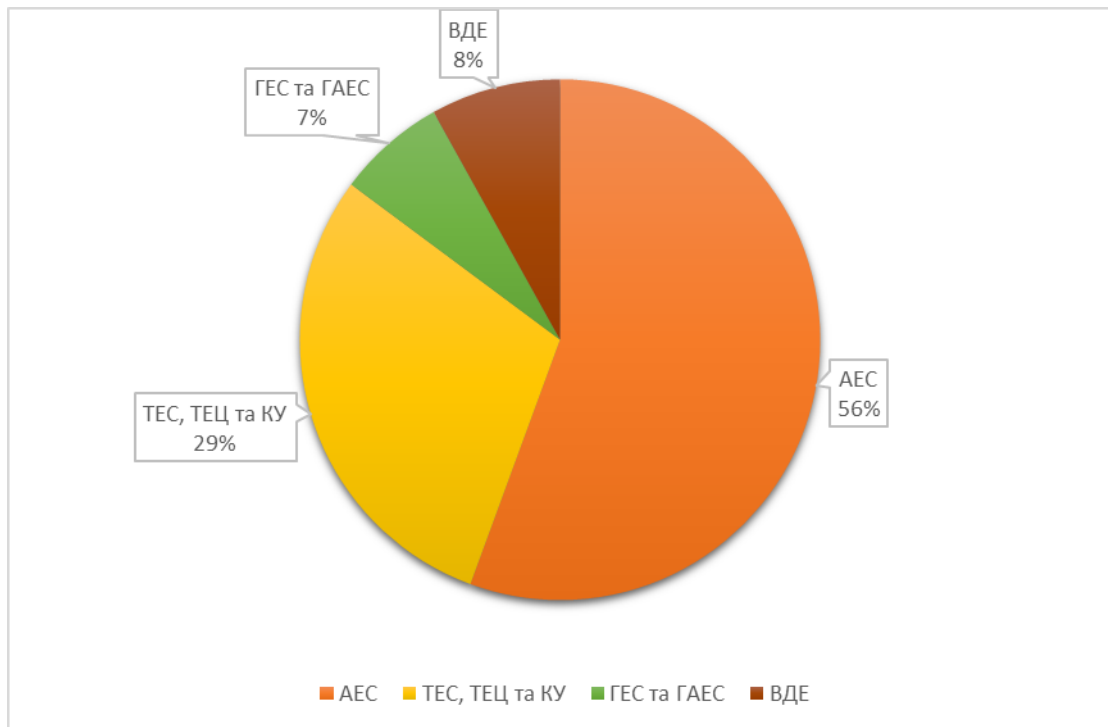


Рис.1.2 Структура виробництва електроенергії в ОЕС України (2021 рік)

Виробництво електроенергії альтернативними джерелами (ВЕС, СЕС, біомаса) збільшилося на 15,3% - до 12 млрд. 519,7 млн. кВт·год.

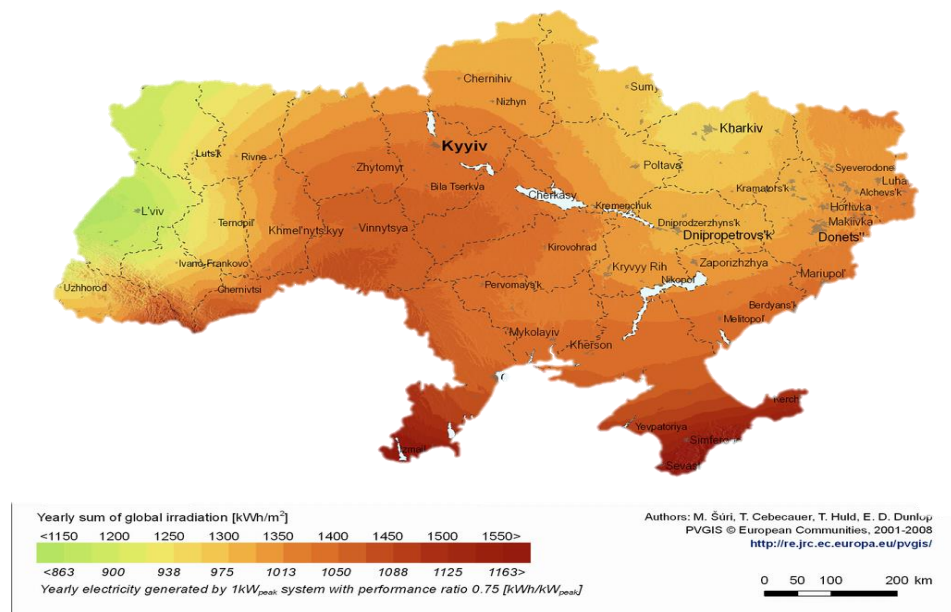
Беручи до уваги досвід з впровадження сонячних електростанцій в європейських країнах зі схожим рівнем сонячного випромінювання, а також з огляду на світові тенденції постійного зниження собівартості будівництва СЕС внаслідок розвитку технологій, в Україні за рахунок вдосконалення технології та введення в експлуатацію нових потужностей, виробництво електроенергії СЕС може бути значно збільшено.



Рис. 1.3 Частка альтернативної енергії в енергетиці країн світу

1.2 Рівень сонячної інсоляції в Україні

Так як в Україні сонячна енергія є популярним видом ВДЕ, можна відмітити, що регіональний розподіл встановлених об'єктів має кореляцію з рівнем інсоляції. У першу чергу увага приділяється регіонам з високою сонячною активністю, що проілюстровано на карті (рис.1.4).

Рис. 1.4. Мапа регіональних показників сонячної інсоляції, кВт·год/м²

Ознайомившись з картою, можна зрозуміти, скільки сонячної енергії припадає на поверхню землі у певній місцевості. Чим південніше географічно регіон України, тим потенційно доцільніше користуватися сонячною електростанцією для отримання електроенергії і сонячними геліоколекторами для нагріву побутової води.

З карти видно, що на території України розподіл інсоляції нерівномірний і її значення знаходяться в межах від 1150 до 1550 кВт·год на 1 кв. м. рік. Столиця України перебуває «посередині», а відхилення по країні в межах 10% в більшу чи меншу сторони.

В цілому, на південні регіони – Одеської, Миколаївської, Херсонської, Кіровоградської, Запорізької та Дніпропетровської областей припадає 30,3% від всього економічно-доцільного потенціалу сонячної енергії на території України.

1.3 Потенціал сонячної енергетики в Україні

Згідно із даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, теоретично-можливий потенціал генерації сонячної енергії на території України становить більше 730 млрд кВт·год на рік, при цьому технічно-можливий - лише 34,2 млрд кВт·год/рік. Одними з головних завад для інтенсивного розвитку відновлюваної енергетики є недостатньо розгалужена мережа та її застаріла централізована концепція.

Згідно оцінок експертів компанії Rentech⁴⁸, при сьогоdnішньому рівню розвитку технологій, ВДЕ здатні покрити до 80% українського попиту на електроенергію. Використання сонячних панелей на дахах приватних домогосподарств може досягти 40-50% до 2050 року. Зокрема, використання сонячних колекторів в цілях нагріву води ставатиме дедалі більш вигідним економічно. Дані технології дозволять забезпечити потребу в гарячій воді в приватних домогосподарствах на 70-100% на літній період та на 15%

взимку. Однак, у сфері послуг потенціал використання сонячних колекторів є меншим, але все ще перспективним.

1.4 Стан та перспективи сонячної енергетики в умовах війни

Враховуючи регіональні показники сонячної інсоляції, логічно, що переважна більшість встановлених на даний момент об'єктів відновлюваної енергетики в Україні, зосереджені у південних та південно-східних областях країни, де вже протягом останніх 9 місяців безупинно тривають активні бойові дії. Згідно різних оцінок експертів, станом на серпень 2022 року так чи інакше постраждало 30–40% ВДЕ електростанцій в цих регіонах, або близько 1120 – 1500 МВт встановленої потужності.

Наприклад, за даними Української вітроенергетичної асоціації, з початку широкомасштабної війни в Україні було зупинено понад 3/4 вітроенергетичних потужностей, тобто з загальних 1673 МВт, зараз не працює близько 1462 МВт українських ВЕС, а 5 вітрових турбін в Херсонській області, що встановлені на Мирненській, Сиваській та Новотроїцькій вітроелектростанціях, були знищені.

Варто відмітити, що даний показник пошкоджень скоріше всього буде більшим, оскільки на сьогоднішній день точно невідомо масштаб пошкоджень на тих станціях, які знаходяться під окупацією без можливості фізичного доступу до об'єктів. Проте достеменно відомо, що у зоні активних бойових дій знаходяться активи ВДЕ вартістю у понад 5,6 млрд доларів США, а в регіонах, що прилягають до областей, де ведуться активні бойові дії - понад 3,6 млрд доларів США.

1,8 МВт потужностей біоенергетики в Чернігівській області зазнали пошкоджень, в той же час біоенергетичні станції потужністю 2 МВт залишаються на окупованих територіях Донецької області, а саме, в Волновасі та Маріуполі, тобто, як мінімум 3,8 МВт із 245 МВт, встановлених на момент кінця 2021 року, зараз не генерують електроенергію до мережі.

Проте, потужності малої гідроенергетики, які переважно розташовані в західних областях України, поки що не постраждали від бойових дій, та продовжують постачати електроенергію.

В цілому, генерація енергії вітру та сонця скоротилася більш ніж двічі відносно довоєнного рівня. Це викликано переважно двома чинниками. В першу чергу, як зазначалось вище, внаслідок прямих бойових дій, та задля запобігання пошкоджень електроустаткування. Другим чинником є посилення проблем, пов'язаних з руйнуванням попиту та високою негнучкістю генерації, що підлягає диспетчеризації, в першу чергу сонячної, враховуючи, що на кінець 2021 року сумарна потужність сонячної генерації перевищила позначку в 6 ГВт.

Відповідно доступній інформації, загальний обсяг обмежень сонячної генерації в період з березня до травня 2022 року становив близько 573 кВт·год, що, в середньому за даний період, відповідає 30% від потенціально можливого обсягу відпуску електроенергії (від 42% у березні до 19% у квітні). Високий рівень скорочення в березні пояснюється тим, що після початку війни енергосистема країни перейшла до аварійного режиму; квітень був дещо стабілізованим за рахунок сприятливих гідрологічних умов; а у травні спостерігалось збільшення кількості обмежень сонячної генерації разом із збільшенням сонячного опромінення.

В умовах війни сектор відновлювальної енергетики ввійшов у кризовий період. Як реакція на нові, ускладнені умови, змінюються основні тренди як сектору енергетики, так і суспільства в цілому. Практично повністю зник попит на сонячні електростанції, які працюють під “зелений” тариф, адже більшість інвесторів втратили можливість отримувати виплати в повному обсязі за вироблену енергію. Одночасно відчутно збільшився попит на автономні домашні СЕС з використанням літєвих акумуляторів та СЕС для власного споживання. Тобто, споживачі зараз в першу чергу намагаються забезпечити безперебійність власного живлення та компенсувати власне споживання енергії. Після отриманого досвіду життя

населення в знеструмлених містах та селах, люди переосмислили важливість власної генерації, адже домашня сонячна станція може частково або повністю забезпечити роботу електроприладів в будинку. Як наслідок, спостерігається значне зростання попиту на сонячні панелі, інвертори, акумулятори різних типів, та іншого обладнання, що використовується в побудові домашніх автономних систем, щоб компенсувати періоди аварійних та стабілізаційних відключень.

1.5 Аналіз актуальних досліджень

Інтеграція СЕС та інших альтернативних джерел генерації в існуючі системи електропостачання разом з широким застосуванням пристроїв силової напівпровідникової електроніки змінює характер енергообмінних і перехідних процесів, що приводить до зміни балансу електричної енергії, виникнення фактів спотворення та пульсацій, зміни параметрів напруги та зниження якості електричної енергії.

Необхідно враховувати той факт, що силові інвертори, за допомогою яких приєднуються СЕС, чутливі до рівнів напруги, а при неналежному підключенні залежно від конфігурації мережі, її хвильових параметрів, складу та стану обладнання, що застосовується, це може призвести до порушення стійкості паралельної роботи загальної системи електропостачання та СЕС. Значно впливає на характер паралельної роботи потужність взаємодіючих систем.

В Україні для перетворення постійної електричної енергії, виробленої панелями на СЕС, застосовуються енергоефективні інвертори різноманітних світових виробників.

В якості прикладу обладнання, що встановлюється на СЕС, приєднаних до шин 10 кВ підстанції, розглянемо інвертори виробника Huawei, технічні характеристики якого наведені в таблиці 1.2.

SUN2000 це трифазний фотоелектричний мережевий інвертор, що перетворює енергію постійного струму, яка генерується фотоелектричними ланцюгами, в енергію змінного струму і видає енергію в електричну мережу.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики інвертору Huawei SUN2000-60KTL

Технічні характеристики	SUN2000-60KTL-MO
Макс. ефективність	98.9%@480 В, 98.6%@400 В
EU ефективність	98.7% @480 В, 98.5%@400 В
Ефективність	
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
Номинальна напруга DC	720 В / 480 В, 600 В / 400 В
Макс. кількість вводів	12
Кількість MPP трекерів	6
АС контур	
Номинальна активна потужність	60,000 Вт
Макс. повна потужність АС	66,000 ВА
Макс. активна потужність АС (cosφ=1)	66,000 Вт
Номинальна напруга АС	480 В, 3W+PE; 220 В / 380 В, 230 В / 400 В, за замовчуванням 3W+N+PE, 3W+PE опція
Номинальний струм АС	72.2 А @ 480 В, 86.7 А @ 400 В
Номинальна 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 коннектор	Amphenol Helios H4
АС коннектор	Водонепроникний термінал PG + OT Конектор
Захист	IP65
Топологія	Без трансформатора

В роботі наведено СЕС двох типів:

- мережеві, що є більш потужними, вони підключаються до загальної електричної мережі, більшість або навіть вся вироблена ними

електрична енергія передається в мережу через спеціальний лічильник, показники навантаження власного споживання незначні;

- автономні, які призначені покривати потреби навантаження власного споживання в першу чергу, тому вони розраховуються для меншої потужності (яка визначається переліком власних електроприладів), вони можуть також підключатись до зовнішньої електричної мережі, а лише надлишки електричної енергії можуть передаватися в мережу через окремий лічильник.

Сонячна електростанція, що підключена до мережі, економічно вигідніше, тому що не вимагає використання батарей для зберігання електричної енергії. Для таких систем застосовують алгоритм пошуку точки відбору максимальної потужності, який підвищує ефективність системи. Для задачі формування вихідної змінної напруги та в якості узгоджувальних пристроїв значну популярність набули багаторівневі мережеві інвертори.

Багаторівневі мережеві інвертори при роботі в ланцюзі сонячної електростанції мають дві основні задачі: сформувати синусоїдальний струм і напругу на свій вихід для видачі в мережу, та зменшити рівні гармонік.

Водночас недоліком автономних СЕС вважається необхідність використання акумуляторних батарей, які працюють в циклічному режимі. Кількість робочих циклів поширених в таких станціях кислотних-свинцевих акумуляторів відносно невелике (1500-2000), що вимагає їх частішої заміни по ходу експлуатації. Вирішення цієї проблеми застосуванням промислових акумуляторів з великою кількістю циклів, наприклад, нікель-кадмієвих чи літій-іонних, потребує значного збільшення фінансових капіталовкладень у будівництво СЕС. Крім того, необхідно враховувати, що ефективність процесів заряду-розряду в акумуляторах становить приблизно 90% з подальшим зниженням з часом експлуатації.

Висновки до розділу

Інтеграція СЕС та інших альтернативних джерел генерації в існуючі системи електропостачання разом з широким застосуванням пристроїв силової напівпровідникової електроніки змінює характер енергообмінних і перехідних процесів, що приводить до зміни балансу електричної енергії, виникнення фактів спотворення та пульсацій, зміни параметрів напруги та зниження якості електричної енергії.

В роботі наведено СЕС двох типів:

- мережеві, що є більш потужними, вони підключаються до загальної електричної мережі, більшість або навіть вся вироблена ними електрична енергія передається в мережу через спеціальний лічильник, показники навантаження власного споживання незначні;
- автономні, які призначені покривати потреби навантаження власного споживання в першу чергу, тому вони розраховуються для меншої потужності (яка визначається переліком власних електроприладів), вони можуть також підключатись до зовнішньої електричної мережі, а лише надлишки електричної енергії можуть передаватися в мережу через окремий лічильник.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СЕС. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ

2.1 Дослідження та аналіз перехідних процесів паралельної роботи енергосистеми і сонячної електростанції

Як було зазначено вище, в даний час зростає вплив альтернативних джерел енергії на розвиток електроенергетики. Використання фотоелектричних модулів (ФЕМ) в процесі перетворення енергії сонячної в електричну знаменує новий етап розвитку сонячних електростанцій (СЕС).

Застосування СЕС в паралельній роботі з енергосистемою (ЕС) дає можливість підвищити надійність електропостачання споживачів. ЕС приймає потужність, що виробляється СЕС, і компенсує її роботу в темну пору доби.

Важливим компонентом СЕС є перетворювач, який складається з підвищуючого перетворювача напруги (DC/DC-перетворювач) від 200 до 700 В, трифазного інвертора, виконаного на основі IGBT-модулів за трифазною мостовою схемою, і пропорційно-інтегральних регуляторів струму та напруги (ПІ). Час відкриття і закриття IGBT-модулю становить кілька мілісекунд, що в свою чергу дозволяє ефективно застосовувати принцип широтно-імпульсної модуляції, щоб отримати синусоїдальні напруги на виході інвертора.

Трифазні інвертори у складі перетворювача виконують такі основні завдання:

- перетворення в змінний для ЕС постійного струму;
- синхронізацію по частоті, напрузі і куту з ЕС;
- стабілізацію вихідної напруги;

- обмеження струмових перевантажень при різних видах к.з.

Комутація таких елементів, як тиристори і транзистори спотворює форму кривих струму в з'єднаній мережі змінного струму, що приводить до появи вищих гармонік в мережі.

Якість електричної енергії (ЯЕ) визначається показниками, що демонструють відповідності напруги і частоти нормованим значенням. Актуальні на сьогоднішній день в Україні вимоги до якості електричної енергії в точках приєднання електроприймачів до мереж загального призначення змінного трифазного струму частоти 50 Гц, встановлюють 2 діючих стандарти:

- національний стандарт України ДСТУ EN 50160:2014, ідентичний європейському стандарту EN 50160:2010, який набрав чинність з 01.10.2014 року;
- міждержавний стандарт ГОСТ 13109-97, який діє на території України з 01.01.2000 року і до сьогоднішнього дня не втратив чинності.

Положення наведених стандартів обов'язкові для виконання, а значить необхідна оцінка впливу сонячних електростанцій на такі показники якості електричної енергії (ПЯЕ) електричної мережі: коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ; коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$.

Коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги у відсотках знаходиться за виразом:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де $U_{\text{ном}}$ — номінальна напруга мережі.

Збільшення гармонік при появі сонячної електростанції в мережі приводить до збільшення як коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги, так і коефіцієнту n-ої гармонійної складової напруги. Тому ці ПЯЕ в мережі з СЕС варто контролювати, а за необхідності вживати заходів для нормалізації якості електричної енергії в даній мережі.

Наявність сонячної електростанції в електричній мережі буде впливати на стійкість роботи ЕС, в яку дана електростанція видаватиме потужність. Запас статичної стійкості енергосистеми для режиму роботи визначається його близькістю до межі області, яка може бути обумовлена аперіодичним чи коливальним порушенням стійкості. Запас статичної стійкості енергосистеми характеризується коефіцієнтами запасу по активній потужності в вузлах енергосистеми і коефіцієнта запасу за напругою у вузлах навантаження. Коефіцієнт запасу за активною потужністю у вузлі знаходиться з формули:

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

де $P_{\text{ПР}}$ – активна потужність, яка передається з перерізу, що розглядається (перетік в перетині) в граничному режимі по стійкості;

P – перетікання в перетині в розглянутому режимі; $P > 0$;

ΔP – амплітуда нерегулярних коливань активної потужності у перетині у розглянутому режимі. Внаслідок нерегулярних коливань перетік P може змінюватися в діапазоні $P \pm \Delta P$.

Щоб визначити коефіцієнт запасу статичної стійкості за активною потужністю у перетині схеми застосовуються ускладнення режиму через збільшення перетоку потужності у перетині до граничного по стійкості режиму.

Коефіцієнт запасу за напругою у вузлах навантаження визначаються по формулі:

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

де U – напруга в вузлі в розглянутому режимі;

$U_{кр}$ – критична напруга в тому ж вузлі, що відповідає межі, нижче якої відбувається порушення статичної стійкості двигунів.

Для здійснення контролю дотримання нормативних запасів по напрузі в практичній експлуатації можна використовувати напругу будь-яких вузлів енергосистеми.

Згідно умов статичної стійкості енергосистем відбувається нормування мінімальних коефіцієнтів запасу за активною потужністю у перетинах і мінімальних коефіцієнтів запасу за напругою у вузлах навантаження, значення яких приведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Мінімальні значення коефіцієнтів запасу статичної стійкості

Перетікання в перетині:	K_P	K_U
Нормальний режим	0,20	0,15
Післяаварійний режим	0,08	0,10

Для аналізу статичної стійкості при підключеній сонячній електростанції до ЕЕС використаємо схему, представлену на рисунку 2.1. В якості точки перетину виступає лінія електропересилання (ЛЕП).

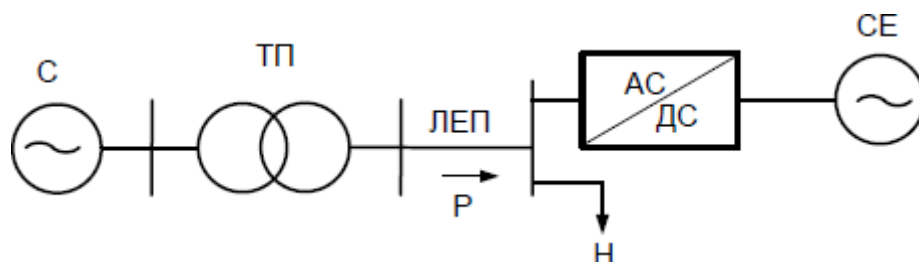


Рис. 2.1 – Схема підключення сонячної електростанції до ЕС

При підключенні сонячної електростанції до енергосистеми потужність, що передається через ЛЕП з надлишкової частини ЕС до дефіцитної, зменшується внаслідок покриття навантаження власних споживачів станції. Це в свою чергу приводить до збільшення коефіцієнта запасу статичної стійкості за активною потужністю у перетині. Що ж стосовно загального балансу активної потужності в ЕС, варто відмітити збільшення потужності генеруючих джерел, що в свою чергу сприяє збільшенню обертаючого резерву і підвищенню запасу статичної стійкості[2].

Аналіз процесів, які відбуваються між СЕС та енергосистемою починає проводитися на основі ЕМПП на інверторі.

Система керування інвертором складається з наступних компонентів:

- алгоритму синхронізації з мережею;
- ПІ – регуляторів струму;
- ПУ – регуляторів напруги;
- системи керування точкою максимальної потужності СЕС (Maximum Power Point Tracking System (MPPTS)).

Математична модель інвертору будується на основі фізичних процесів, які протікають в інверторі, і описується наступними рівняннями [3]:

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

де L_a, L_b, L_c – індуктивності вихідного фільтру інвертора (Гн);

i_a, i_b, i_c – лінійні струми трифазної системи (А);

R_a, R_b, R_c – активні опори вихідного фільтру (Ом);

S_a, S_b, S_c – ключові стану IGBT-транзисторів (1 – включений, 0 – відключений);

C_{link} – ємність конденсатору ланцюга постійного струму (мкФ);

i_p – струм навантаження на стороні постійного струму (А);

i_{link} – струм на конденсаторі ланцюга постійного струму (А);

i_{CC} – струм на вході автономного інвертору (А).

Лінійні струми і напруги описуються системою рівнянь (2.5):

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

де E_m – амплітуда фазної напруги (В);

I_m – амплітуда фазного струму (А);

ω – кутова частота (рад/сек);

φ – фазовий зсув (градус); при даному в трифазній системі струмів:

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

Враховуючи рівняння (2.1), визначимо напругу на виході інвертора:

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

2.2 Математична модель інвертору в двофазній системі координат

У симетричній двофазній системі координат осі обмоток розміщені взаємно перпендикулярно, що дає можливість не враховувати взаємноіндуктивний зв'язок між ними та дозволяє зменшити кількість рівнянь, що описують перехідні процеси.

Перехідні процеси у трифазних мережах, в яких зберігається симетричність фаз, оптимально досліджувати у двофазній обертовій системі координат d-q [4].

Перехід на систему координат d-q відбувається таким чином:

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

Просторове уявлення перетворення координат проілюстровано на рисунку 2.2:

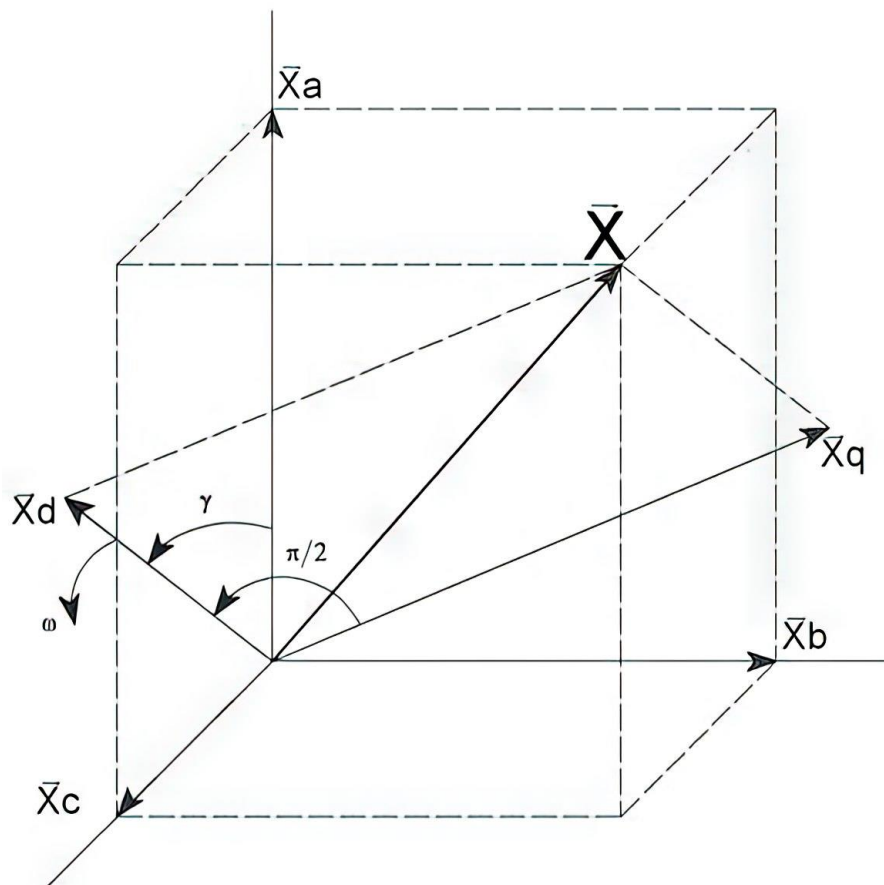


Рис. 2.2 - Геометрична демонстрація перетворення координат

$\vec{X}_a$, $\vec{X}_b$, $\vec{X}_c$ - вектори, що позначають фазні напруги, струм і потокозчеплення в трифазній системі;

$\vec{X}$ - результуючий вектор;

$\vec{X}_d, \vec{X}_q$ – вектори, що позначають фазні напруги, струм і потокозчеплення в двофазній обертовій системі координат d-q;

γ – кут зсуву осей відносно магнітної осі фази;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота обертання.

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

де $f_0 = \frac{1}{3}(f_A + f_B + f_C)$ – вектор складової нульової послідовності.

Рівняння (2.4) і (2.5) встановлюють прямий і зворотній зв'язок між дійсними струмом, напругою і потокозчепленням у трифазній системі і новими змінними в осях d-q.

Система диференціальних рівнянь у двофазній обертовій системі координат, при разом з загальноприйнятими припущеннями і використанням формули Парка-Горєва [6] матиме вигляд:

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

Де

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

2.3 Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в енергосистемі

В мережах, у яких активно розгортаються та експлуатуються СЕС, спостерігається погіршення показників якості ел. енергії. Насамперед це надмірне відхилення напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ, а також такого показника якості, як коефіцієнт спотворення синусоїди напруги K_U (рис. 2.3).

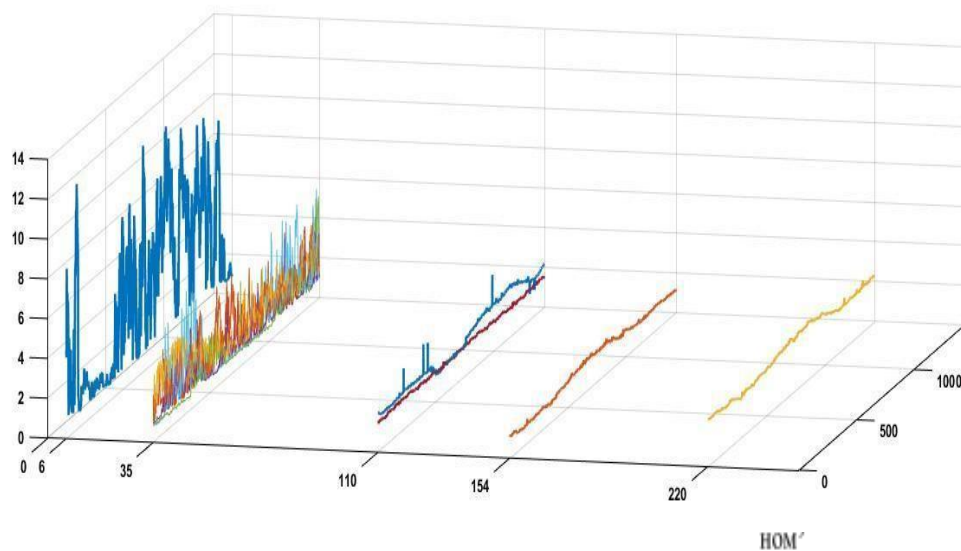


Рис. 2.3 Регістрограма коефіцієнту спотворення синусоїдності напруги в первинних колах підстанції

Аналіз параметрів і характеристик існуючих контролерів інверторів СЕС

Технологічна схема сонячної електростанції проілюстрована на рис. 2.4. Основними складовими СЕС є сонячні панелі, інвертор, розподільчий пункт та ЗТП (збірна трансформаторна підстанція).



Рис. 2.4 Основні елементи СЕС

Важливою складовою СЕС являється інвертор, основне призначення котрого – перетворення постійної напруги, отриманої з панелей, у трифазну змінну напругу, трекінг точки максимальної генерації (MPPT – maximum power tracking point), автоматична синхронізація напруги інвертора з напругою мережі (phase-locked loop-PLL) і інші.

В інверторах реалізуються різноманітні закони керування, серед них є такі, як:

- пропорційно-інтегральний (PI);
- пропорційно-резонансний (PR);
- прогнозуючий (DB) (рис. 2.5).



Рис. 2.5 Класифікація законів керування інвертором

Кожен з наведених підходів має свої переваги і недоліки. Як відомо, якість електричної енергії в енергосистемі залежить від параметрів, стану, режиму РДЕ і СЕС, як їх окремого взятого представника. В той же час на показники якості також значно впливають інвертори цих станцій та їх контролери. В експлуатації на СЕС знаходяться інвертори від багатьох різних виробників, в яких реалізовані різні закони керування. Тому задача по дослідженню впливу законів керування та конструктивних особливостей інверторів СЕС на показники якості електричної енергії є актуальною.

Особливості пропорційно-інтегрального контролеру інверторів СЕС

У пропорційно-інтегральному контролері (PI) інверторів СЕС зазвичай реалізовується перетворення струмів і напруг з abc-системи координат в d-q систему. Передатна функція системи керування інвертору, що працює за PI-законом керування, визначається виразом (2.12):

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

де K_p , K_i – пропорційний та інтегральний коефіцієнт підсилення контролеру;

S – оператор Лапласа.

Структурна схема керування інвертором з PI-контролером показана на рис. 2.6:

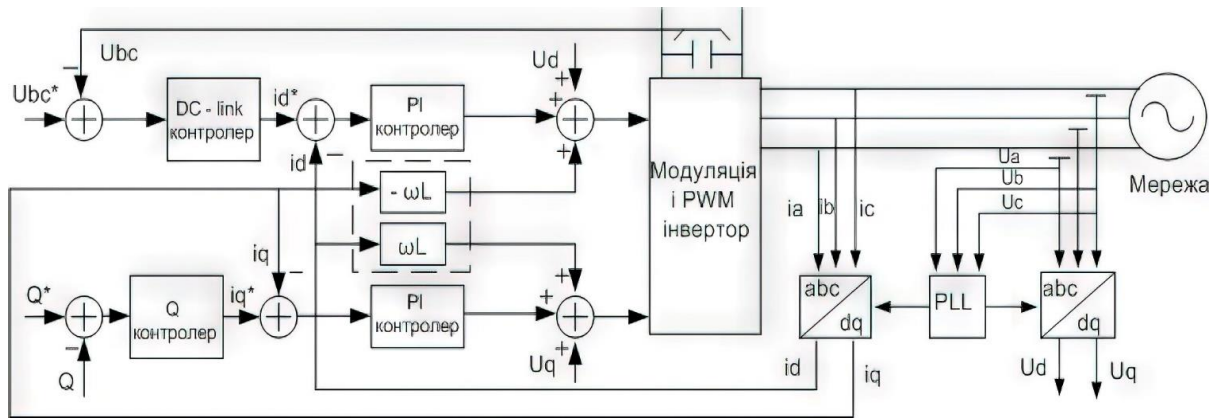


Рис. 2.6 Структурна схема керування інвертором з використанням PI-контролера

Для того, щоб покращити характеристики СЕС, програмне забезпечення контролеру, який керує інвертором, вдосконалюється. Так, наприклад, передатна функція (в abc-координатах) системи керування інвертором, в якому застосовується PI-закон керування, визначається за виразом (2.13):

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

де K_p, K_i – пропорційний та інтегральний коефіцієнт підсилення контролера,

S – оператор Лапласа;

$\omega_0 = 2\pi f$ – кутова швидкість;

f – частота.

На рисунку 2.6 зображена структурна схема керування інвертору з PI-контролером, в якому (через використання перетворення Парка-Горєва)

реалізовано перетворення сигналів напруг і струмів з трифазної abc-системи координат в обертову d-q систему. Контролер інвертору СЕС здійснює узгоджене з напругою енергосистеми на шинах станції керування інвертором таким способом, що увімкнення СЕС буде неможливим у разі відсутності напруги на шинах. У схемі керування інвертором струмові сигнали після перетворення з abc-системи координат в d-q систему, приходять на блоки, які працюють за РІ-законами керування. Потім перетворені сигнали на входи широтно-імпульсного модулятора PWM (pulse width modulation). На виході PWM отримуємо трифазну напругу. На схемі (рис. 2.6) можна побачити пристрій PLL (Phase-Locked Loop) автоматичного фазового підлаштування, за допомогою якого інвертор синхронізується з напругою в мережі.

Переваги РІ-контролера полягають в простоті реалізації та найменшому гармонійному спотворенню сигналу напруги на його виході в нормальному режимі роботи СЕС.

До недоліків РІ-контролеру можна віднести те, що він є керованим напругою енергосистеми на шинах СЕС. Тому, якщо в мережі мають місце спотворення синусоїди напруги чи струму (наприклад через увімкнення або вимкнення інших станцій, або потужних навантажень, тривалих спотворень, що виникають через однофазні КЗ в мережах з ізольованою чи компенсованою нейтраллю), то і на виході інвертору матимуть місце спотворення синусоїд струмів та напруг фаз[5].

Особливості пропорційно-резонансного контролера інвертору СЕС

Пропорційно-резонансні контролери (PR) інверторів СЕС стали поширенішими в минулому десятилітті, тому що в них використовуються фільтри гармонійних складових. Вони містять в собі простий гармонійний компенсатор гармонік низького порядку, який не має впливу на динамічні характеристики PR-контролерів СЕС, що приєднані до ЕС (рис. 2.7).

Передатна функція PR-контролера GPR знаходиться за виразом (2.14):

опорного сигналу на шинах СЕС. У блоці перетворення dq/αβ струми з d-q системи координат перетворюються в струми αβ-системи. Також порівняно з схемою (рис. 2.6), в структурній схемі PR-контролеру додатково використовуються блоки компенсаторів гармонік НС (harmonic compensator), що виконують функцію зменшення впливу 3-ї, 5-ї, 7-ї гармонік в напрузі на виході інвертору.

Недоліком PR-контролеру інвертору являється потреба в складній системі синхронізації інвертору з мережею. Також закон керування даного контролера не усуває вплив вищих гармонік (вище 11 гармоніки) на напруги на виході інвертору.

Передатна функція системи керування інвертором, у якій застосовується PR-контролер (в abc-системі координат) визначається за виразом (2.16):

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

Особливості прогнозуючого (DB) контролера інвертору СЕС

Одною з властивостей прогнозуючого контролера DB (deadbeat) інвертору СЕС являється застосування математичного апарату нечіткої логіки в його програмному забезпеченні з метою прогнозування сигналу на виході контролеру. Для роз'яснення передатної функції системи керування інвертором, в якій використовується прогнозуючий контролер DB, на рисунку 2.8 приведена однолінійна схема з DB-контролером.

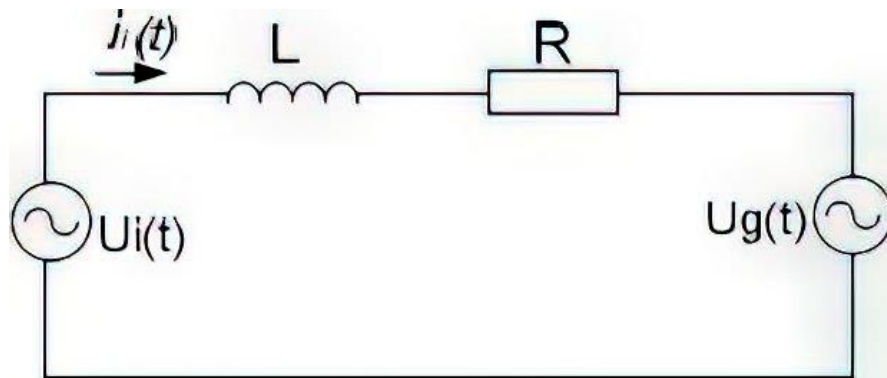


Рис. 2.8 Однолінійна схема СЕС з DB-контролером

На рис. 2.8 представлені: індуктивність $L = L_i + L_g$, та активний опір $R = R_i + R_g$, де L_i , R_i – індуктивний опір інвертору, L_g , R_g – індуктивний та активний опір мережі. Струм в колі інвертору визначається за виразом (2.17):

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

Де i_i – струм у колі інвертору;

R – загальний активний опір;

L – загальна індуктивність;

U_i – напруга на шинах інвертору;

U_g – напруга на шинах СЕС.

Після математичних перетворень отримаємо вираз (2.18):

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

де T_s – постійна інерції;

R – загальний активний опір;

L – загальна індуктивність.

Передатна функція DB визначається за виразом (2.19):

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

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.

У даному контролері використовується LCL-фільтр та блок, у якому застосована спрощена розрахункова модель ЕС та параметрів її режиму. Це дає можливість контролеру відчувати невідповідності параметрів моделі до поточного режиму енергосистеми на шинах СЕС.

До недоліків цього контролера можна віднести затримку в часі, що значно погіршує його швидкість та якість реакції на зміну параметрів режиму в ЕС [5].

2.4 Вибір програмного середовища для здійснення імітаційного моделювання

Для того, що б виконати імітаційне моделювання режимів роботи сонячної електростанції в децентралізованій системі електропостачання було обрано програму Matlab згідно наступних причин. Matlab – це середовище та мова програмування високого рівня для проведення інженерно-технічних розрахунків в різних галузях науки та техніки. Matlab містить в собі Simulink – інтерактивний інструмент для імітаційного моделювання і аналізу динамічних (в тому числі лінійних та нелінійних) систем в неперервному чи дискретному розрізі часу. Simulink надає можливість будувати графічні блок-діаграми з компонентів та створювати їх бібліотеку, виконувати імітацію роботи складних технічних систем, досліджувати їх працездатність та

вдосконалювати проекти. Simulink має повну інтеграцію з Matlab, та забезпечений постійним доступом до широкого спектру різноманітних інструментів для аналізу даних та моделювання, а також може використовувати алгоритмічні бібліотеки Matlab. Дані переваги роблять Simulink зручним набором інструментів для графічного моделювання різноманітних динамічних систем у різних галузях науки і техніки.

Matlab/Simulink є поширеним інструментом моделювання у науковому та інженерному середовищі, та знайшов широке застосування в моделюванні складних електротехнічних та енергетичних систем. Він містить в собі бібліотеку елементів, що симулюють моделі реальних пристроїв з галузі енергетики, силових напівпровідникових елементів, а також електротехнічних систем.

На основі приведених вище аргументів, Matlab/Simulink застосовується в якості основного засобу моделювання в даній роботі.

2.4.1 Здійснення моделювання режимів роботи. В пункті 1.5 зазначено, що фотоелектричні генерувальні станції можуть працювати як окремі самостійні системи, так і синхронно з мережою. Тому в даній кваліфікаційній роботі була розроблена імітаційна модель у програмному середовищі Simulink для двох режимів роботи СЕС, опираючись на функціональні схеми (рис. 2.9) та диференціальні рівняння, що описують електромагнітні процеси в мережі.

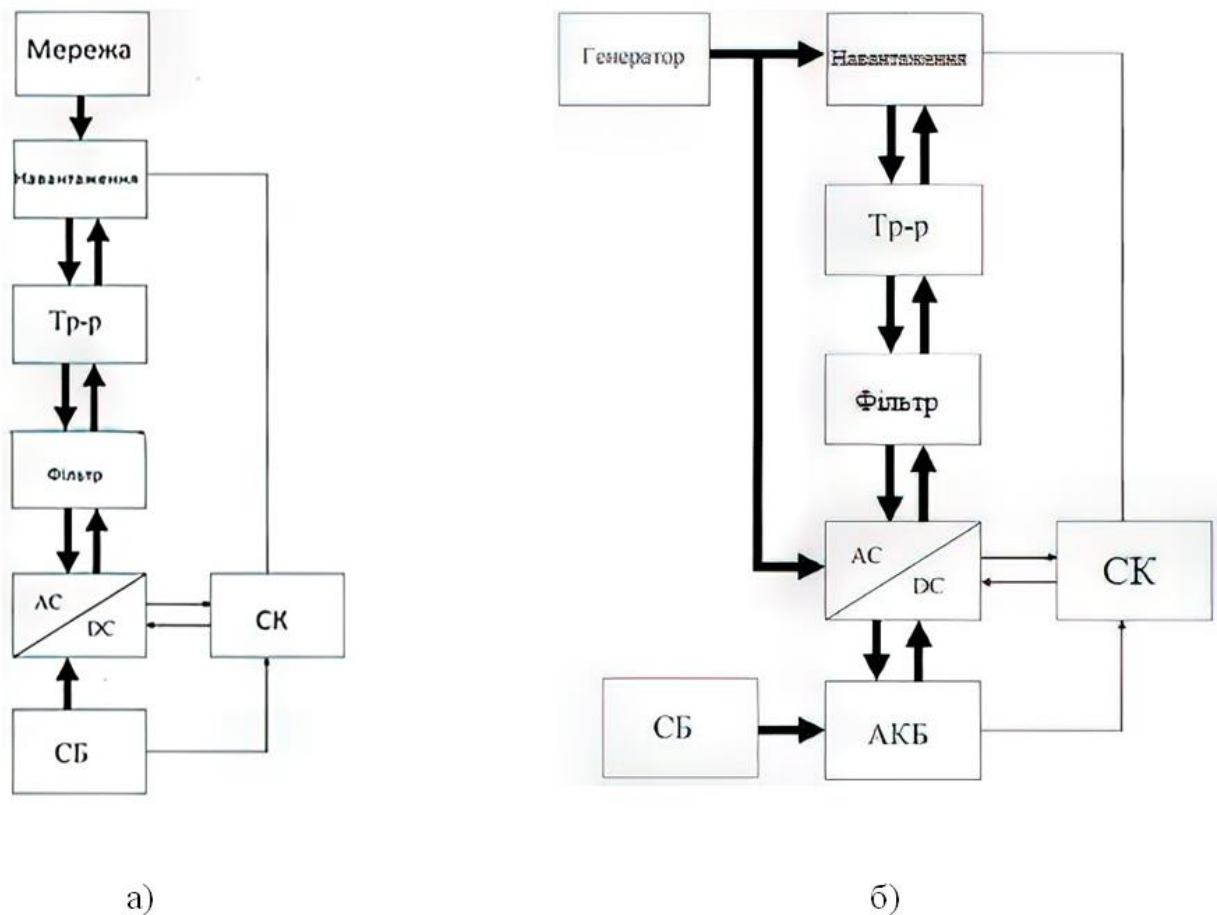


Рис. 2.9 Схеми енергетичної установки, що досліджується:
а) СЕС, підключена до мережі, б) автономна СЕС

Тр-р – силовий трансформатор;
 АС/DC – двонаправлений інвертор;
 СУ – система управління інвертором;
 СБ – сонячні батареї;
 АКБ – акумуляторна батарея.

З огляду на те, що інвертор можна вважати найголовнішим елементом сонячної електростанції, в наступному пункті процеси, що відбуваються в ньому, розглянемо детальніше.

2.4.2 Короткі теоретичні відомості про трифазні АІН. Трифазні транзисторні інвертори використовуються на практиці для створення

трифазних мереж змінного струму, та для керування двигунами змінного струму.

На перший погляд, найпростішим і очевидним варіантом побудови трифазного інвертора буде полягати у використанні трьох однофазних інверторів, по чергово зсунутих на 120° . Для реалізації такого інвертору необхідно 6 ключів. Фазні напруги, що отримуються, представлятимуть собою прямокутні імпульси, зміщені один відносно одного на третину періоду. Але цей варіант не являється ефективним і не застосовується [6]-[7].

З широкого різноманіття схемних рішень трифазних інверторів практичного застосування знайшла лише одна схема – бруківка, яка представлена на рис. 2.10.

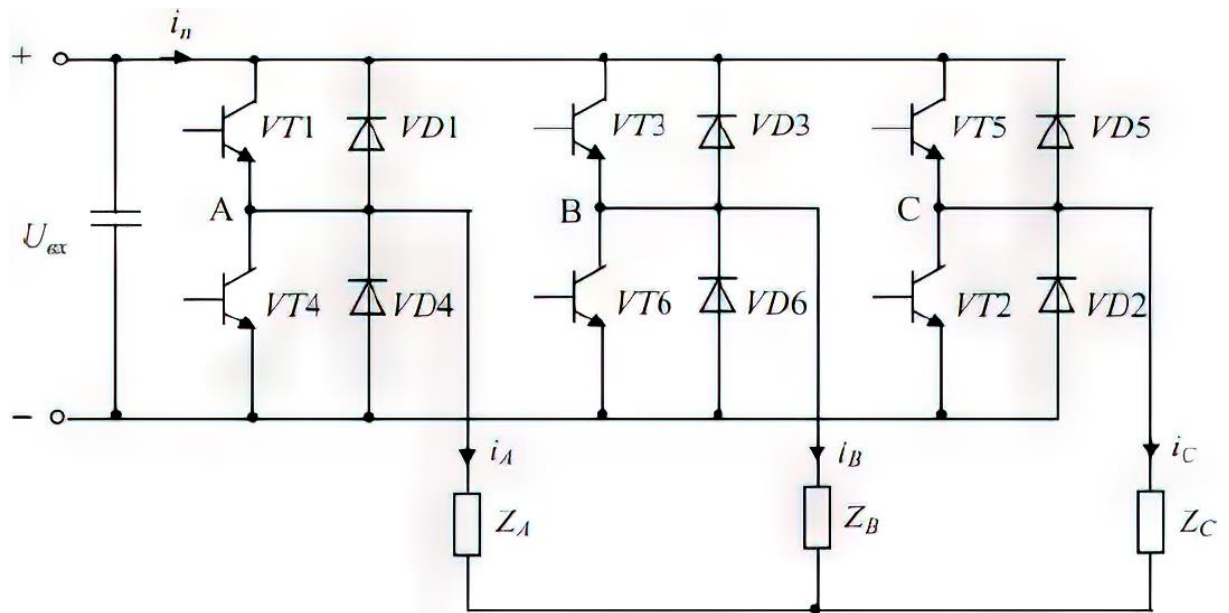


Рис. 2.10 – Трифазний мостовий інвертор

В даній схемі навантаження з'єднано в зірку і підключено прямо до вихідних затисків А, В, С інвертору без трансформатора. Навантаження можна з'єднувати і в трикутник, а для узгодження рівнів напруг інвертору і навантаження можуть використовуватися один трифазний або 3 однофазних трансформатори, як і в звичайних трифазних системах змінної напруги[9].

Характер електромагнітних процесів та характеристики інвертора визначаються наступними факторами:

- 1) схемою з'єднання навантаження – «зірка» або «трикутник»;
- 2) способом керування транзисторами – 180°-градусне або 120°-градусне керування;
- 3) характером навантаження, що визначається коефіцієнтом:

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

У випадку 180-градусного керування кожен з транзисторів знаходиться у відкритому стані на протязі 180°, пари транзисторів, які утворюють вертикальні стійки, як і в однофазних двохтактних схемах, працюють у протифазі, керування вертикальними стійками транзисторів виконується із зсувом в 120°. Алгоритм керування транзисторами і діаграми напруг в схемі наведені на рис. 2.11.

Транзистори на схемі пронумеровані по черговості їх включення відповідно. Керуючі імпульси на кожен наступний транзистор подаються через 60°. В результаті на інтервалі одного періоду змінної напруги виникає шість інтервалів I-VI змінного стану схеми. Наприклад, на першому інтервалі відкриті транзистори VT1, VT5, VT6. Якщо прийняти потенціал негативного полюса джерела живлення за нульовий, то потенціали точок А, В, С для першого інтервалу дорівнюватимуть:

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

Лінійні напруги на інтервалі I:

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

$$u_{CA} = \varphi_C - \varphi_A = 0.$$

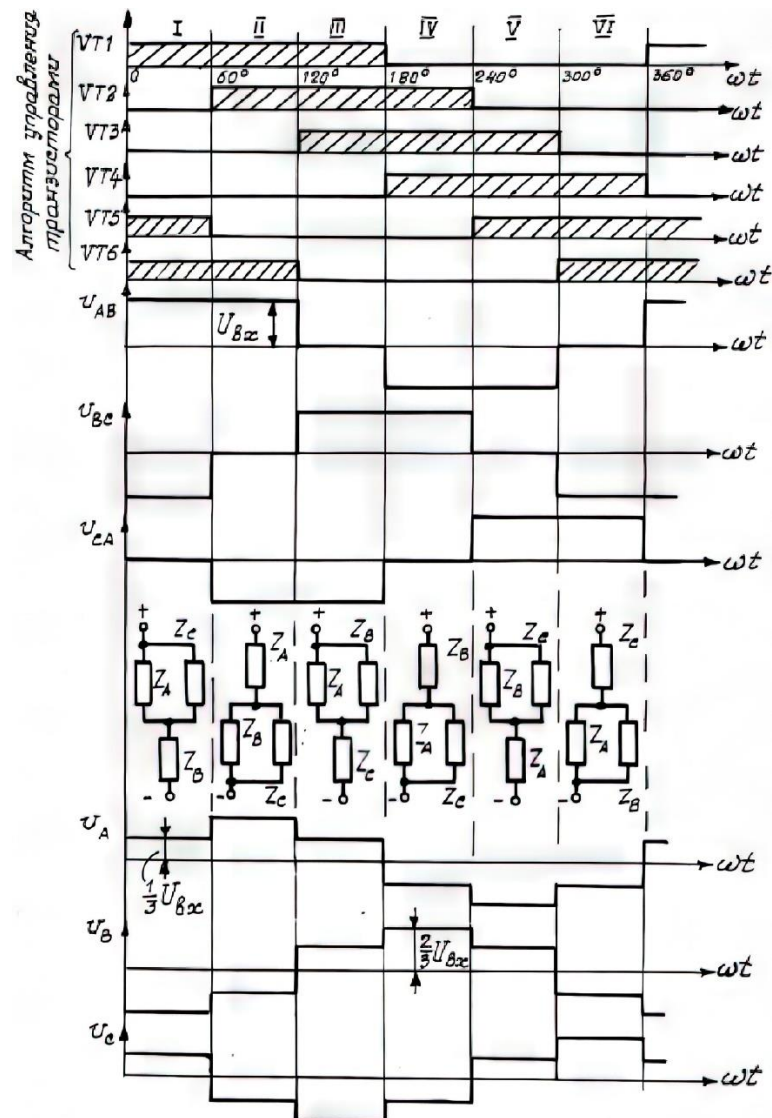


Рис. 2.11/ Принцип формування напруги при 180-градусному керуванні у трифазному мостовому інверторі.

Лінійні напруги формуються аналогічно і на інших ділянках. В результаті на виході інвертору з'являються три лінійних напруги (U_{AB} , U_{BC} , U_{AC}) з амплітудою, рівною напрузі U_{BX} , і з паузою на нульовому рівні 60° . Ці напруги взаємно зміщені на 120° . Присутність зазначеної паузи автоматично забезпечує достатньо гарну якість напруги, через те що відсутні третя і кратні їй гармонійні складові.

Ефективне значення лінійної напруги:

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

Фазні напруги легко і наочно визначаються для симетричного активного навантаження, тобто при $Z_A = Z_B = Z_C = R_H$. Схеми підключення для кожного із шести інтервалів показані на рис. 2.11. При будь-якому інтервалі фазні навантаження з'єднуються з джерелом живлення так, що 2 з них включені паралельно між собою, і послідовно з третьою. Виходячи з цього, очевидно, що при умові рівності опорів навантаження у фазах, напруги фаз, навантаження яких, увімкнені паралельно, дорівнюють $\pm \frac{U_{\text{ВХ}}}{3}$, а напруга фази, що включена послідовно - $\pm \frac{2}{3} U_{\text{ВХ}}$. Як результат, фазні напруги U_a , U_b , U_c мають двоступеневу форму з амплітудою першої ступені $\frac{U_{\text{ВХ}}}{3}$ і другого ступеня $\frac{2}{3} U_{\text{ВХ}}$. Фазні напруги також взаємно зсунуті на 120° .

Ефективне значення фазної напруги:

$$U_{\text{Фєф}} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}}{3} = 0,471 \cdot U_{\text{ВХ}} \quad (2.24)$$

При чисто активному навантаженні криві струмів I_A , I_B , I_C повторюватимуть форму фазних напруг.

При 120-градусному керуванні кожен з транзисторів знаходиться у відкритому стані 120° відповідно до алгоритму керування. Якщо при 180-

градусному керуванні в будь-який момент одночасно відкрито три ключа, то при 120-градусному – лише два.

З схем підключення навантаження для кожного інтервалу сталого стану транзисторів видно, що протягом всього часу до джерела підключені послідовно по два фазних навантаження, а третє знаходиться у відключеному стані. Якщо допустити, що опори фаз навантаження рівними і чисто активними, то вихідні фазні напруги будуть на відповідних інтервалах рівними $\frac{U_{\text{ВХ}}}{2}$, або нулю.

Ефективне значення фазної напруги:

$$U_{\text{Фэф}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{\sqrt{6}} = 0,408 \cdot U_{\text{ВХ}} \quad (2.25)$$

Тоді для лінійної напруги U_{AB} справедливо:

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

Тоді, прийнявши потенціал спільної точки з'єднання фаз навантажень за нульовий, для першого інтервалу отримаємо:

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

Аналогічно для другого інтервалу II:

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

В інтервалі III:

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

Таким чином, лінійна напруга має ступінчасту форму з амплітудою першого ступеню U_{BX} і другого $\frac{U_{BX}}{2}$.

Ефективне значення лінійної напруги:

$$U_{\text{Лєф}} = \frac{U_{BX}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot U_{BX} \quad (2.30)$$

У випадку активно-індуктивного навантаження процеси ускладнюються, а форма напруги буде змінюватися. Це можна віднести до недоліків 120-градусного керування інвертором. Обчислюючи відношення лінійних і фазних напруг при будь-якому із розглянутих законів, можна пересвідчитися, що в трифазному інверторі напруги $\frac{U_{\text{Лзф}}}{U_{\text{Фзф}}} = \sqrt{3}$, Як і в класичних системах трифазних синусоїдальних ЕРС [9].

Тактність схеми можна охарактеризувати режимом роботи транзисторних ключів. У двотактних схемах завжди виділяються пари протилежно працюючих ключів (один замкнений, інший розімкнений). В однотактних схемах ключі працюють синхронно.

Найважливіші характеристики АІН [10] - [11]:

- коефіцієнт перетворення по напрузі K_U (відношення максимального діючого значення основної гармоніки АІН до середньої напруги в ланцюзі постійного струму);
- якість вихідної напруги, яка визначається коефіцієнтом гармонік K_T для низькочастотної частини, і також коефіцієнтом компенсаційних гармонік $K_{г.к}$ для високочастотної частини частотного спектру.

2.4.3 Реалізація силового ключа. Для ефективної реалізації схеми автономного інвертора напруги ключі К повинні володіти властивостями двосторонньої провідності [12].

У прямому напрямку вектору ключі мають бути керованими, тобто момент включення ключа має визначатися системою керування. Такий ключ можливо реалізувати на біполярних або польових транзисторах, на одно- або двоопераційних тиристорах, на IGBT-транзисторах, чи на будь-якому іншому елементі, що може працювати в ключовому режимі і може бути керованим.

Для того, щоб придати ключу властивостей двосторонньої провідності, керований вентиль шунтують некерованим діодом, який включений у зустрічному напрямку. Приклади таких ключів приведені на рис. 2.12.

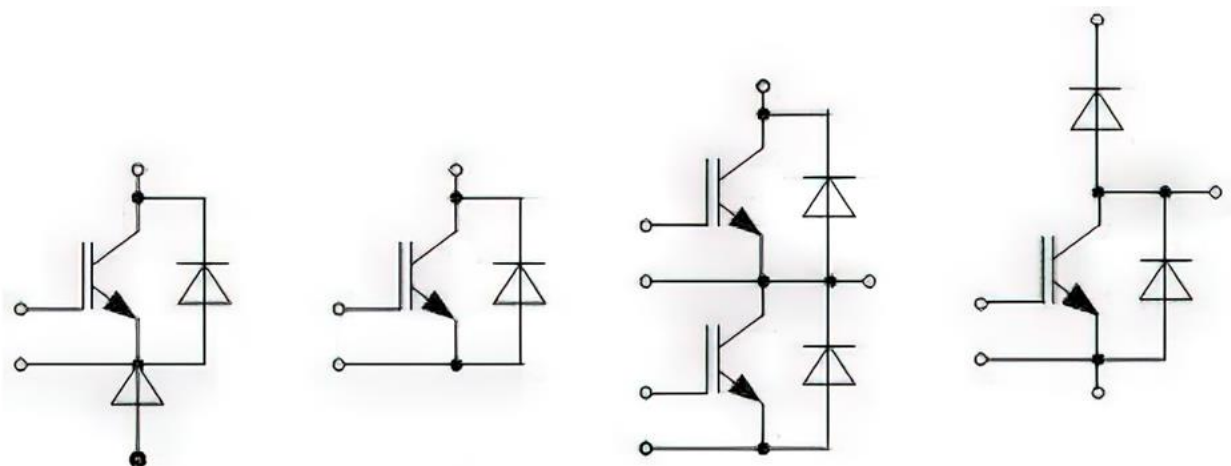


Рис. 2.12 – Приклади ключів, зашунтованих некерованими діодами

Напруга на ідеальному ключі дорівнює нулю, якщо вентиль або зворотний діод, що підключений до цього вентиля, проводить струм. Коли ж транзистор (або його зворотний діод) струм не проводить, то до нього шляхом провідного транзистора або зворотнього діода цього ж плеча прикладається позитивна напруга E_d джерела живлення. Якщо врахувати, що на транзисторі і зворотному діоді в момент провідності відбувається невелике падіння напруги, то на транзисторі в той же момент буде деяка позитивна напруга, відмінна від нуля, а на підключеному до нього зворотному діоді в моменті буде негативна напруга, рівна падінню напруги на діоді.

Те ж саме буде відбуватися в момент замкненого стану ключа. До напруги E_d буде додаватися напруга іншого відкритого діода цього ж плеча, або ж відніматися напруга іншого відкритого транзистора цього плеча.

З джерела живлення відбирається струм на етапі відкритих транзисторів, а струм в джерелі змінює свій напрямок на етапі відкритих зворотних діодів. Енергія, що накопичилась в реактивному елементі навантаження, повертається назад в джерело живлення, або іншими словами, відбувається енергообмін (рекуперація електричної енергії) між індуктивністю навантаження і джерелом. Цей енергообмін забезпечують зворотні діоди.

На вході інвертору повинен бути елемент, що може прийняти електричну енергію. Якщо конденсатор відсутній, діоди випрямляча не пропускать струм у зворотньому напрямку під час рекуперації електричної енергії [13].

Регулювання вихідної напруги АІН

Регулювати значення вихідної напруги АІН можна кількома способами[9]-[12]:

- А) широтно-імпульсне регулювання (ШІР);
- Б) метод геометричного підсумовування;
- В) широтно-імпульсна модуляція (ШІМ).

Найбільшого застосування на практиці отримали 3 способи широтно-імпульсного регулювання вихідної напруги інверторів:

1. Регулювання за прямокутним законом, коли середнє значення вихідної напруги і ширини імпульсу змінюються за прямокутною ознакою;
2. Регулювання за трапецеїдальним законом – коли середнє значення вихідної напруги нагадує форму трапеції;
3. Регулювання за синусоїдальним законом, при якому ширина імпульсів вихідної напруги змінюється за синусоїдальним законом.

Регулювання кривої вихідної напруги здійснюється внутрішніми засобами шляхом керування силовими ключами таким чином, щоб відбувалася зміна ширини імпульсів, формування напруги на навантаженні. Якщо передній фронт складових імпульсів зміщувати на кут α в сторону відставання, як проілюстровано на рисунку 2.13 (чи задній фронт в сторону випередження, чи обидва одночасно), то в результаті буде зменшуватися тривалість λ складових імпульсів, що, в свою чергу змінюватиме діюче значення напруги на навантаженні:

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

З отриманого виразу і часової діаграми можна зробити висновок, що максимальна напруга відповідає нульовому значенню кута α , а при $\alpha = \pi$ вихідна напруга дорівнюватиме нулю. Регулювальна характеристика, яка побудована за отриманою залежністю, має форму, показану на рис. 2.14. Даний спосіб регулювання вихідної напруги є кращим, тому що регулювання напруги на виході силового блоку здійснюється через систему керування, що виключає механічні перемикання в схемі силового блоку, а також істотно

підвищується динаміка або швидкість регулювання вихідної напруги інверторів.

Виокремлюють два типи широтно-імпульсної модуляції:

- Однополярна ШІМ;
- Двополярна ШІМ.

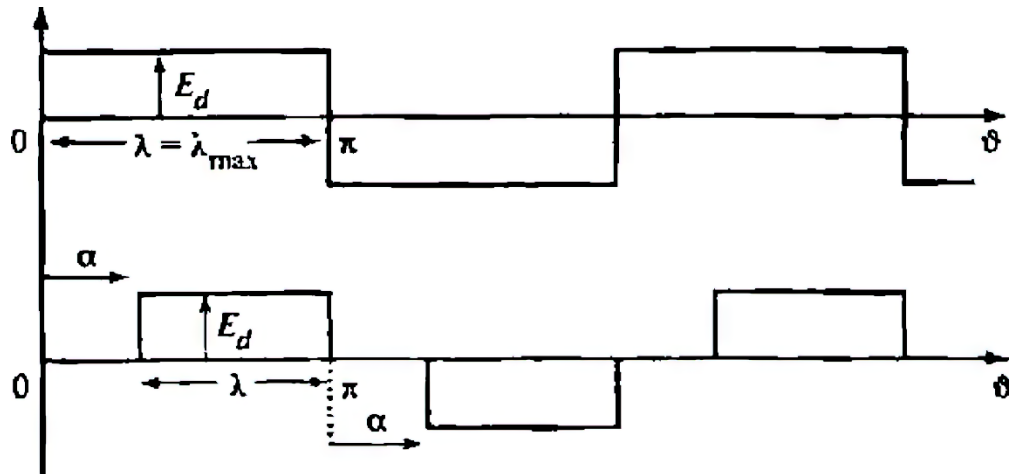


Рис. 2.13 – Імпульси ШІМ

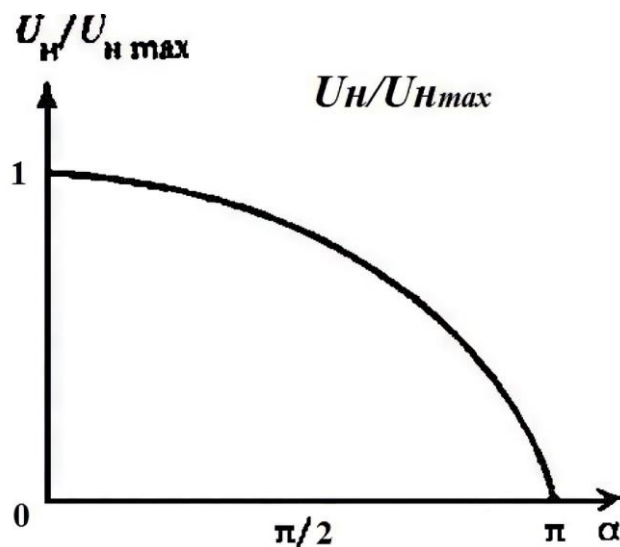


Рис. 2.14 Регулювальна характеристика

При однополярній ШІМ вихідна напруга формується з послідовності однополярних імпульсів (рис. 2.15, а). Для формування паузи при активно-індуктивному навантаженні схема керування має забезпечити протікання

струму навантаження через 2 вентиля, що замкнуть навантаження накоротко до одної з шин джерела живлення (наприклад, відкритий стан VT1 і VT3).

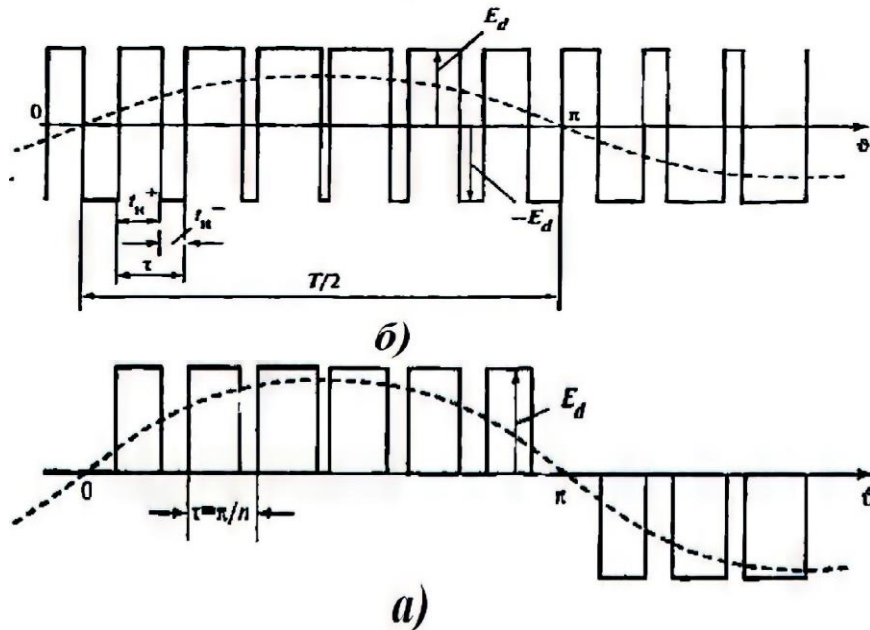


Рис. 2.15 – Однополярна (а) та двополярна (б) ШІМ

При двополярній ШІМ паузи однополярної ШІМ заповнюються імпульсами протилежної полярності (рис. 2.15, б).

При збільшенні частоти високочастотної складової (опорної частоти) в порівнянні з низькочастотною (частотою основної гармоніки), огинання вихідної напруги наближається до синусоїди, і, відповідно, стає легше відфільтрувати високочастотну складову вихідної напруги [13].

2.4.4 Опис можливих режимів роботи інвертору. Як вже було згадано в першому розділі, в даній роботі досліджується автономна та мережева варіанти СЕС.

Характерною відмінністю роботи в автономному режимі є застосування двонаправленого інвертору напруги. Цей пристрій використовується для перетворення постійного струму в змінний і передачі енергії в одному з двох визначених напрямків залежно від внутрішнього керуючого сигналу: від ланцюгів постійного струму до ланцюгів змінного струму і навпаки. Автономний інвертор напруги зі сторони змінного струму

призначений для роботи в режимі залежного і провідного інвертора в залежності від керуючого сигналу.

Автономний інвертор напруги використовується для:

- Живлення автономної мережі в режимі провідного інвертору (в циклічному режимі заряду/розряду);
- Живлення автономної мережі в режимі залежного інвертора для стабілізації напруги (при зниженні напруги АІН видає потужність в автономну мережу, а при перенапругах споживає потужність з автономної мережі);
- Стабілізації напруги при роботі у централізованій мережі;
- Забезпеченні безперебійним живленням споживачів (при наявності зовнішньої мережі працює в режимі стабілізатору, а при відсутності – переходить в режим провідного інвертору).

Автономний інвертор напруги може працювати в таких режимах:

- Підтримання напруги на навантаженні в режимі залежного;
- Підтримання напруги на навантаженні в режимі провідного;
- Підзарядка автономної мережі в режимі залежного;
- Робота як активний фільтр, при наявності певного блоку керування.

При роботі в режимі залежного АІН працює, як інвертор, що залежить від мережі (або іншого джерела) в циклічному форматі: споживаючи або видаючи потужність на сторону змінного струму. Керування струмом споживання/заряду та рекуперації/розряду виконується за відповідною функцією зворотного зв'язку. Основна функція зворотного зв'язку – підтримка змінної напруги в заданому діапазоні: при зниженні напруги АІН додає потужності (розряжає АКБ), а при підвищенні напруги мережі споживає потужність (заряджає АКБ).

В режимі роботи провідного АІН працюватиме, як головне джерело мережі (інші джерела відсутні або є залежними), і генерує стабілізовану напругу. Перехід з провідного режиму в залежний необхідний в момент

введення іншого провідного джерела в мережу. При цьому інвертор має відключитися безпосередньо перед підключенням іншого джерела по сигналу до мережі, і перейти у залежний режим. Перехід з залежного режиму у провідний може відбуватися у двох випадках: неочікуване вимкнення залежного джерела (відсутність мережі), або заплановане відключення залежного джерела в автономній мережі.

Додатковою функцією роботи інвертору з мережею може бути покращення показників якості електроенергії споживачів через реалізацію блоку керування інвертором як силового активного фільтра. Силкові активні фільтри можуть компенсувати гармоніки струму шляхом застосування рівного по значенню, але протилежного гармонійному струму компенсації. У такому випадку силовий активний фільтр працює, як джерело струму, яке вводить гармоніки, що генеруються навантаженням, але зі зсувом на 180° по фазі. В результаті частини гармонійних струмів, які наявні в струмі навантаження, придушуються дією активного фільтра, а струм джерела залишається синусоїдальним з відповідною фазною напругою.

Висновки до розділу

Трифазні інвертори виконують такі основні завдання:

- перетворення в змінний для ЕС постійного струму;
- синхронізацію по частоті, напрузі і куту з ЕС;
- стабілізацію вихідної напруги;
- обмеження струмових перевантажень при різних видах к.з.

Комутація таких елементів, як тиристори і транзистори спотворює форму кривих струму в з'єднаній мережі змінного струму, що приводить до появи вищих гармонік в мережі.

В мережах, у яких активно розгортаються та експлуатуються СЕС, спостерігається погіршення показників якості ел. енергії. Насамперед це

надмірне відхилення напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ, а також такого показника якості, як коефіцієнт спотворення синусоїди напруги K_U .

Для того, щоб виконати імітаційне моделювання режимів роботи СЕС в системі децентралізованого електропостачання було обрано програму Matlab з Simulink.

РОЗДІЛ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕС НА БАЗІ ТРИФАЗНОГО ІНВЕРТОРА В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЖИВЛЕННЯ

3.1 Опис моделі інвертору при роботі у провідному та залежному режимах

Комп'ютерна модель, виконана на схемотехнічній елементній базі Simulink, представлена на рис. 3.1. Вона складається з таких функціональних блоків: генератору, інвертору, системи керування інвертором, навантаження та акумуляторної батареї.

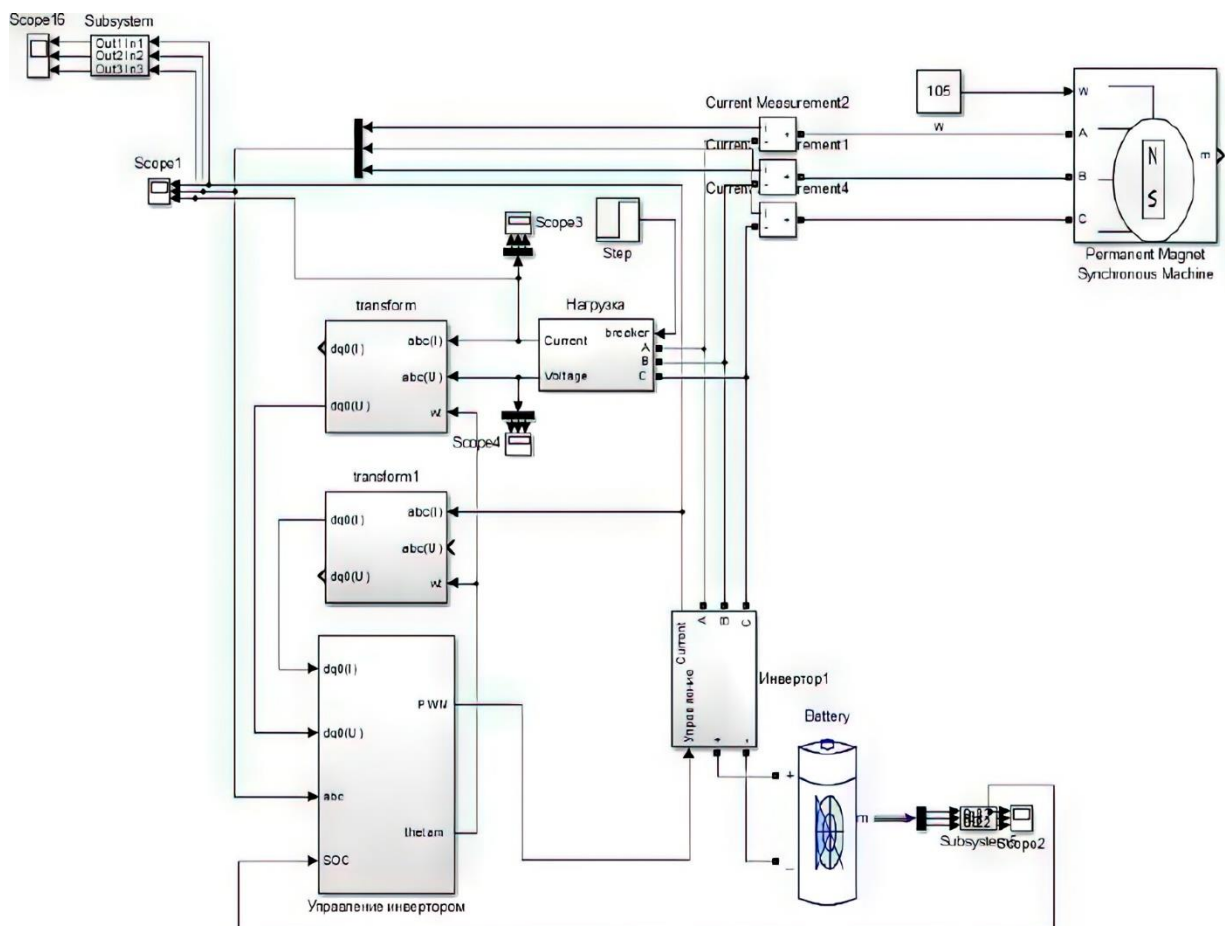


Рис. 3.1 Модель автономного режиму СЕС

Моделювання мережі

В автономному режимі роль зовнішньої мережі виконуватиме встановлений дизель-генератор, який призначений для резервного живлення власних потреб сонячної станції в темну пору доби. Дизель-генератор може бути оснащеним всепогодним шумопоглинаючим капотом для встановлення під відкритим небом. Протягом світлої пори доби територія сонячної станції може використовувати генерацію СЕС як резервне джерело живлення, а у нічну період доби дану функцію виконує дизель-генератор.

В якості прикладу обрано генератор ВДГ 190-600, з даними характеристиками (табл. 2.2):

Таблиця 3.1 - Параметри генератора

Кількість фаз	3
Номінальний момент, M_H	192 Нм
Номінальний струм, I_H	17 А
Номінальна частота обертання, n_H	105 об/хв
Число пар полюсів, p	30
Опір фази, R	0,493 Ом
Коефіцієнт перетворення, C_m	11,3
Індуктивність, L	8,36 мГн
Маса ротора, G	7,1 кг
Діаметр ротора, D	0,51 м
Момент інерції ротора, J	0,46 кг·м ²

Щоб змоделювати генератор в програмному середовищі Simulink був використаний блок Permanent Magnet Synchronous Machine (рис.3.2).

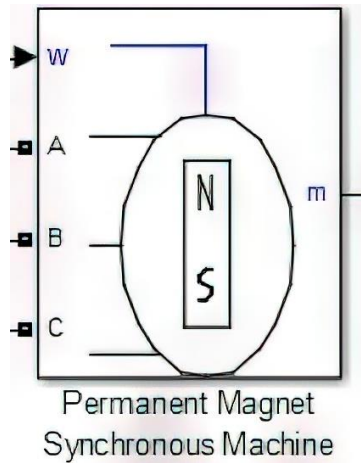


Рис. 3.2 Блок, що моделює генератор

Параметри блоку були задані відповідно до характеристик обраного в якості прикладу генератору ВДГ 190-600 (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. Configuration Parameters Advanced 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. Configuration Parameters Advanced Stator phase resistance Rs (ohm): 0.493 Armature inductance (H): 0.00835 Machine constant Specify: Voltage Constant (V_peak L-L / krpm) Flux linkage: 1.1762 Voltage constant: 640 Torque constant: 5.2928 Pole pairs p (): 3 Initial conditions [wm(rad/s) thetam(deg) ia,ib(A)]: [10,0,0,0]
--	--

Рис. 3.3 – Параметри блоку PMSM

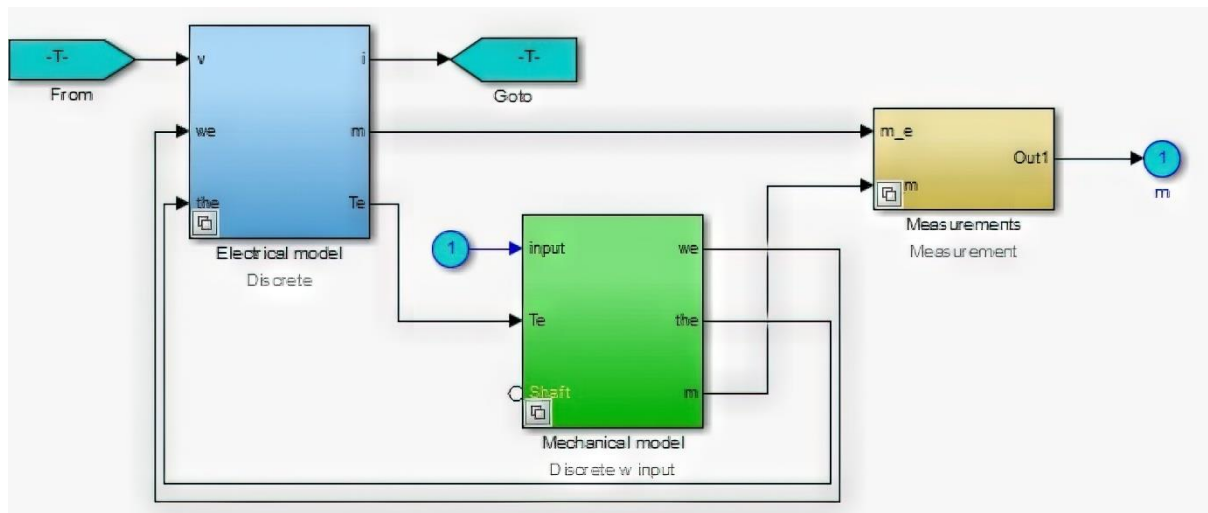


Рис. 3.4 Структура блоку генератору.

Модель генератору містить в собі електричну частину, механічну частину, і блок вимірів (рис. 3.4):

Розглянемо детальніше електричну частину блоку генератору на рис. 3.5:

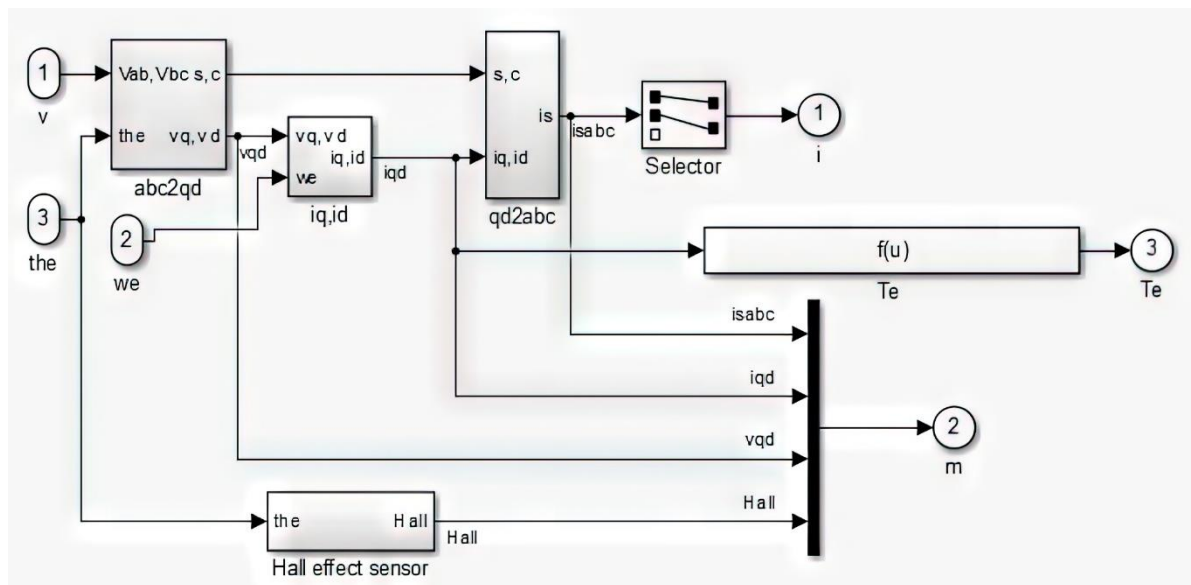


Рис. 3.5 Структура електричної частини генератору.

Розрахунок векторних компонентів напруги проводиться через використання прямого перетворення Парка-Кларка. З напруг отримуються векторні складові струму, які і створюють електромагнітний момент.

Перетворення Парка-Кларка здійснюється у 2 етапи: спочатку струми переводяться в двох координатну систему (3.1), це можливо, бо вони лежать в одній площині, а далі переходять до обертової системи координат, співнаправлену з вектором потокозчеплення (3.2), що дозволяє виділити складову, яка визначає електромагнітний момент [14].

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

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

Блок abc2qd, (рис. 3.5) виконує пряме перетворення Парка-Кларка фазних напруг генератора в напругу у поздовжньої і поперечної координат. В аналітичному вираженні:

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

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

де U_d, U_q – складові напруги в d-q координатах.

Лінійні напруги U_{ab} та U_{bc} розраховуються за формулами:

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

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

Блок на основі фазних напруг поперечної і поздовжньої складових фазної напруги розраховує відповідні складові фазних струмів i_d та i_q :

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

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

де i_q – q-складова струму;

i_d – d-складова струму;

$Flux$ – магнітний потік ротору;

L_d – d-складова індуктивності;

L_q – q-складова індуктивності.

Блок T_e (рис. 3.5) обчислює електромагнітний момент, опираючись на складові струму по формулі:

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

Блок $qd2abc$ (рис. 3.5) виконує зворотне перетворення Парка-Кларка складових струмів поперечної і поздовжньої координат i_d та i_q в амплітуди фазних струмів i_a, i_b, i_c . В аналітичній формі:

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

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

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

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

До входу механічної частини надходять зовнішній і електромагнітний моменти, на виході отримуються значення електричного і фізичного кута, та частоти обертання ротору.

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

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

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

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

3.1.1 Моделювання акумуляторної батареї. Блок акумуляторної батареї в середовищі Matlab/Simulink подано на рис. 3.6.

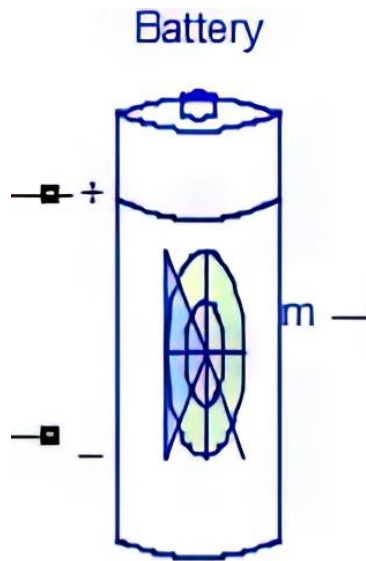


Рис. 3.6 – Блок акумуляторної батареї

В якості акумуляторної батареї використовуються свинцево-кислотні акумулятори номінальної напруги 48В і сумарною ємністю 1250 А · год. Параметри блоку АКБ наведені на рис. 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 блоку АКБ

Структура даного блоку представлена на рис. 3.8.

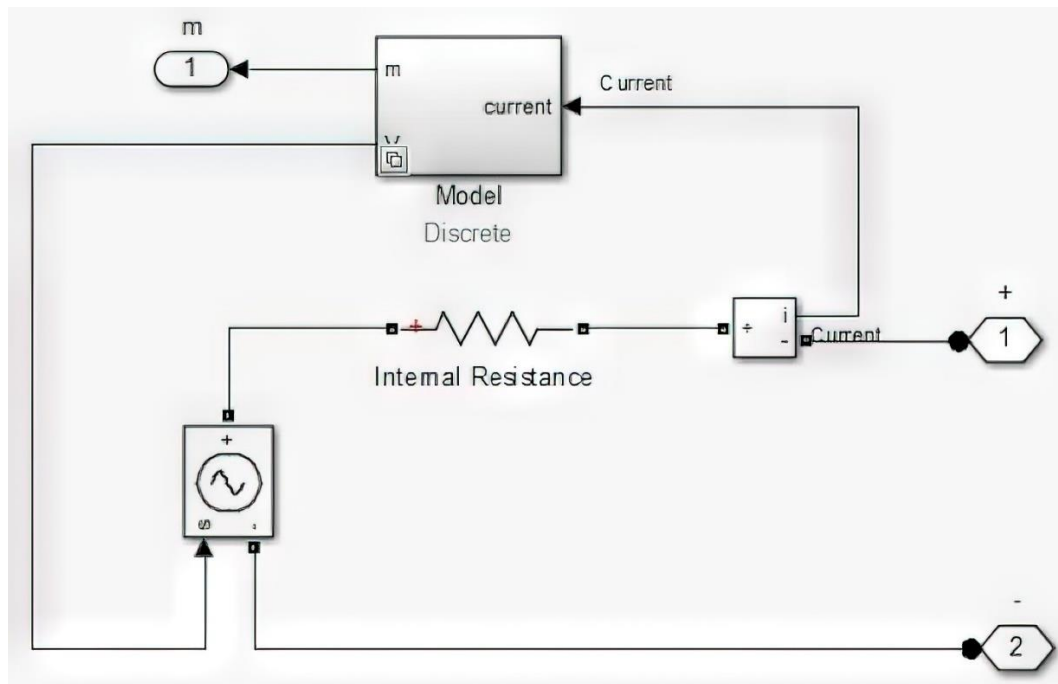


Рис. 3.8 Структура блока АКБ

Вихід m компоненту Model видає дані про рівень заряду акумуляторної батареї, напругу, струм зарядки/розрядки.

3.1.2 Моделювання трифазного інвертору. Інвертор (DC/AC converter) – це пристрій, призначений для перетворення постійного струму у змінний і зміни величини частоти або напруги. Частіше всього представляє собою генератор періодичної напруги, за формою, наближеною до синусоїди, або дискретного сигналу. Блок такого генератору наведений на рис. 3.9.



Рис. 3.9 Блок інвертору

Принцип роботи інвертору заснований на перемиканні джерела струму постійної напруги з метою періодичної зміни полярності напруги на виході навантаження. Частота перемикання створюється сигналами керування, що формуються керуючою схемою (контролером). Контролер може також виконувати такі додаткові завдання, як:

- Регулювання напруги;
- Синхронізація частоти відкривання ключів;
- Захист від перевантаження, та інші.

Принцип дії інвертора з синусоїдальною формою вихідної напруги (рис. 3.10) полягає в тому, що через попереднє високочастотне перетворення отримується напруга постійного струму, значення якої близьке до амплітудного значення синусоїдальної напруги на виході інвертору. Потім цю напругу постійного струму перетворюють, як правило, за допомогою мостового інвертору, в змінну напругу з формою, близькою до синусоїдальної, за рахунок використання відповідних принципів керування транзисторами даного мостового інвертору. Ідея цієї багаторазової широтно-імпульсної модуляції полягає у тому, що в проміжку кожного півперіоду вихідної напруги інвертору відповідна пара транзисторів комутується на високій частоті (багаторазово). При цьому тривалість цих високочастотних імпульсів змінюється відповідно синусоїдальному закону. Потім через високочастотний фільтр нижчих частот виділяється синусоїдальна складова вихідної напруги інвертору.

В даному випадку інвертор побудований на шести IGBT-транзисторах, з'єднаних зустрічно і паралельно з діодами. Падіння напруги на IGBT-транзисторах у відкритому стані становить 2 В, на діодах – 0,8 В.

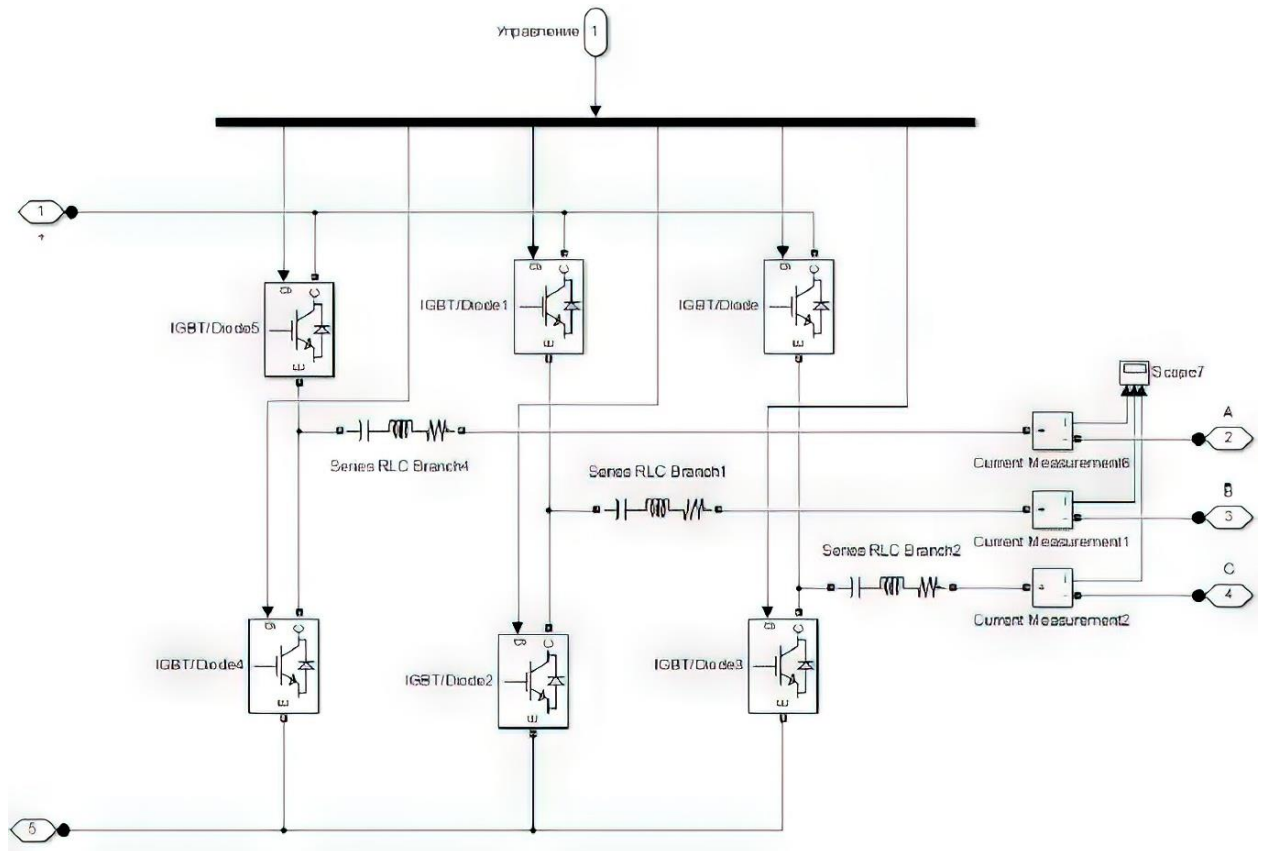


Рис. 3.10 Структура блоку інвертору

Широтно-імпульсний сигнал, який керує роботою інвертору надходить на кожен з шістьох транзисторів і створюється блоком керування. Параметри використаних транзисторів наведені на рис. 3.11.

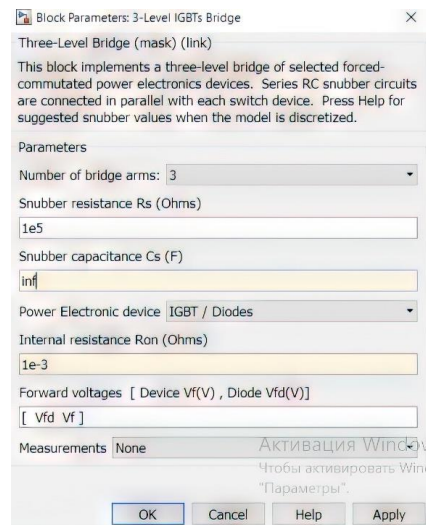


Рис. 3.11 Параметри транзисторів

Моделювання блоку керування інвертором

Блок керування (рис. 3.12) необхідний для отримання керуючих сигналів. В ньому генерується широтно-імпульсний сигнал, а також здійснюється перемикання між режимами провідного і залежного.

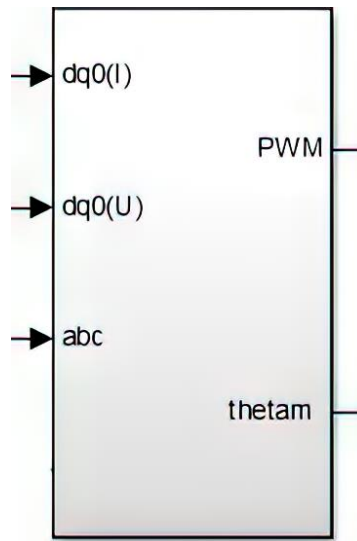


Рис. 3.12 Блок керування інвертором

Структурна схема даного блоку продемонстрована на рис. 3.13. Перемикання між режимами провідного і залежного відбувається при відсутності або наявності напруги в мережі відповідно. Даний блок виконує функції синхронізації з мережею в режимі залежного, визначення наявності напруги на ньому для перемикання режимів, а також для задання кута в режимі провідного.

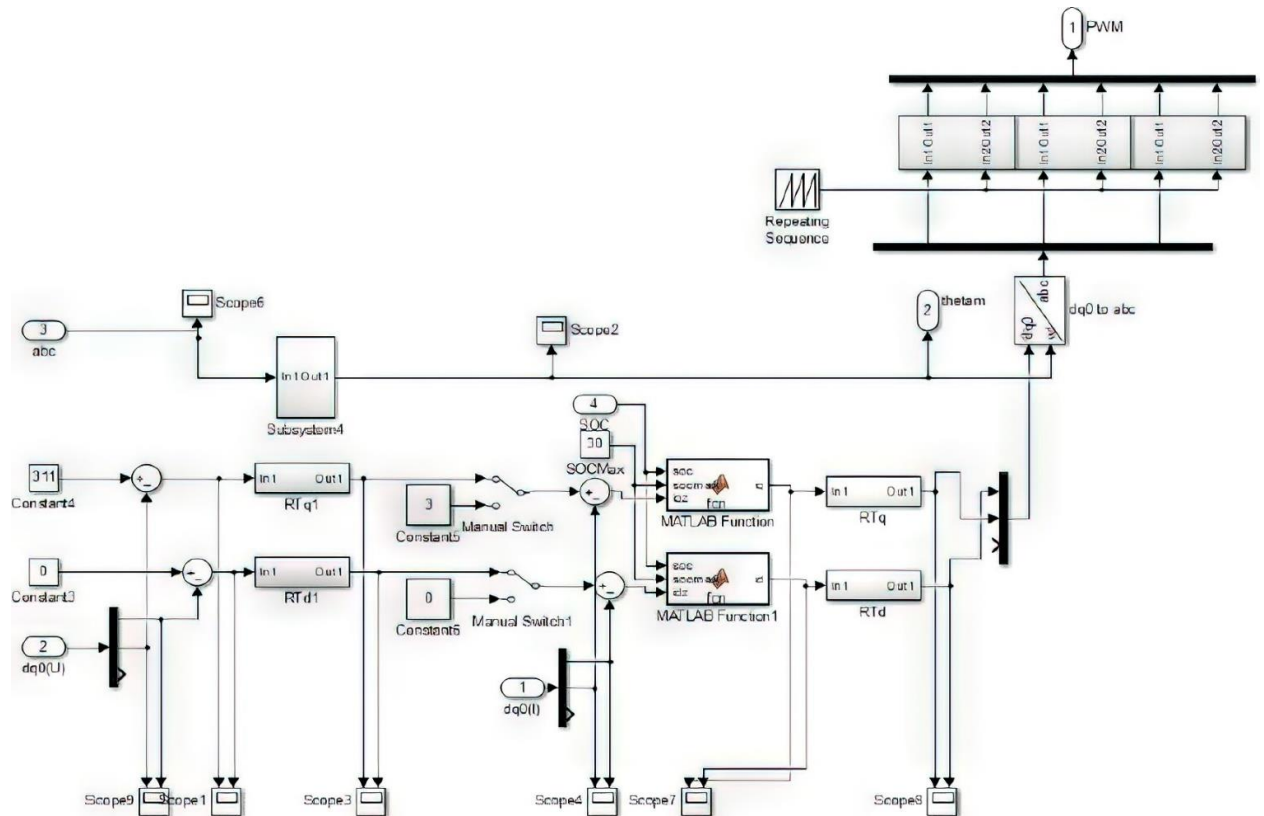


Рис. 3.13 Структурна схема блоку керування інвертором

Піддамо детальнішому розгляду складові блоку керування (рис. 3.14)

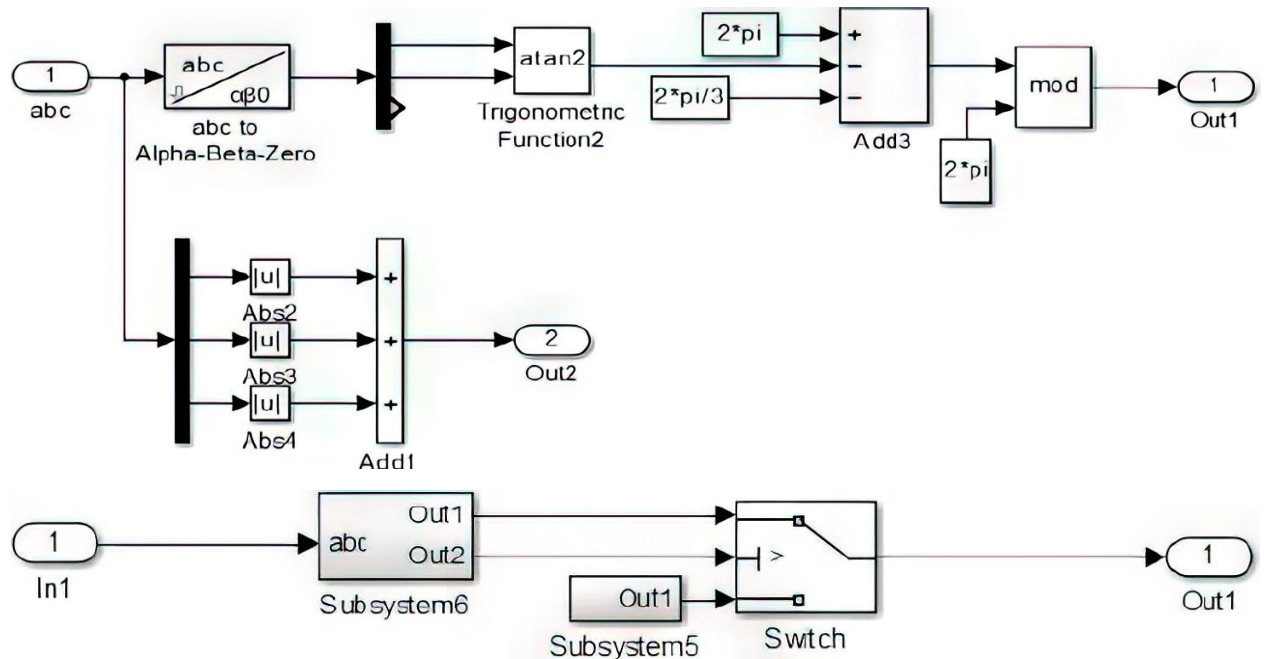


Рис. 3.14 Структурна схема блоку, що відповідає за синхронізацію з мережею

На рис. 3.15 наведений контур задання напруги і вираховування помилки.

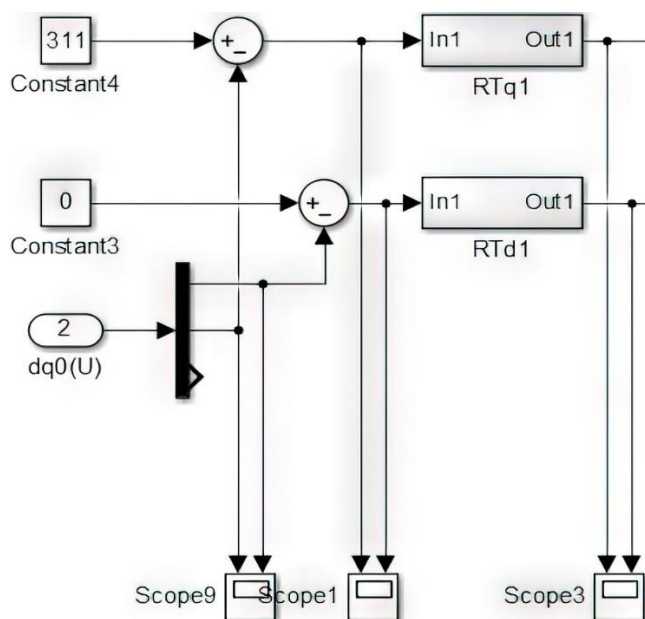


Рис. 3.15 Регулятор контуру напруги

Параметри даного регулятора напруги наведені на рис. 3.16:

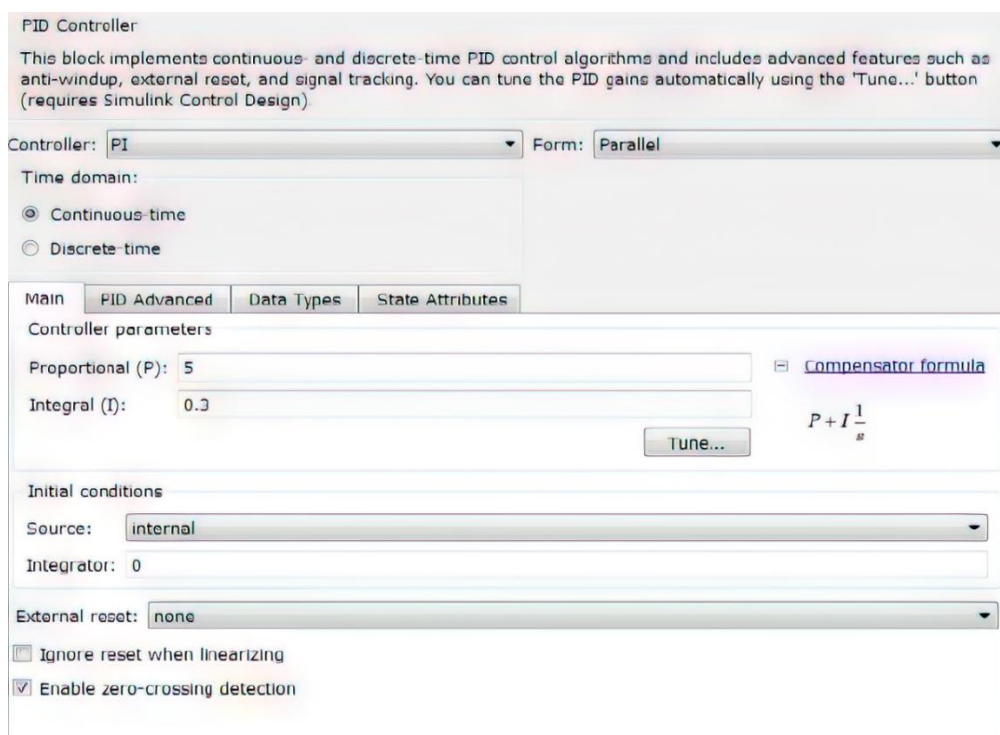


Рис. 3.16 Параметри регулятора контуру напруги

На рисунку 3.17 представлено контур задання струму:

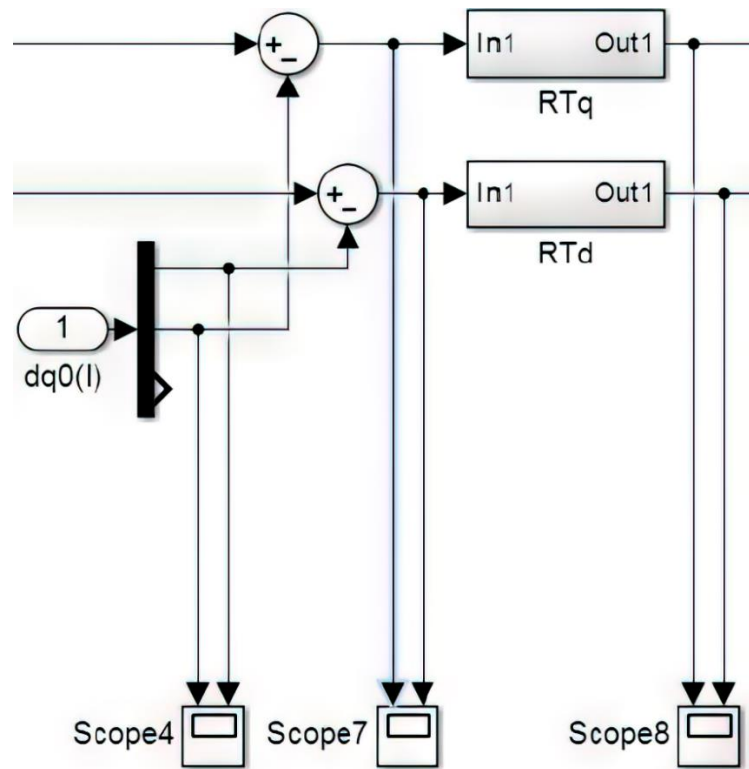


Рис. 3.17 Контур регулятора струму

Параметри даного регулятора наведені на рис. 3.18

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): **10** [Compensator formula](#)

Integral (I): **0.3** [Tune...](#) $P + I \frac{1}{s}$

Initial conditions

Source: **internal**

Integrator: **0**

External reset: **none**

☐ Ignore reset when linearizing

☒ Enable zero-crossing detection

Рис. 3.18 Параметри регулятора контуру струму

Для того, щоб бажані значення струму трансформувались в трифазну систему, необхідно використати блок зворотного перетворення Парка-Кларка (рис. 3.19):

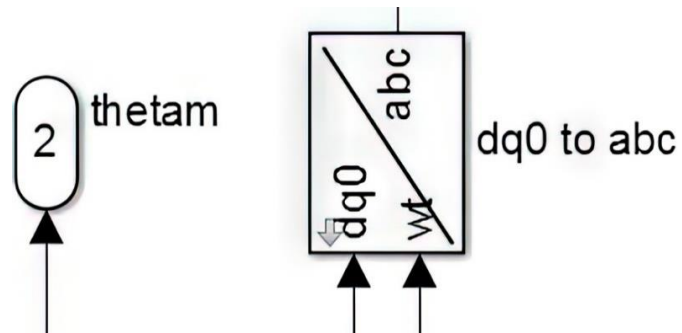


Рис. 3.19 Блок зворотного перетворення

Виходи з блоків зворотного перетворення Парка-Кларка приходять на блоки, що генерують ШІМ-сигнал (рис. 3.20)

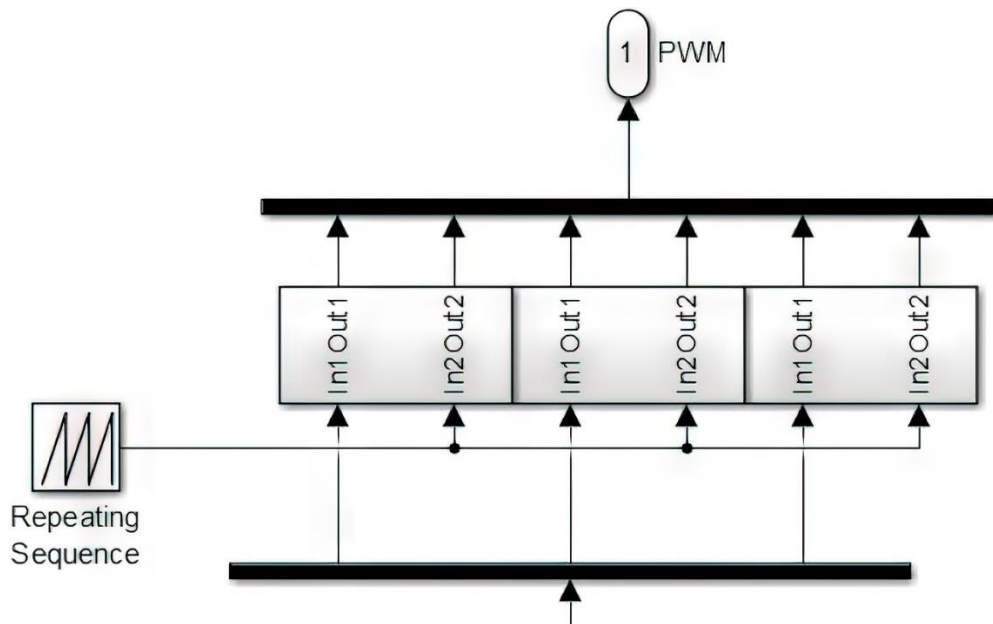


Рис. 3.20 Блок генерації ШІМ-сигналу

Структурна схема даного блоку наведена на рис. 3.21

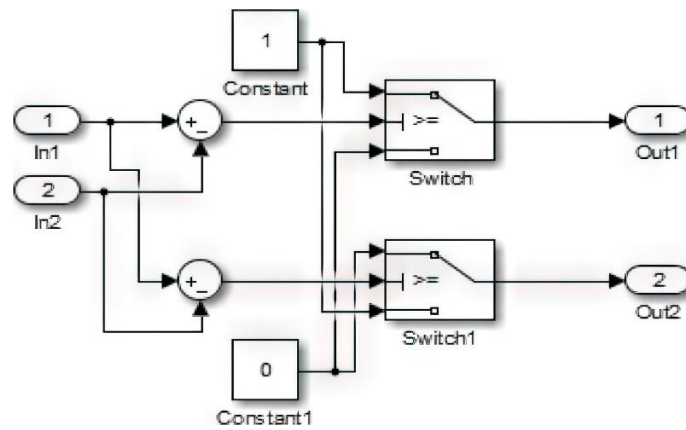


Рис. 3.21 Схема блоку генерації ШІМ-сигналу

Перетворення для створення контурів струму і напруги

Для того, щоб створити контури струму і напруги, а також для синхронізації інвертору з мережею, необхідно використати кілька видів перетворень. Блоки цих перетворень наведені на рис. 3.22.



Рис. 3.22 Блоки перетворення

Де блок «abc to dq0» – пряме перетворення Парка-Кларка, що описується формулою 3.17:

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

Блок «dq0 to abc» - зворотне перетворення, що описується формулою 3.18:

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

Блок «abc to $\alpha\beta 0$ » - перехід від трифазної системи до двофазної, описаний формулою 3.19:

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

Щоб виконувати пряме і зворотне перетворення Парка-Кларка, необхідно подати на вхід блоків значення ωt . Також необхідно враховувати наявність налаштувань в цих блоках. У параметрі Rotating Frame Alignment at $\omega t = 0$ варто вибрати «phase A axis», бо в іншому випадку інвертор буде видавати струм, що не збігається по фазі із струмом мережі, що в свою чергу призведе до неправильного підсумовування на навантаженні, і, як результат, збільшення видачі струму інвертором.

3.1.3 Моделювання навантаження. Загальний вигляд блоку навантаження наведений на рис. 3.23:

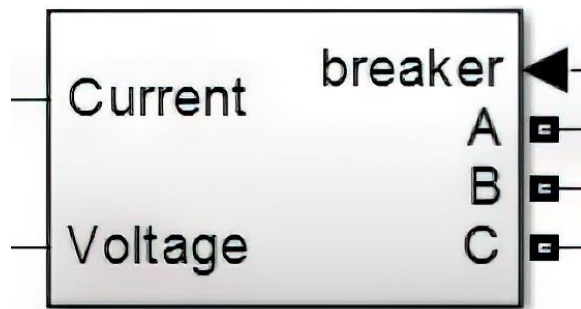


Рис. 3.23 Модель блоку навантаження

В даній моделі під час демонстрації різних режимів роботи використовуються різні типи навантаження. Частіше всього навантаження представляло собою набір резисторів з однаковим опором (рис. 3.24).

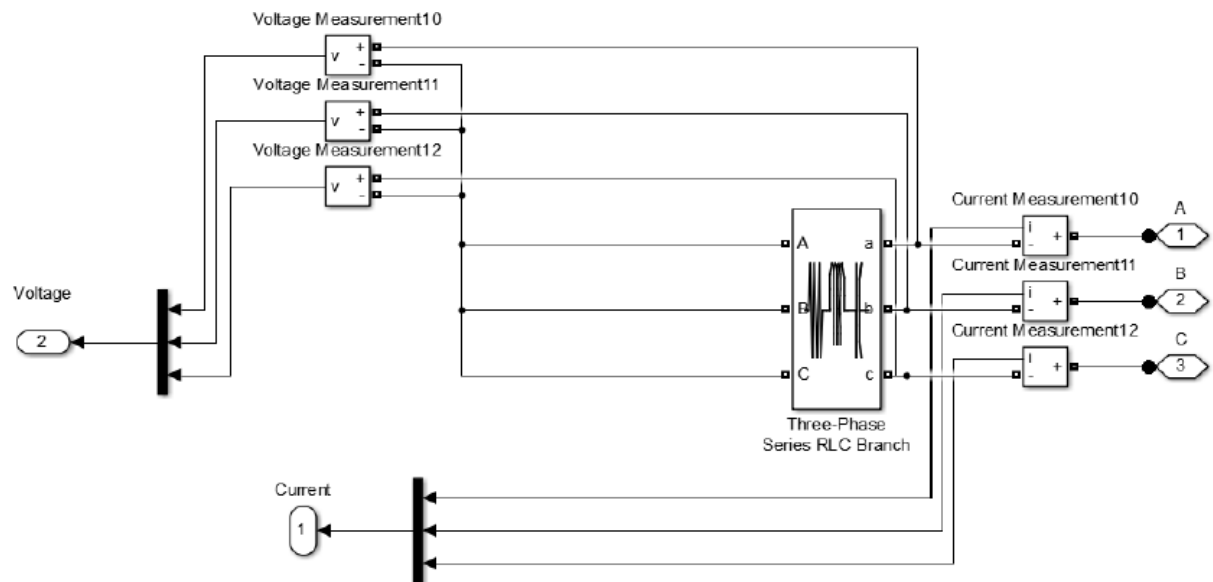


Рис. 3.24 Структура блока навантаження, у випадку задіяних резисторів з однаковим опором

В другому випадку навантаження являє собою два послідовно під'єднаних резистори на кожній фазі. Друга група резисторів включається і відключається від зовнішнього сигналу, що приходить на вимикач (рис. 3.25).

В обох варіаціях блоків навантаження виходи Current і Voltage – інформаційні канали струму і напруги відповідно.

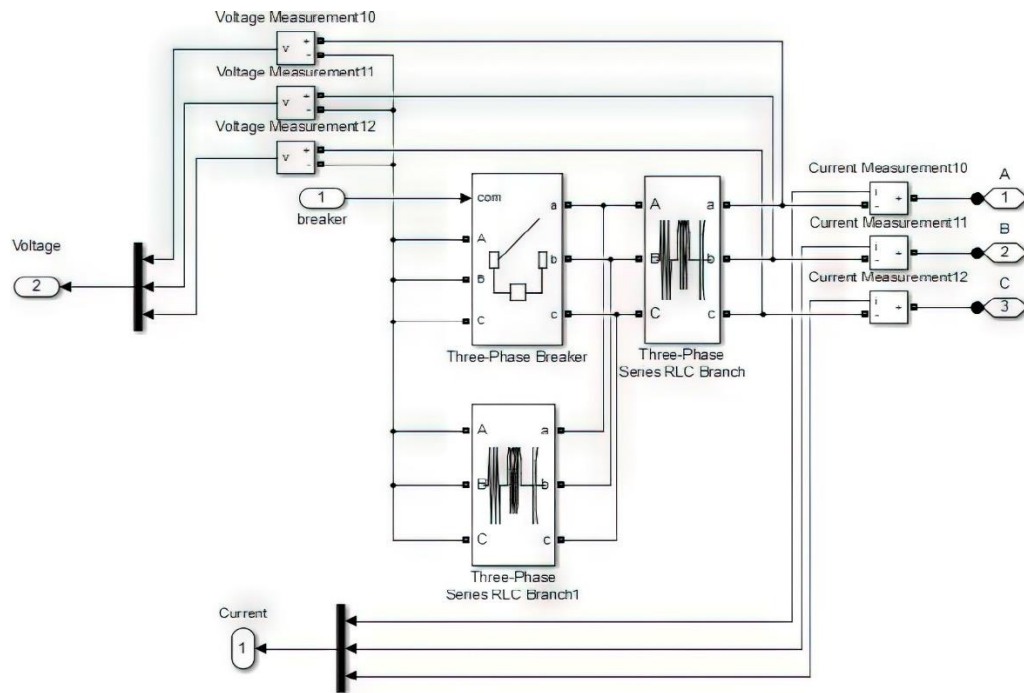


Рис. 3.25 Варіант блоку навантаження з послідовно з'єднаними резисторами на кожній фазі

3.2 Моделювання роботи СЕС, що працює як активний фільтр для мережі

СЕС такого типу можна підключати до мережі в якості не джерела живлення, а як фільтр для покращення показників якості електричної енергії. За допомогою програмного комплексу Matlab/Simulink будуюмо блок-схему моделі мережі і споживачів.

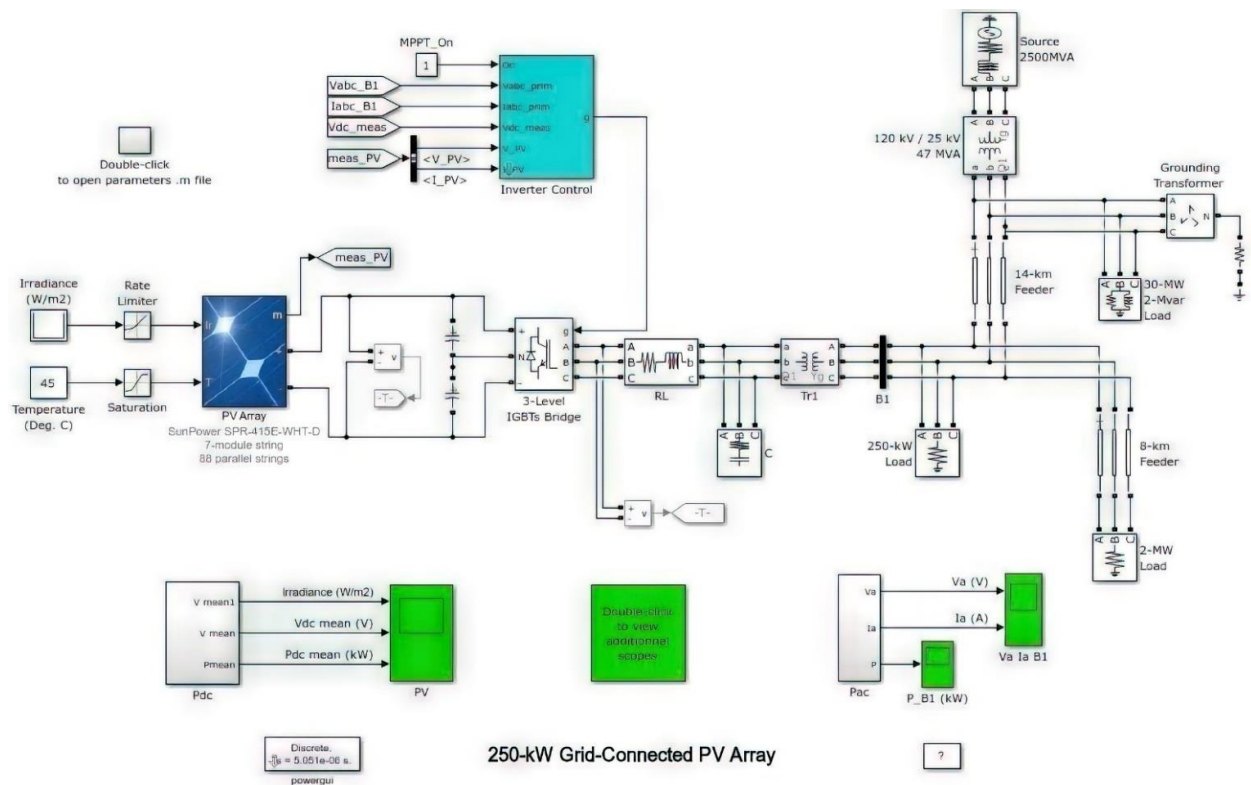


Рисунок 3.26 Блок-схема загальної мереж

Розглянемо детально схему, представлену на рис. 3.26 та розберемо параметри і функції кожного із представлених елементів:

Блок «Source» - блок, що моделює джерело потужності системи;

Блок «Load» - блоки навантаження, що моделюють споживачів в системі;

Блок «Tr1» - підвищуючий трансформатор СЕС.

Для більш точного моделювання активні та індуктивні опори обмоток трансформаторів, їх індуктивності мають бути розрахованими окремо для обмоток високої, низької та середньої напруги. Тому, напруги короткого замикання U_K , % має бути визначена окремо для кожної обмотки. Для двообмоткових трансформаторів U_K знаходиться за виразом:

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

Опори r_T , Z_T , X_T , Ом, та індуктивність L_T , Гн, для кожної обмотки трансформатору обчислюється за формулами[15]:

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

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

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

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

де P_K – втрати потужності при к.з., Вт;

$S_{T_НОМ}$ – номінальна потужність трансформатору, ВА;

u_K – напруга к.з, приведена до відповідної обмотки, %;

Блок «3-IGBTs Bridge» - трифазний інвертор, що виконаний на IGBT-модулях;

Блок «PV Array» - блок сонячних панелей;

Блок «Temperature» - датчик температури;

Блок «Irradiance» - датчик сонячної активності.

Вимірювання в даному випадку здійснюються за допомогою блоків «Pac» та «Pdc», які вимірюють фазні струми і напруги, а також показники навколишнього середовища.

Змодельуємо СЕС як фільтр від гармонік з метою покращення якості електроенергії в мережі. Блок-схему такої моделі представлено на рисунку

3.27, а блоки Grid та SES в розгорнутому вигляді на рис. 3.28 та 3.29 відповідно:

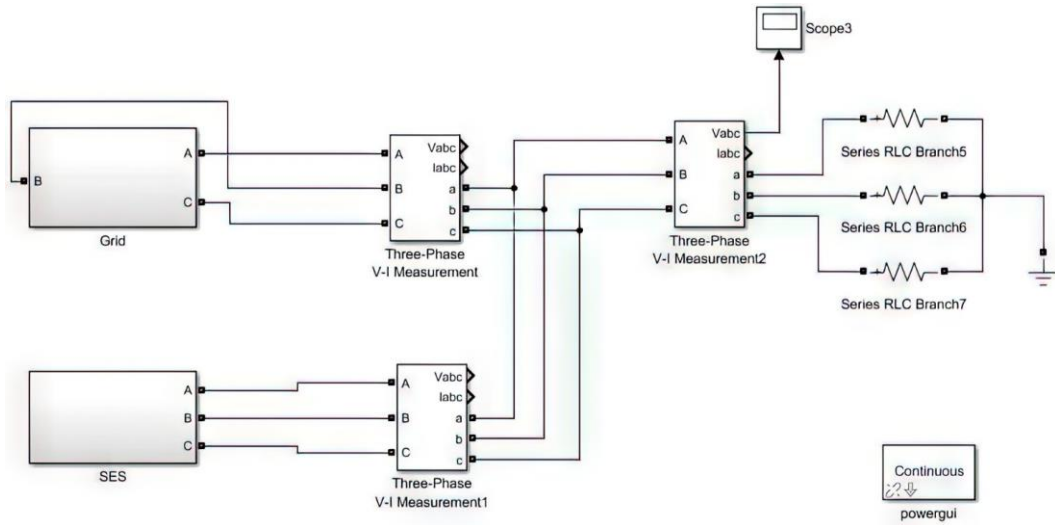


Рис. 3.27 Блок-схема моделі СЕС в режимі активного фільтру

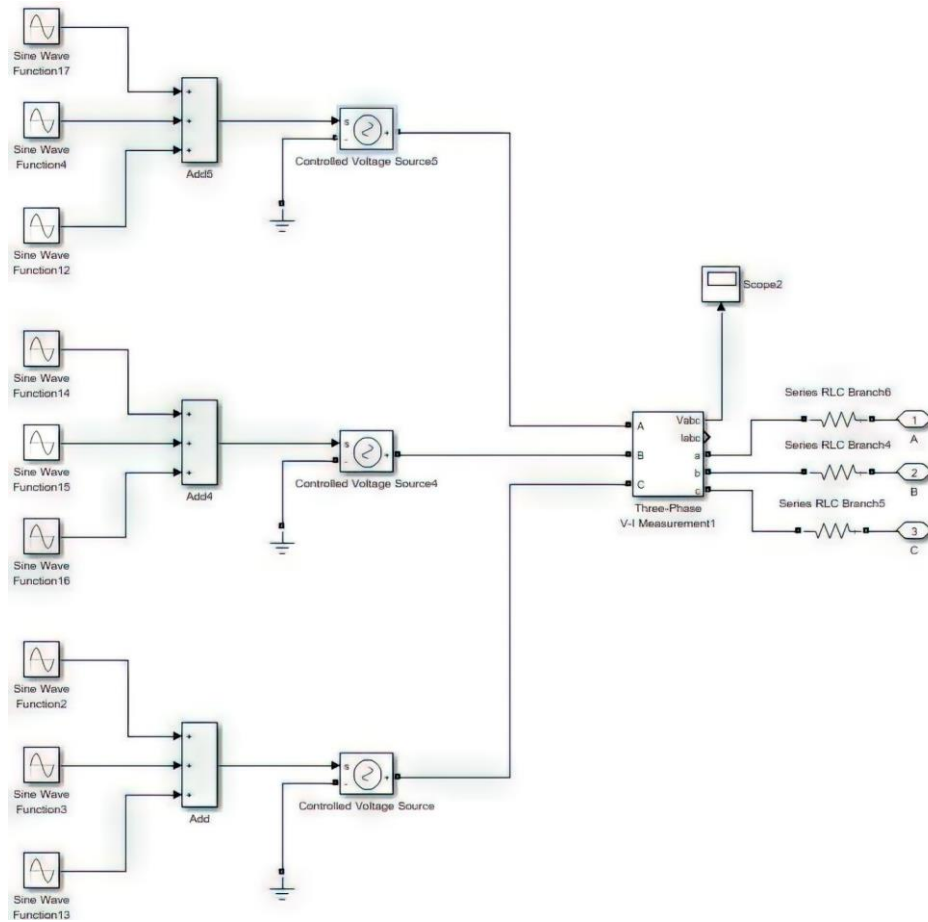


Рис. 3.28 Блок Grid в розгорнутому вигляді

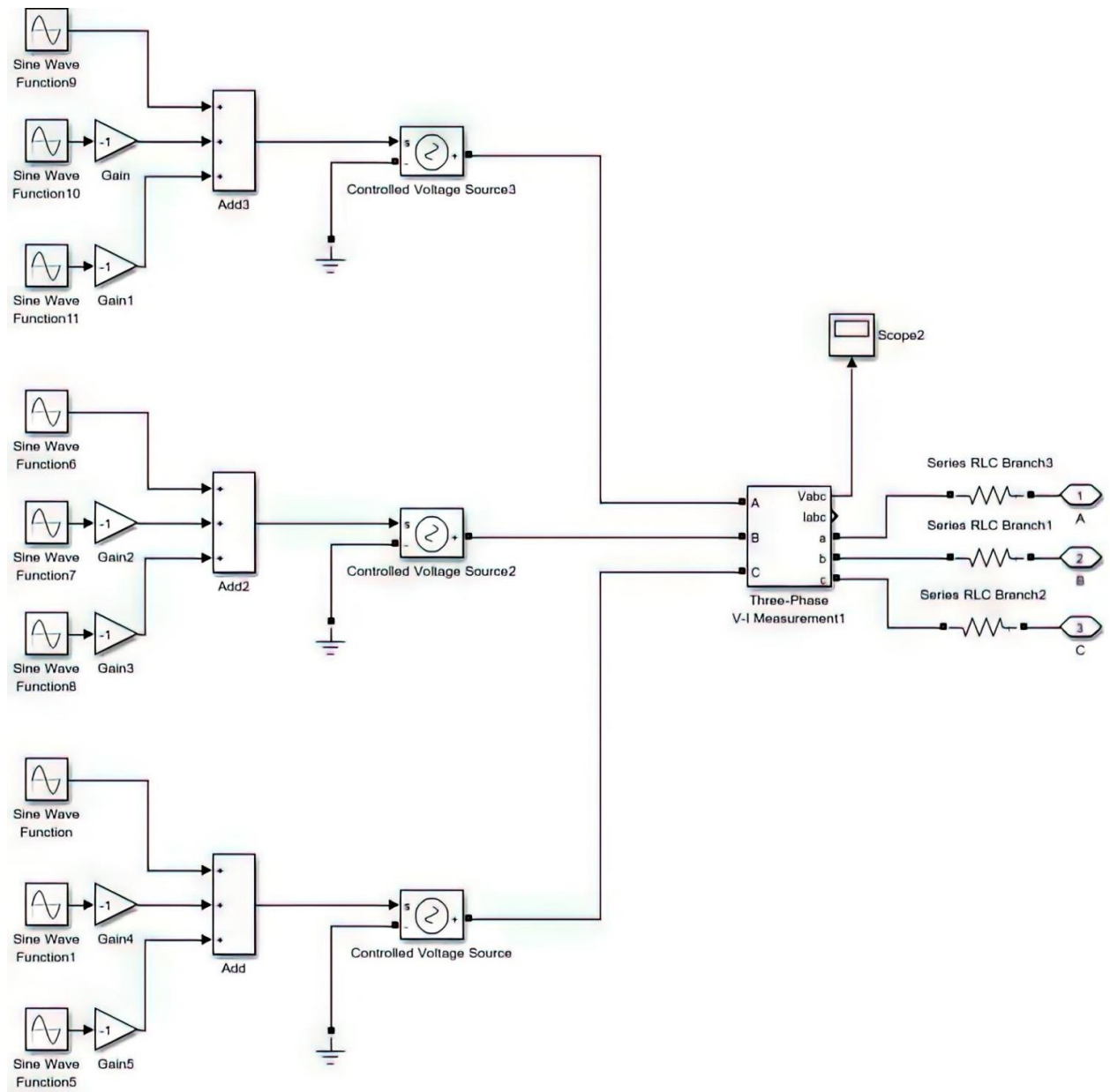


Рис. 3.29 Блок SES в розгорнутому вигляді

3.2.1 Розрахунок активного силового фільтру. Активні силові фільтри компенсують гармоніки струму шляхом накладання рівного, але протилежного гармонійного струму, або струму компенсації. В такому випадку активний силовий фільтр діятиме, як джерело струму, що також вводить гармоніки, які генеруються навантаженням, але із зсувом на 180° по фазі. В результаті гармонійні складові струму, що містяться у навантаженні, придушуються під впливом активного фільтру, а струм джерела залишається синусоїдальним та у фазі з відповідною йому напругою. Такий принцип

можна застосувати до будь-якого типу навантаження. Таким чином, в системі розподілення електроенергії нелінійне навантаження і активний фільтр можна розглядати, як ідеальний резистор [15]. Принципова схема роботи активного силового фільтра продемонстрована на рис. 3.30.

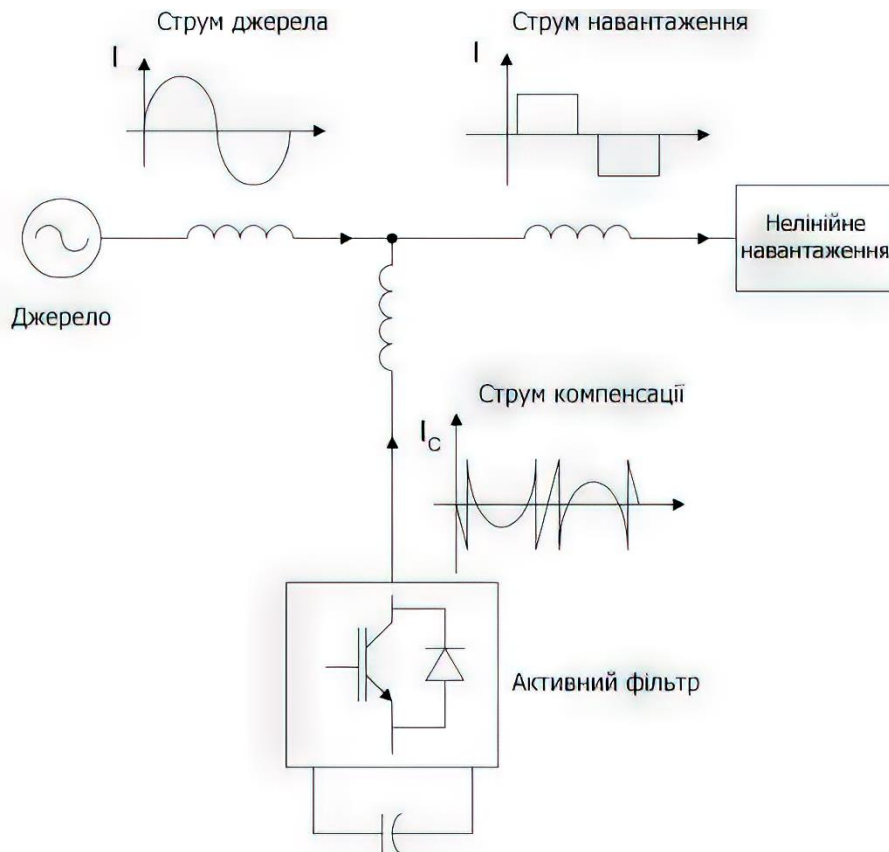


Рис. 3.30 Принципова схема роботи активного силового фільтра

3.2.2 Система керування. Схема керування активним силовим фільтром повинна забезпечувати розрахунок форми хвилі опорного струму для кожної фази інвертору, підтримувати постійну напругу в заданих межах, а також генерувати сигнали керування. Блок-схема системи керування активним силовим фільтром представлена на рис. 3.31.

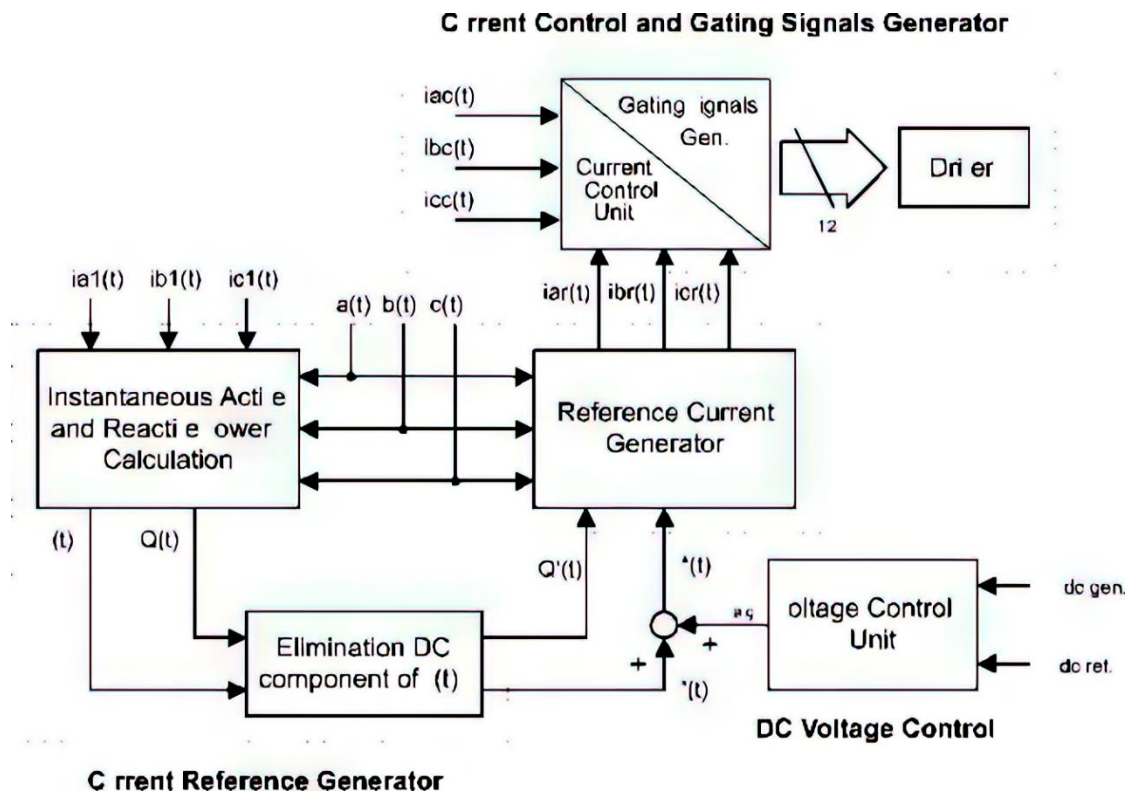


Рис. 3.31 Блок-схема системи керування активним силовим фільтром

Згенерований опорний струм необхідний для компенсації гармонійного струму навантаження, а також, щоб підтримувати постійну напругу на конденсаторі. Загальна ефективність активного силового фільтру залежить від його можливості відслідковувати з мінімальною затримкою часу і похибкою опорний струм.

Існує багато різних підходів до визначення опорного струму, що необхідно для компенсації нелінійних навантажень. Зазвичай, активні фільтри застосовують для компенсації реактивної потужності та гармонійних струмів низької частоти, що створюються нелінійними навантаженнями. Одним з можливих варіантів для визначення опорного струму інвертору є застосування теорії миттєвої реактивної потужності, яку запропонував Акаджі. Дана концепція є досить популярною та зручною, і в основі її лежить перехід від системи відліку abc до напруги і струму α та β , та їх миттєвої потужності (рис. 3.32).

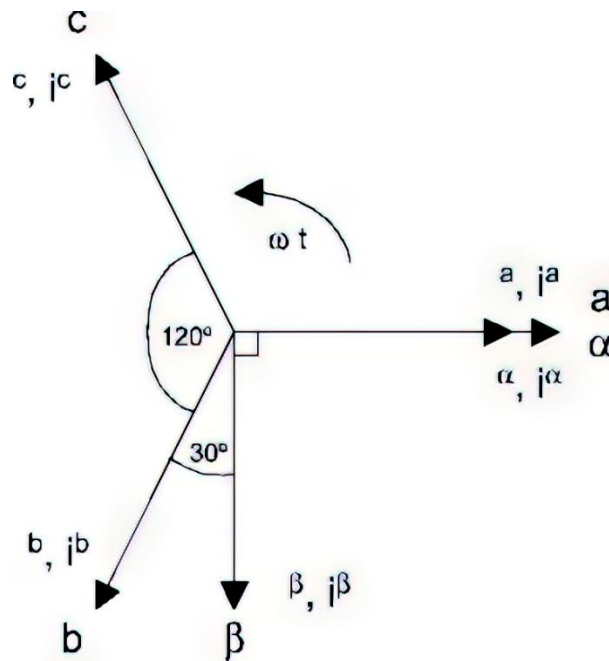


Рис. 3.32 Векторна діаграма переходу від abc-системи відліку до $\alpha\beta$ -координат

Миттєві значення струму і напруги в $\alpha\beta$ системі можна отримати з наступних рівнянь:

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

де $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ – відповідні миттєві значення напруг та струмів;

A – матриця перетворення, яка визначається з векторної діаграми переходу між системами.

Дана трансформація може застосовуватися тоді і тільки тоді, коли $u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0$, тобто коли напруги симетричні і синусоїдальні.

Миттєва активна та реактивна потужність в $\alpha\beta$ -координатах обчислюється за наступними формулами:

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

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

де $u_{\alpha}(t)$, $u_{\beta}(t)$ – миттєве значення напруги в $\alpha\beta$ -координатах;
 $i_{\alpha}(t)$, $i_{\beta}(t)$ – миттєве значення струму в $\alpha\beta$ -координатах.

Очевидно, що $p(t)$ стане рівним звичайній активній миттєвій потужності, що визначена в abc – системі. Але, водночас з цим, для того, щоб визначити миттєву реактивну потужність, Акаджі пропонує ввести новий миттєвий векторний простір, що визначається векторним рівнянням:

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

Вектор $\vec{q}$ є перпендикулярним до $\alpha\beta$ -площини координат, з якою зустрінеться у відповідності з правилом правої руки, $\vec{u}_{\alpha}$ перпендикулярна $\vec{i}_{\beta}$, а $\vec{u}_{\beta}$ перпендикулярна до $\vec{i}_{\alpha}$. Не можна вважати фізичним змістом вектору $\vec{q}$ «миттєву потужність», оскільки це добуток напруги однієї фази і струму іншої фази. І навпаки, $u_{\alpha}i_{\alpha}$ та $u_{\beta}i_{\beta}$ в рівнянні 3.25, логічно означають «миттєву потужність», тому що є добутками напруги і струму одної фази. Акаджі називає нову величину, що визначена рівнянням 3.27 «миттєвою уявною потужністю», яка отримується як добуток миттєвої напруги і струму різних фаз.

Вираження струмів в $\alpha\beta$ -площині, залежно від миттєвої потужності, задається наступним рівнянням:

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

Різні компоненти струмів $\alpha\beta$ -площини описуються наступними виразами:

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

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

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

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

де $i_{\alpha p}$, $i_{\alpha q}$, $i_{\beta p}$, $i_{\beta q}$ – відповідні значення активної і реактивної складової струмів в $\alpha\beta$ -площині.

Використовуючи рівняння (3.26) і (3.27), значення p і q можна виразити за допомогою постійних компонентів плюс компонентів змінних складових, а саме:

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

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

де $\bar{p}$ – постійна складова миттєвої потужності p , яка пов'язана із звичайним фундаментальним активним струмом;

$\tilde{p}$ – змінна складова миттєвої потужності, що не має середнього значення, і пов'язана із гармонійними струмами, які викликаються змінною складовою активної миттєвої потужності;

$\bar{q}$ – постійна складова уявної миттєвої потужності q , що пов'язана з реактивною потужністю, і викликана фундаментальними складовими напруг та струмів;

$\tilde{q}$ – змінна складова уявної миттєвої потужності q , що пов'язана з гармонійними струмами, які викликані змінною компонентою реактивної миттєвої потужності.

Щоб компенсувати гармоніки, які генеруються нелінійним навантаженням, опорний сигнал має включати в себе значення $\tilde{p}$, $\bar{q}$, $\tilde{q}$. У такому випадку, струм, що необхідний для фільтру, буде розраховуватися за виразом:

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

Вихідні компенсуючі струми, включно зі струмами нульової послідовності, розраховуються по наступній формулі:

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

де i_0 – струм нульової послідовності дорівнює $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a + i_b + i_c)$, А.

Блоки, що використовуються для створення опорного струму, визначеного виразом (3.37), наведені на рис. 3.33:

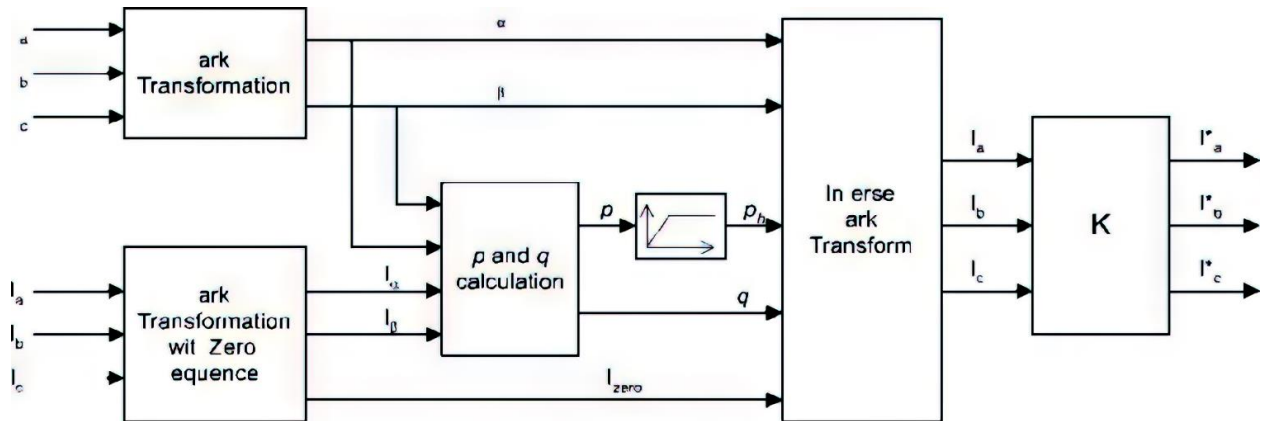


Рис. 3.33 Блок-схема створення опорного струму з використанням р-q теорії

Перевагою застосування р-q теорії є те, що активна і реактивна потужність, зв'язана з основними компонентами в постійних величинах, а ці величини можуть бути вилучені за допомогою фільтру низьких частот. Оскільки сигнал для вилучення постійний, то фільтрація в $\alpha\beta$ -координатах буде нечутливою до помилок зсуву фази, що вносяться фільтром низьких частот, що покращує компенсаційні характеристики активного фільтру.

Ефективність активного фільтру залежить загалом від конструктивних особливостей регулятора струму. Значна частина технічних питань модуляції, що використовується в активних фільтрах, залежить від стратегії широтно-імпульсної модуляції.

Трикутний метод, що показаний на рис. 3.34, заснований на порівнянні поточної помилки фіксованою амплітудою та фіксованою частотою трикутної хвилі. Помилка обробляється через пропорційно-інтегральний (PI) каскад посилення перед безпосередньо порівнянням з трикутним імпульсом [15].

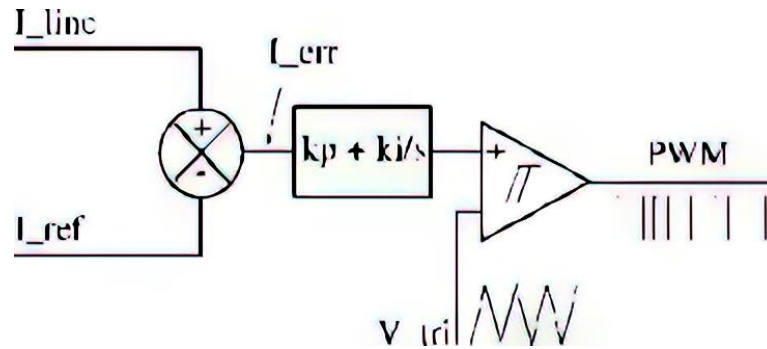


Рис. 3.34 Трикутний метод ШІМ

3.2.3 Розрахунок конденсатора. Перехідні процеси миттєвої потужності, яка споживається навантаженням, створюють коливання напруги на конденсаторі. Амплітудою даних коливань напруги можливо ефективно керувати за допомогою певного значення ємності конденсатору. Необхідно зазначити, що контроль напруги вузла постійного струму стабілізує напругу на конденсаторі лише після декількох циклів, але недостатньо швидко, щоб обмежити перші стрибки напруги. Значення величини ємності конденсатору, що отримане за цим критерієм, більше, ніж значення, що отримується на основі максимального обмеження пульсацій напруги постійного струму. Виходячи з цього, напруга на конденсаторі створюватиме менший коефіцієнт нелінійних викривлень. Розраховується ємність конденсатору за наступною формулою:

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

де ΔU – коливання напруги на конденсаторі, В;

$i_c(t)$ – миттєве значення постійного струму, А;

t_1, t_2 – час початку та кінця інтегрування, с;

ω – кутова частота, с^{-1} .

Рівняння (3.38) описує значення ємності конденсатору, що буде підтримувати коливання напруги нижче ΔU . Середнє значення постійного струму, що створюватиме максимальні перенапруги, може бути визначеним з виразу (3.39):

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

Де I_{inv} – струм інвертору, А.

На основі вищеописаного і проведеного розрахунку була створена модель паралельного активного силового фільтра, яка представлена на рис. 3.35:

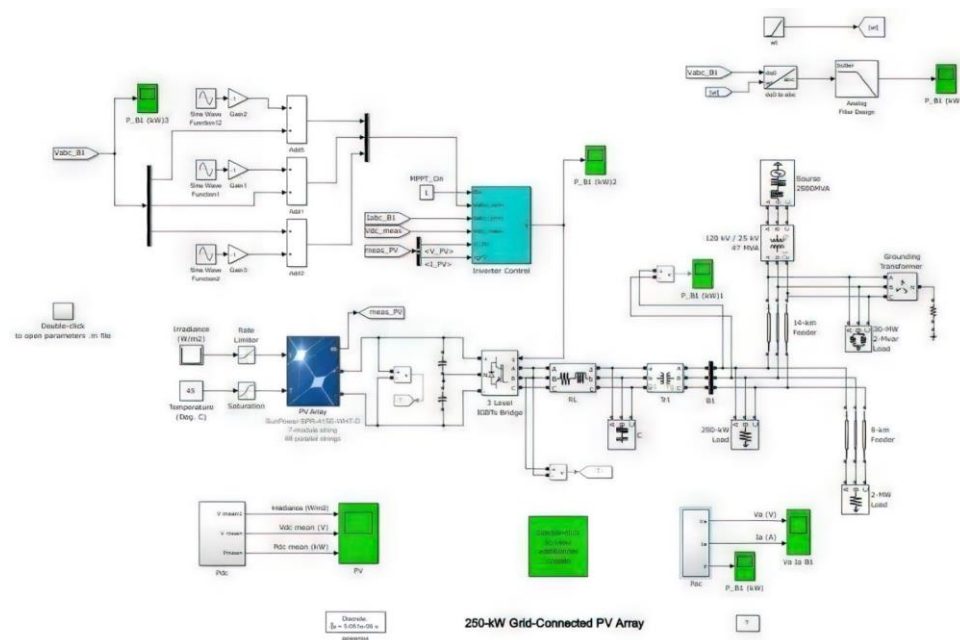


Рис. 3.35 Модель паралельного активного силового фільтра

3.3 Результати моделювання

В ході роботи було перевірено наступні режими роботи:

- Підтримування напруги в режимі залежного
- Підтримування напруги в режимі провідного;
- Підтримування напруги з переходом від залежного режиму до провідного;
- Робота в режимі активного фільтру.

Для деяких з режимів були здійснені незначні коригування моделі. Всі проведені зміни стосувалися блоку керування інвертором (рис. 3.12).

3.3.1 Підтримка напруги в режимі залежного. Використаємо зворотні зв'язки по струму та напрузі (рис. 3.36).

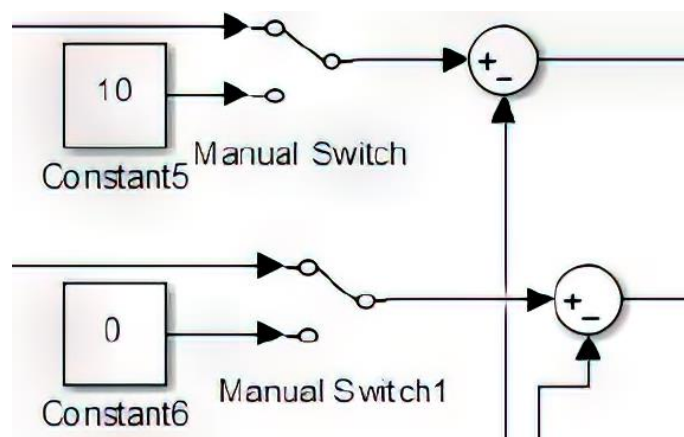


Рис. 3.36 Замкнутий контур струму

В момент часу $T = 0,05$ с змінимо опір на навантаженні Результати такого експерименту наведені на рис. 3.37 та 3.38.

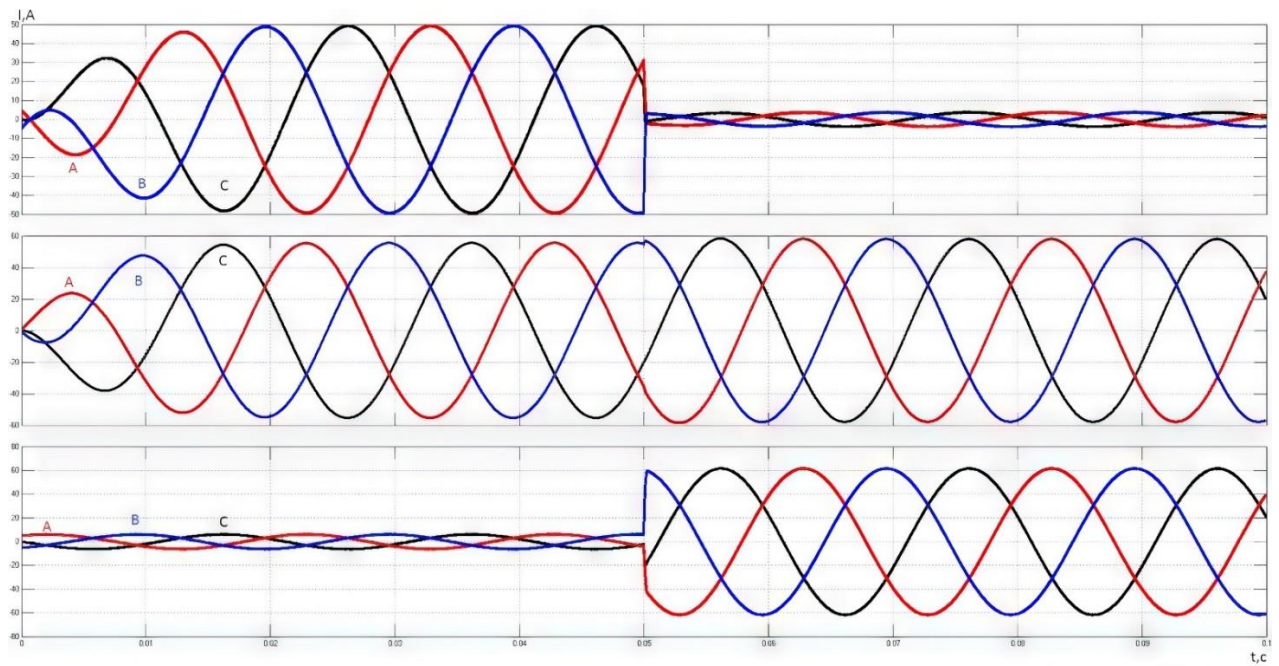


Рис. 3.37 Осцилограма струмів на інверторі, генераторі та навантаженні
відповідно

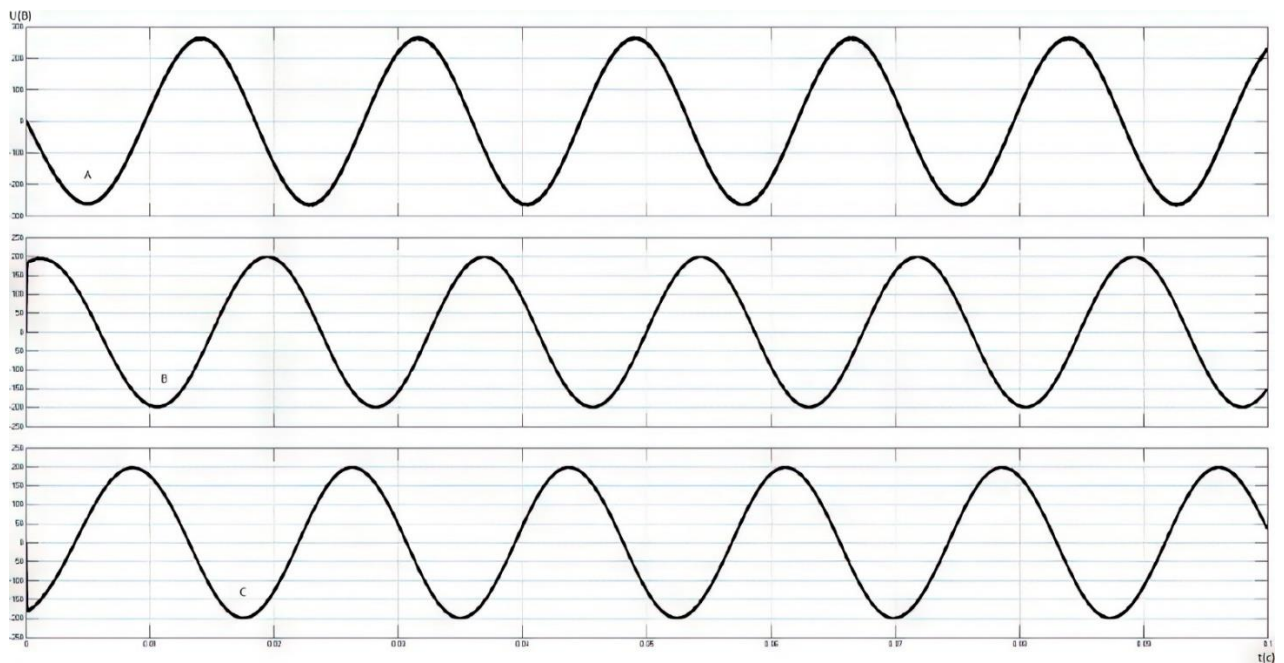


Рис. 3.38 Осцилограма напруги на навантаженні (пофазно)

3.3.2 Підтримка напруги в режимі провідного. Перехід з режиму залежного в режим провідного має здійснюватися по зовнішньому сигналу з

верхнього рівня керування. В даній моделі імітація цих сигналів була виконана перемиканням з «0» на «1» для кожного режиму (рис. 3.39).

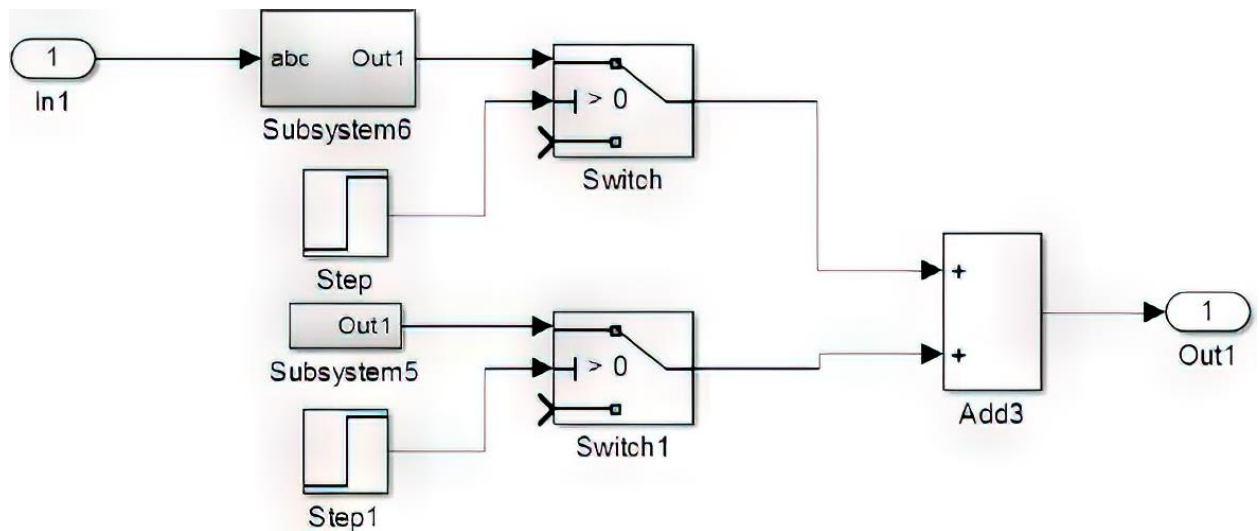


Рис. 3.39 Схема вибору режиму роботи моделі

Саме в даному досліді для здійснення роботи інвертору тільки в режимі залежного ніяких перемикачів не здійснювалося. В режимі залежного постійно подавався «0», а в режимі провідного подавалася «1».

На рисунках 3.40 та 3.41 представлені показники струмів інвертору та навантаження. Генератор в цьому досліді був від'єднаним від навантаження, тому ніяких струмів в мережі не створював.

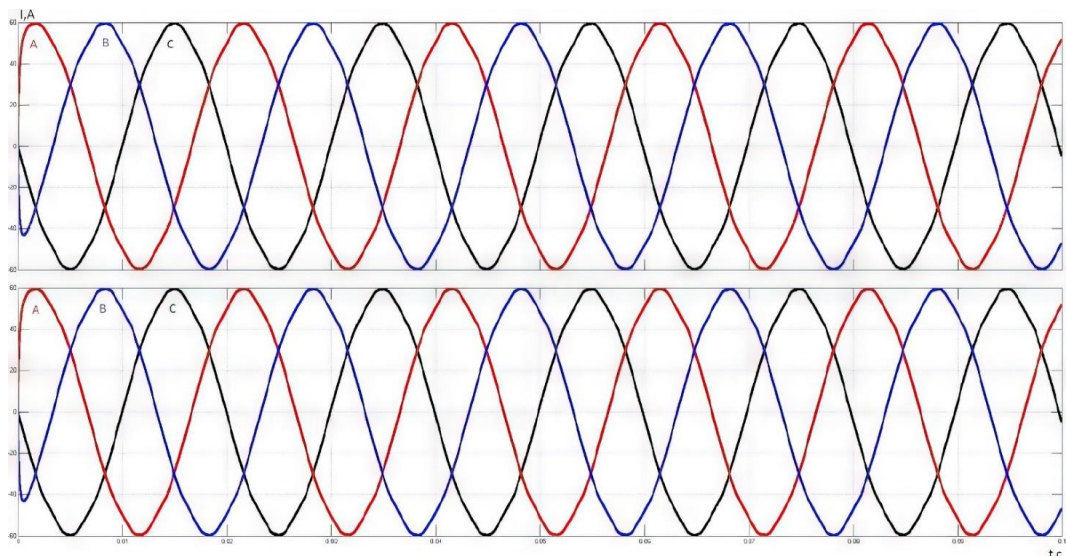


Рис. 3.40 Осцилограма струмів інвертору та навантаження

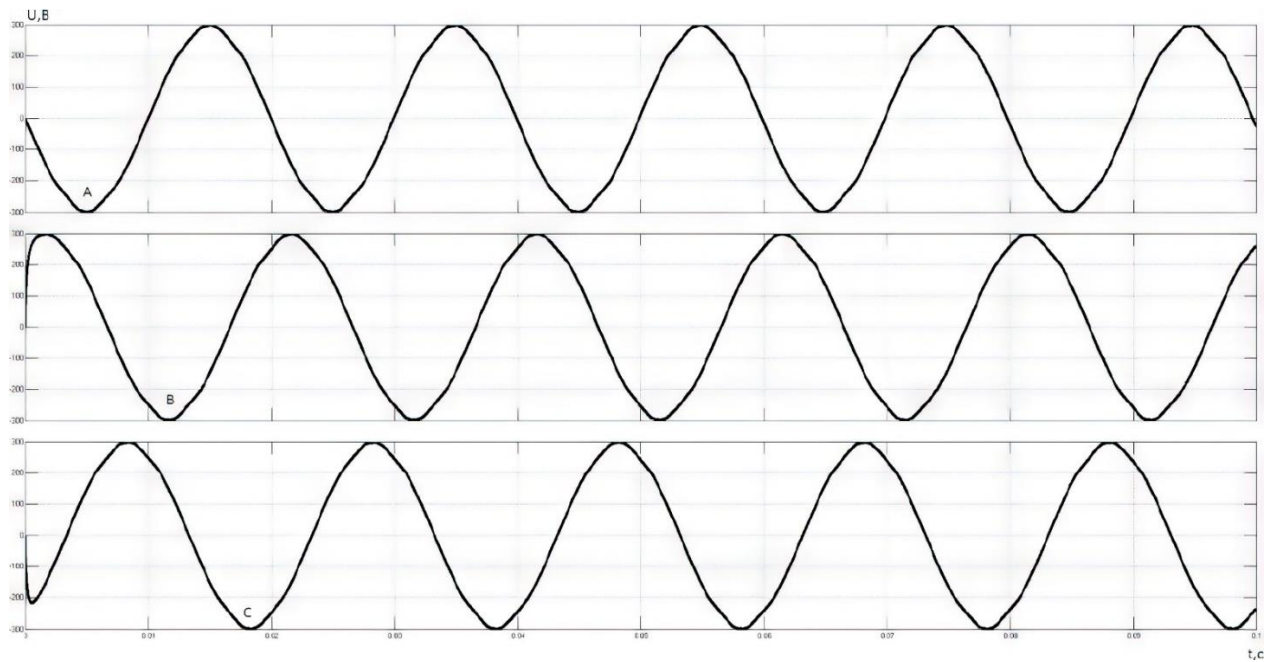


Рис. 3.41 Осцилограма напруги на навантаженні

3.3.3 Підтримка напруги з переходом від режиму провідного в режим залежного. Провівши певні коригування блоку, який відповідає за синхронізацію з мережею та задання кута для формування синусоїдальності струму, створимо умови для переходу інвертору в режим залежного в середині періоду моделювання, тобто в час $T = 0,05$ с. Також встановимо на виході генератору вимикач (блок Three-Phase Breaker), який буде спрацьовувати при $T = 0,05$ с. Параметри даного вимикача наведені на рис. 3.42:

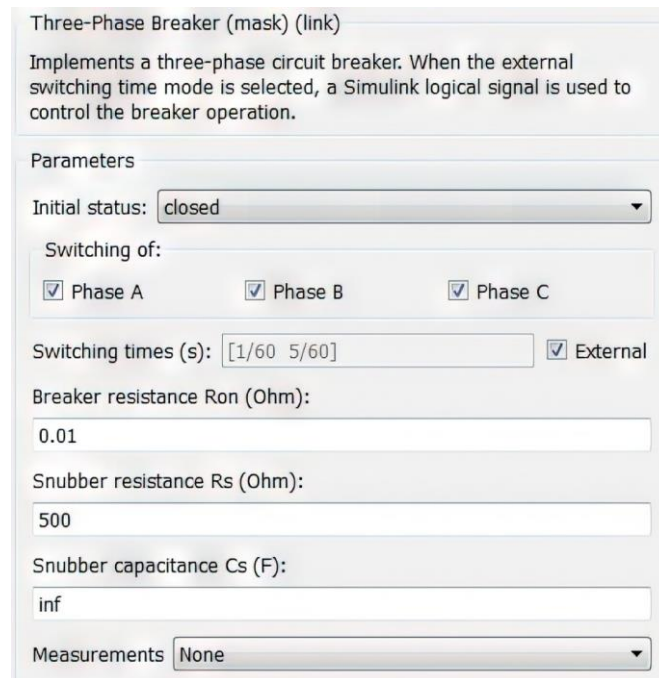


Рис. 3.42 Параметри блоку вимикача

В схему вибору режимів роботи моделі вставимо осцилограф «Scope3» (рис. 3.43). Осцилограф дозволить спостерігати за параметрами під час зміни режиму роботи.

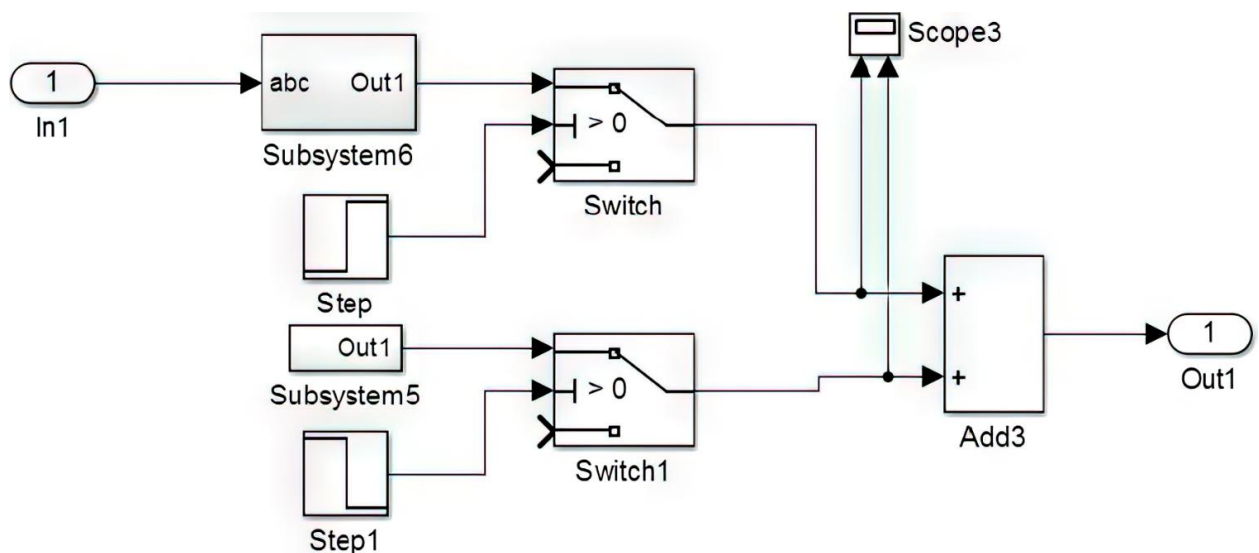


Рис. 3.43 Блок вибору режимів роботи

В режимі залежного від мережі на другому каналі осцилографу має спостерігатись «0», а в режимі провідного – значення від 0 до 2π . У режимі

провідного все має відбуватися навпаки. Розглянемо детальніше осцилограми струмів інвертору, генератора та навантаження (рис. 3.44).

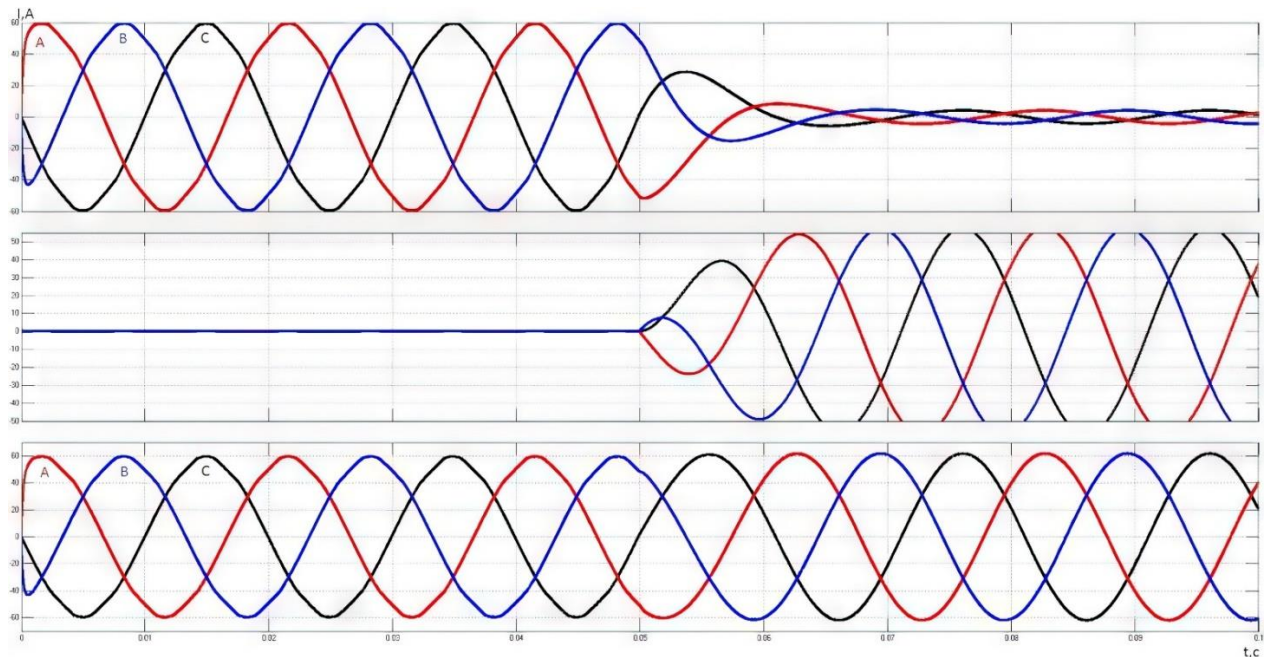


Рис. 3.44 Осцилограма струмів інвертору, генератора та навантаження

До часу $T = 0,05$ с генератор не віддавав електричну енергію в мережу, а інвертор працював в режимі провідного. При вмиканні генератора інвертор зменшив свої вихідні струми і перемкнувся в режим залежного, про що свідчать дані, зняті з осцилографа «Score3» (рис. 3.45).

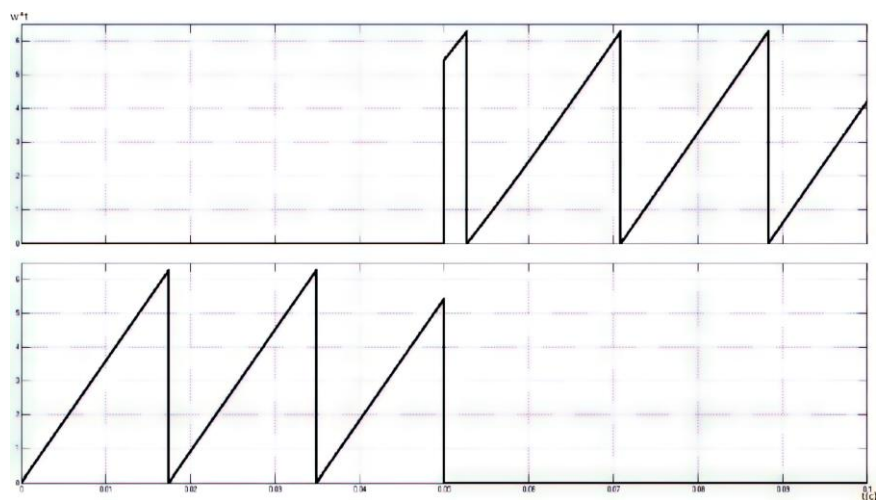


Рис. 3.45 Завдання кутів в режимах провідного і залежного

В той же час ніяких просадок по напрузі на навантаженні в момент переходу не зафіксовано (рис. 3.46).

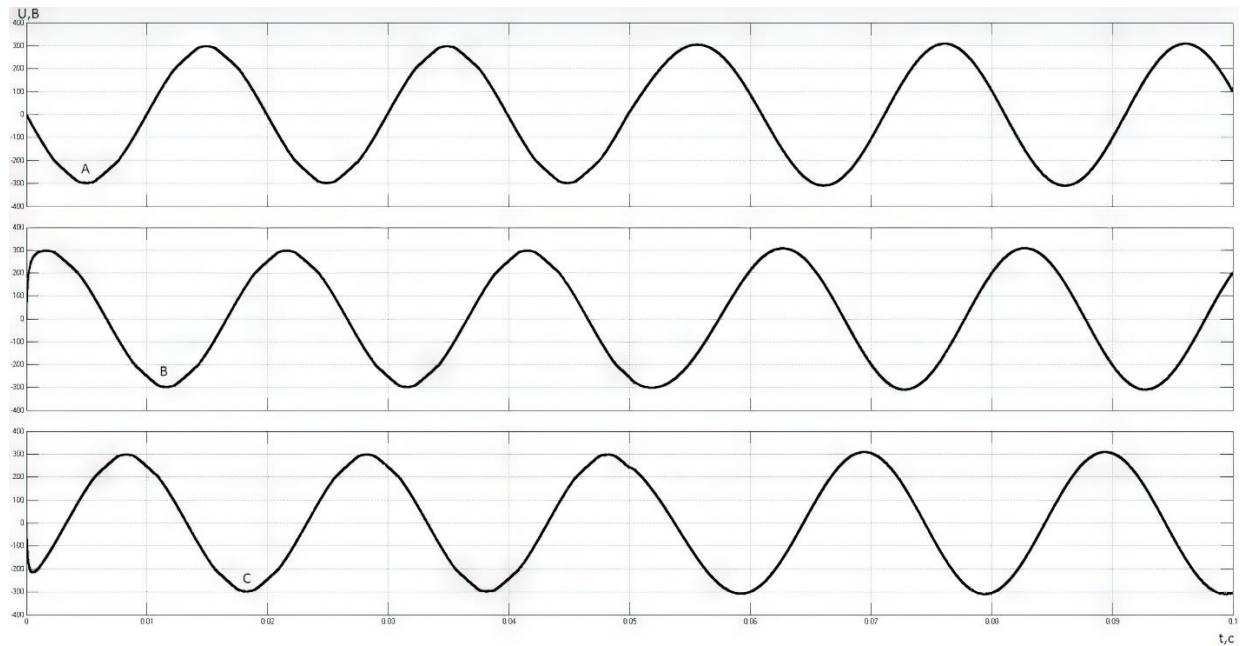


Рис. 3.46 Осцилограма напруги на навантаженні

3.3.4 Результати моделювання та порівняльний аналіз технічних засобів з покращення якості електроенергії. Виконаємо аналіз результатів, які отримані з моделі СЕС, що працює активний силовий фільтр, що наведені на рис. 3.47.

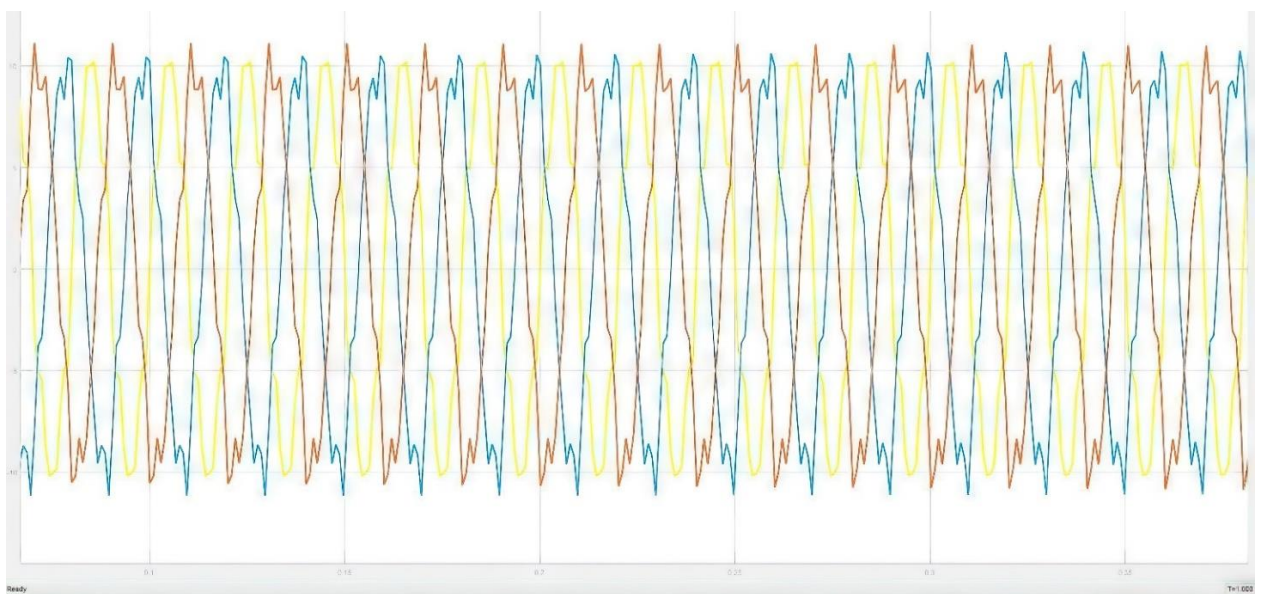


Рисунок 3.47 Несинусоїдальність, що спостерігається в мережі

Після створення на СЕС рівного, але протилежного мережевому, компенсаційного струму, отримується результат, який наведений на рис. 3.48:

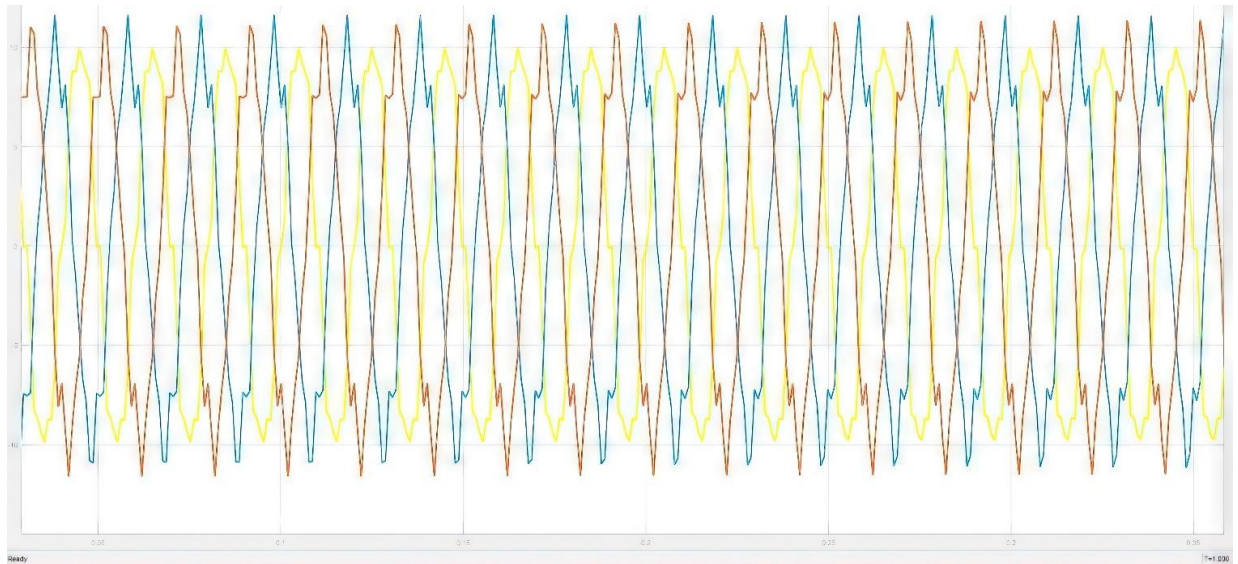


Рис. 3.48 Вихідний струм на СЕС, що генерується зі зсувом 180° по фазі

У результаті гармонійні складові, що містяться в струмі навантаження, придушуватимуться дією активного фільтру, а струм джерела буде залишатися синусоїдальним та у фазі з відповідною фазною напругою (рис. 3.49).

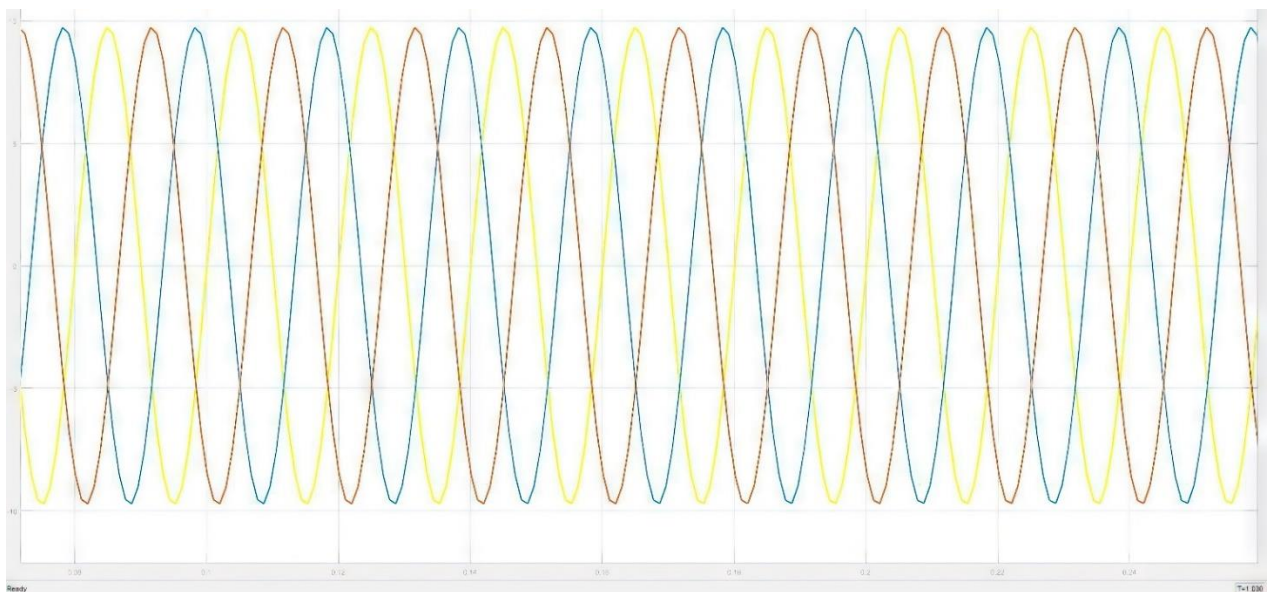


Рис. 3.49 Результативна форма у споживача

Виконавши об'єднання моделі СЕС та блок-схеми впровадження активного фільтру, були отримані осцилограми струмів та спектральний склад гармонійних складових до і після впровадження фільтру. На рисунку 3.50 показано струм одної фази, яка споживає нелінійне навантаження, та його гармонійний спектр до підключення фільтру.

Після створення на СЕС рівного, але протилежного мережевому, компенсаційного струму, отримується результат, який наведений на рис. 3.51.

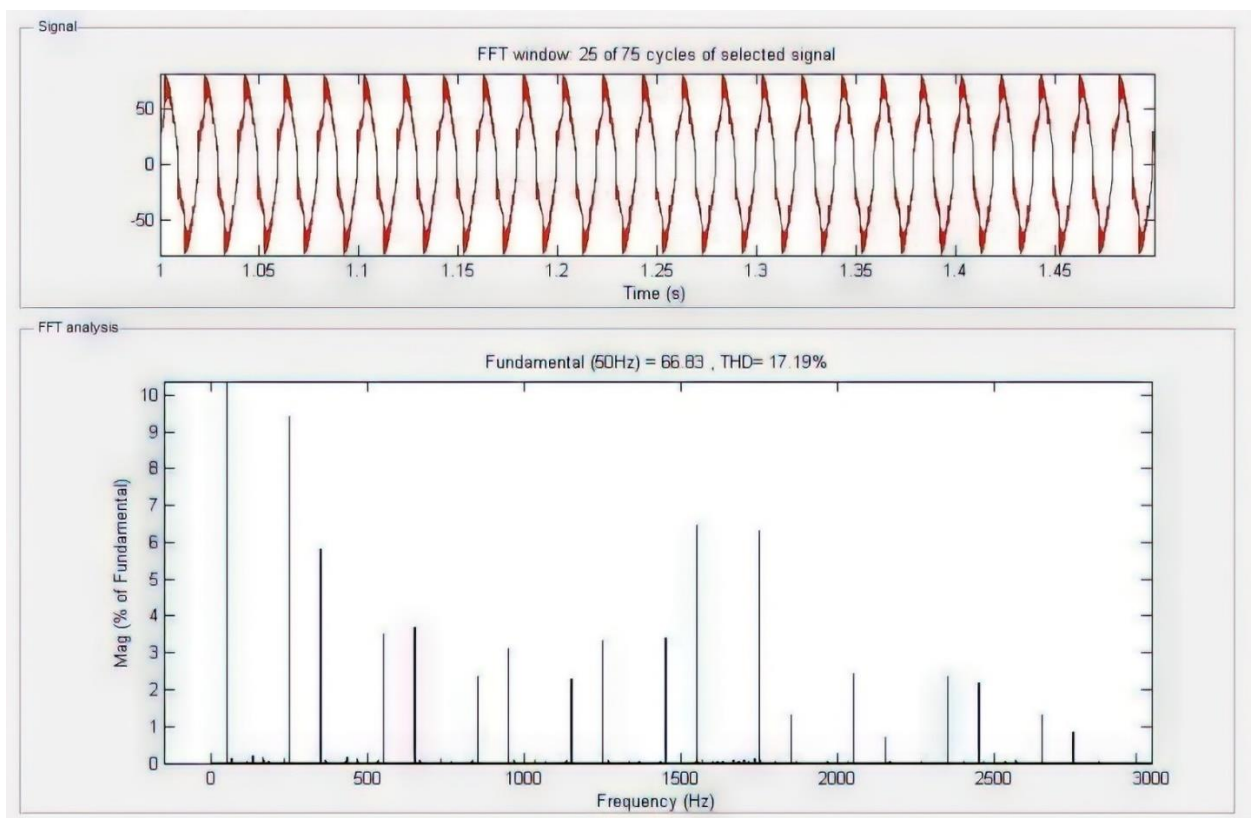


Рис. 3.50 Струм навантаження та спектр гармонік одної з фаз до впровадження АСФ

Частотний аналіз струму (FFT Analysis) показав, що коефіцієнт несинусоїдальності (THD) на навантаженні до підключення фільтру складає 17,19%, що перевищує гранично допустиме значення в 10%. Із гармонійного спектру видно, що в кривій струму переважають гармоніки частот 250, 350, 550, 650, 850, 950 Гц, які викликані характером нелінійного навантаження.

Як свідчать дані з рис. 3.51, частотний аналіз струму показав коефіцієнт несинусоїдальності в розмірі 2,54% після підключення активного фільтру до мережі, що не перевищує нормально допустимого значення в 5%. Спектр гармонік демонструє, що домінуючі раніше гармоніки були придушені.

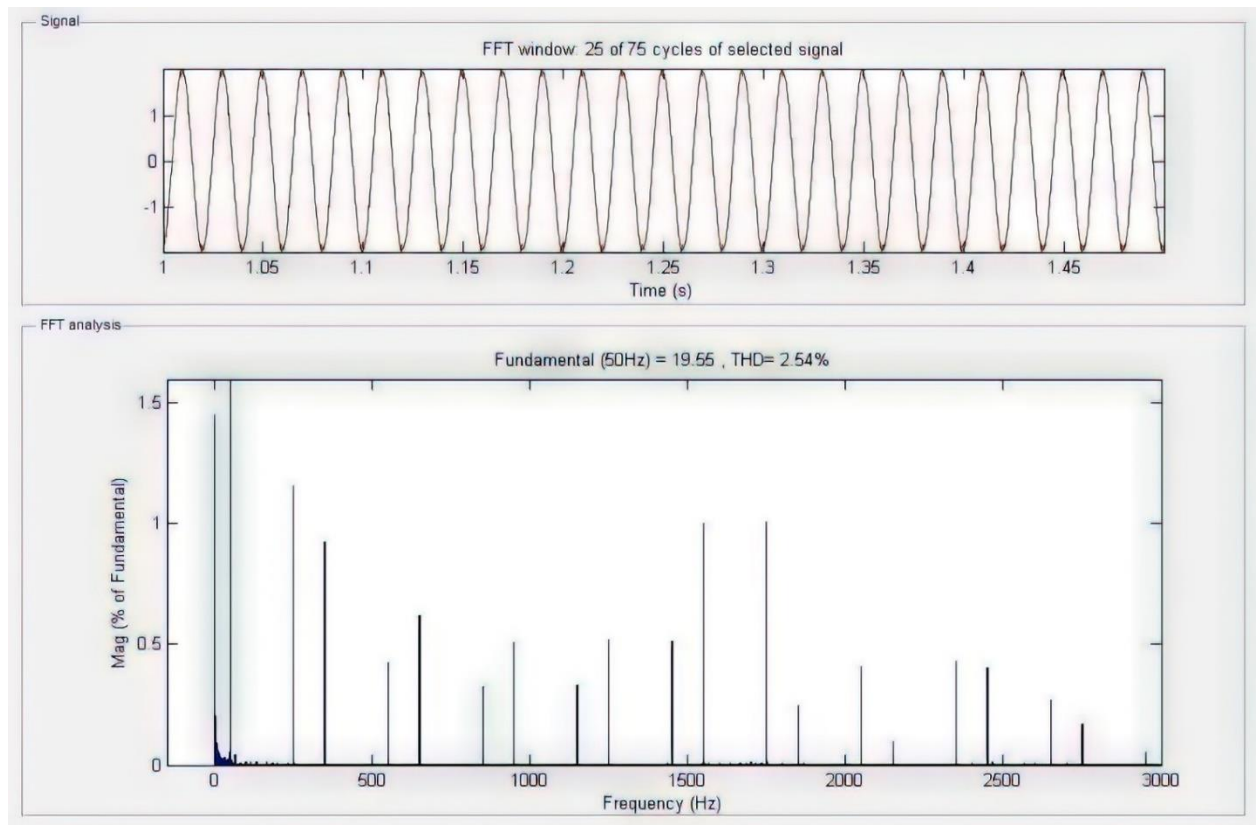


Рис. 3.51 Струм в мережі та спектр гармонік одної з фаз після впровадження АСФ

Використання активного силового фільтру в електромережі дозволяє досягати значного поліпшення електромагнітної сумісності нелінійного споживання з живлячою мережею, що позитивно впливає на показники якості електричної енергії та стабільності і надійності енергосистеми в цілому.

Висновки до розділу

У ході роботи була виконана комп'ютерна модель інвертору СЕС, який може працювати у провідному та залежному режимах, що створена на схемотехнічній елементній базі Simulink.

Також було здійснено моделювання роботи СЕС, що працює як активний для мережі. СЕС такого типу можна підключати до мережі в якості не джерела живлення, а як фільтр для покращення показників якості електричної енергії.

В процесі виконання було перевірено наступні режими роботи:

- Підтримування напруги в режимі залежного
- Підтримування напруги в режимі провідного;
- Підтримування напруги з переходом від залежного режиму до провідного;
- Робота в режимі активного фільтру.

Для деяких з режимів були здійснені незначні коригування моделі. Всі проведені зміни стосувалися блоку керування інвертором.

Використання СЕС як активний силовий фільтр в електромережі дозволяє досягати значного поліпшення електромагнітної сумісності нелінійного споживання з живлячою мережею, що позитивно впливає на показники якості електричної енергії та стабільності і надійності енергосистеми в цілому.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів, що можуть бути присутніми на СЕС, а також заходи по їх усуненню

Роботи, що виконуються під час експлуатації СЕС можна класифікувати, як шкідливі (І категорія), тому вони виконуються із застосуванням спеціальних захисних засобів, та дотриманням усіх правил технічної безпеки. Для захисту робітників від шкідливих чинників використовуються захисні засоби від фізичних пошкоджень та враження електричним струмом. Усі роботи з обслуговування та експлуатації СЕС мають виконуватись працівниками відповідної кваліфікації з групою з електробезпеки не нижче ІІІ.

Роботи з електроустановкою зазначеного типу класифікуються, як шкідливі (І категорія). З метою захисту від механічних пошкоджень працівникам видаються захисні засоби і проводиться інструктаж; видаються діелектричні рукавички та черевики(боти) для захисту від ураження електричного струму. Персонал має проходити цільовий інструктаж з охорони праці, а також дотримуватись правил техніки безпеки.

Для того, щоб підвищити безпеку обслуговуючого персоналу та забезпечити нормальну роботу СЕС, застосовується ряд технічних рішень: встановлюється блискавкозахист, захисне заземлення, монтується захисна огорожа тощо.

Одним із заходів, які забезпечують безпеку робіт в електроустановках являється захисне заземлення.

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання із землею чи її еквівалентом металевих неструмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою через замикання на корпус чи з інших причин (індуктивний

струм сусідніх струмоведучих частин, витік потенціалу, розряд блискавки та ін.).

Призначення захисного заземлення – це повне усунення або зниження небезпеки ураження струмом при доторканні до корпусу електроустановки чи інших неструмовідних металевих частин, що можуть опинитися під напругою внаслідок замикання на корпус чи з інших причин.

Захисне заземлення необхідно розрізняти від робочого заземлення і заземлення блискавкозахисту.

Робоче заземлення – це навмисне з'єднання із землею окремих точок струмового ланцюга, наприклад, нейтральних точок обмоток генератору, силових і вимірювальних трансформаторів, дугогасних апаратів, реакторів поперечної компенсації в протяжних лініях електропересилання, а також фази у випадку використання землі в якості фазного чи нульового проводу. Робоче заземлення використовується для забезпечення правильної роботи електроустановки в нормальних або аварійних умовах, та здійснюється безпосередньо (шляхом з'єднання провідниками частин, що заземлюються, з заземлювачем) або через спеціальні пристрої – плавкі запобіжники, розрядники, резистори тощо.

Заземлення блискавкозахисту – це навмисне з'єднання із землею блискавкоприймачів та розрядників з метою відведення струмів блискавки з них в землю.

Принцип дії захисного заземлення полягає у зниженні до безпечних значень напруг доторкання та кроку, які обумовлені замиканням на корпус та рядом інших причин. Це досягається за рахунок зменшення потенціалу обладнання, що заземлюється (зменшенням опору заземлювача), а також через вирівнювання потенціалів платформи, на якій стоїть людина, та заземленого обладнання (підняття потенціалу основи, на якій стоїть людина, до величини, близької до величини потенціалу заземленого обладнання).

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

5.1 Вимоги до показників якості електричної енергії, затверджені чинними нормативними документами

Якість електричної енергії - це сукупність певних властивостей електричної енергії, що регламентується відповідно до встановлених стандартів, які визначають рівень її придатності для використання за призначенням.

Відповідно до положень пункту 11.4.6 глави 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу, що затверджений постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 (далі – КСР), параметри якості електричної енергії в точках приєднання до споживачів при нормальних умовах експлуатації повинні відповідати параметрам, що визначені у ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» (далі – ДСТУ EN 50160:2014).

Основні показники якості електричної енергії описані у пунктах 11.4.7 – 11.4.12 глави 11.4 розділу XI КСР.

Стандартна номінальна напруга U_n для низьковольтних мереж загального призначення повинна мати значення 220 В між фазним і нульовим провідниками, або між фазними проводами:

- для трифазних чотирьох провідних мереж: $U_n = 220$ В між фазним та нульовим проводом;
- для трифазних трьох провідних мереж: $U_n = 220$ В між фазними провідниками. Відхилення напруги не повинне перевищувати ± 10 % від величини номінальної напруги.

Частота напруги електропостачання для мереж низької напруги повинна бути в межах:

1) для систем, які синхронно приєднані до ОЕС України - $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$ протягом 99,5 % часу за рік та $50 \text{ Гц} + 4 \%$ (- 6 %) протягом 100 % часу;

2) для систем без синхронного приєднання до ОЕС України - $50 \text{ Гц} \pm 2 \%$ протягом 99,5 % часу за рік та $50 \text{ Гц} \pm 15 \%$ протягом 100 % часу.

Показник довготривалого флікера (мерехтіння), спричиненого коливанням напруги, для мереж низької напруги повинен бути меншим або рівним одиниці для 95 % часу спостереження.

95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької напруги мають бути в межах від 0 % до 2 % від складника напруги прямої послідовності.

95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10- хвилинному проміжку, для мереж низької напруги мають бути меншими або рівними наступним значенням:

Таблиця 5.1 Допустимі коефіцієнти гармонічних спотворень

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
Не кратні 3		Кратні 3			
порядок	Відносна амплітуда	порядок	Відносна амплітуда	порядок	Відносна амплітуда
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	1,5%	6..24	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги електропостачання, ураховуючи всі гармоніки до 40-ї включно, для мереж низької напруги має бути меншим чи рівним 8 %.

Показники якості електричної енергії для мереж середньої та високої напруги, методи випробування та інші характеристики якості електроенергії наведені у ДСТУ EN 50160:2014. Взаємовідносини, що виникають під час процесів купівлі-продажу електричної енергії між її постачальником та споживачем, а також їх взаємовідносини з іншими учасниками роздрібного ринку електричної енергії, у тому числі операторами системи розподілу (далі – ОСР), регулюються Правилами роздрібного ринку електричної енергії, затвердженими постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 312 (далі – ПРРЕЕ), та які набрали чинності 11 червня 2018 року.

Розгляд претензій та скарг споживачів щодо показників якості електричної енергії, вимірювання показників якості електричної енергії, претензій щодо відшкодування збитків, завданих внаслідок недотримання ОСР показників якості електропостачання, зокрема внаслідок недотримання показників якості електричної енергії та перерв в електропостачанні, здійснюється відповідно до вимог КСР.

5.2 Пошук оптимуму при закладанні рівня якості функціонування електричної мережі

Для того, щоб прийняти оптимальне рішення про те, який рівень якості функціонування закладається для локальної електричної системи на майбутнє, необхідно враховувати такі фактори, як додаткові витрати, необхідні для підвищення якості функціонування; та вигоди, які можуть бути від цього отримані. Також необхідно оптимізувати і визначати ті частини мережі, на підвищення якості функціонування яких мають бути спрямовані

додаткові капіталовкладення. Мета цих заходів полягає в тому, щоб забезпечити певний оптимальний баланс між ефектом, отриманим від підвищення якості функціонування та витратами на це підвищення. Розглянемо певні міркування, якими можна керуватися при даному підході до вирішення представленої задачі.

По-перше, труднощі при визначенні економічного ефекту від таких заходів пов'язані з тим, що цей ефект буде різним для кожного конкретного споживача, для різних частин мережі і для системи в цілому. Виходячи з цього, для будь-якого економічного аналізу треба точно вказувати, для якої саме системи або для якого конкретного вузла навантаження знаходиться оптимум.

По-друге, якість роботи мережі або якість електропостачання споживачів часто може змінюватися в результаті різноманітних заходів, кожен з яких вимагає своїх специфічних врахувань. Наприклад, надійність електропостачання певного вузла навантаження може змінитися в результаті змін, виконаних у системі генерації або в розподільчій електричній мережі. Визначити, у які саме частини мережі найбільш доцільно вкладати додаткові кошти, досить складно, але, звичайно, зрозуміло, що саме від розв'язання цього питання в основному залежить ефективність капіталовкладень.

Електропостачальне підприємство повинне намагатися досягнути мінімуму функції:

$$\delta Z = \delta Z_{\text{доо}} + \delta Z, \quad (5.1)$$

де δZ – мінімально можлива функція, яка визначає ефективність функціонування мережі;

$\delta Z_{\text{доо}}$ – додаткові витрати на відновлення та реконструкцію елементів ЕМ;

δZ – очікувані значення виплат компенсацій споживачам за ненадійне електропостачання чи електропостачання неякісної електричної енергії.

Таким чином, ефективність роботи ЕМ буде визначатися, з одного боку, значенням додаткових витрат від невідповідного показника електропостачання δZ , а з іншого, витратами на відновлення та реконструкцію ЕМ.

У випадку повної надійності елементів електричної мережі додаткові витрати в системі дорівнюватимуть нулю. З іншого боку, якщо система працюватиме за схемою, що продиктована лише міркуваннями будь-якою ціною надати споживачу електроенергію, не дивлячись на її відхилення в розрізі її якості, то додаткові витрати будуть максимальними.

Описані вище міркування свідчать про необхідність знаходження компромісу або оптимуму між зростанням додаткових витрат та якістю функціонування мережі, оскільки ці фактори взаємно протирічні (рис. 5.1).

Для наочного аналізу результатів оптимальних розрахунків та оцінки необхідних маніпуляцій і їх наслідків доцільно цільову функцію привести до критеріального виду:

$$\delta Z_* = \frac{\delta Z}{\delta Z_{min}} = \delta Z_{дод*} + \delta Z_{с*}, \quad (5.2)$$

де δZ_{min} — мінімальні втрати, що відповідатимуть оптимальному стану мережі.

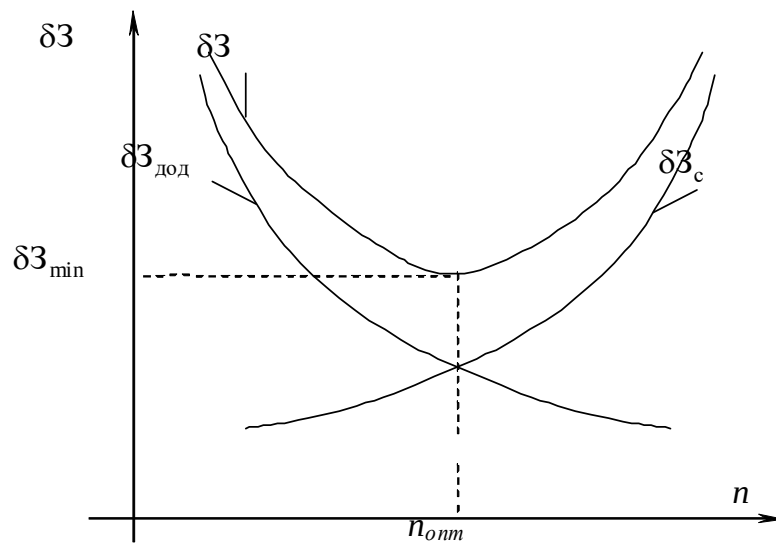


Рис. 5.1 Конкуруючий ефект між $\delta Z_{\text{дод}}$ та δZ_c

Згідно теорії двоїстості можна поставити у відповідність двоїсту задачу (в даному випадку критерій відмов). Для оптимальних значень p_0 (двоїста змінна) та $p_0(A)$ (пряма змінна)

$$d(p_0) = E(p_0(A)),$$

де $d(p_0)$ – мінімальне значення двоїстої функції $d(p)$.

Сформулюємо двоїсту функцію. Оскільки $\sum_{i=1}^{m+1} p_{oi} = 1$ і $\sum_{i=1}^{m+1} v_{ij} \cdot p_{oi} = 0$, то можна записати:

$$d(p_0) = E(p_0(A)) \sum_{i=1}^{m+1} p_{oi} \cdot \frac{1}{\prod_{j=1}^n p_{oi}(A)^{\sum_{i=1}^{m+1} v_{ij} \cdot p_{oi}}} \quad (5.3)$$

Виконавши логарифмування (5.3), отримаємо:

$$\ln(d(p_0)) = \ln\left(\frac{E(p_0(A))^{\sum_{i=1}^{m+1} p_{oi}}}{\prod_{j=1}^n p_{oi}(A)^{\sum_{i=1}^{m+1} v_{ij} \cdot p_{oi}}}\right) = \sum_{i=1}^{m+1} p_{oi} \cdot \ln\left(\frac{E(p_0) \cdot \alpha_i}{\prod_{j=1}^n p_{oj}(A)^{v_{ij} \cdot \alpha_i}}\right) =$$

$$\sum_{i=1}^{m+1} \ln\left(\frac{\alpha_i}{p_{oi}}\right)^{p_{oi}} \quad (5.4)$$

Виконавши потенціювання (5.4), отримаємо двоїсту функцію:

$$d(p_0) = \prod_{i=1}^{m+1} \left(\frac{\alpha_i}{p_{oi}}\right)^{p_{oi}} \quad (5.5)$$

Приведемо (5.5) до критеріального виду, прийнявши в якості базового значення двоїсту функцію для «ідеальної», з точки зору надійності та якості електричної енергії, розподільчої мережі:

$$d_* = \prod_{i=1}^{m+1} \left(\frac{p_{oi}^{p_{oi}}}{p_i^{p_i}}\right)$$

Отримавши значення показника якості функціонування E^* та відмов d^* , можна виконати оптимізацію витрат для підтримання достатнього рівня якості функціонування розподільчої мережі. Для цього застосовується конкуруючий ефект між витратами на підвищення надійності і якості електричної енергії, та витратами, що пов'язані з недостатнім відпуском електроенергії та незадовільною її якістю:

$$B = B' \cdot E_* + B'' \cdot (d_* - 1),$$

де B' та B'' – відповідно коефіцієнти вартості якості функціонування та відмов.

На рис. 5.2 показано конкуруючий ефект між вартістю якості функціонування та відмов в розподільчій мережі.

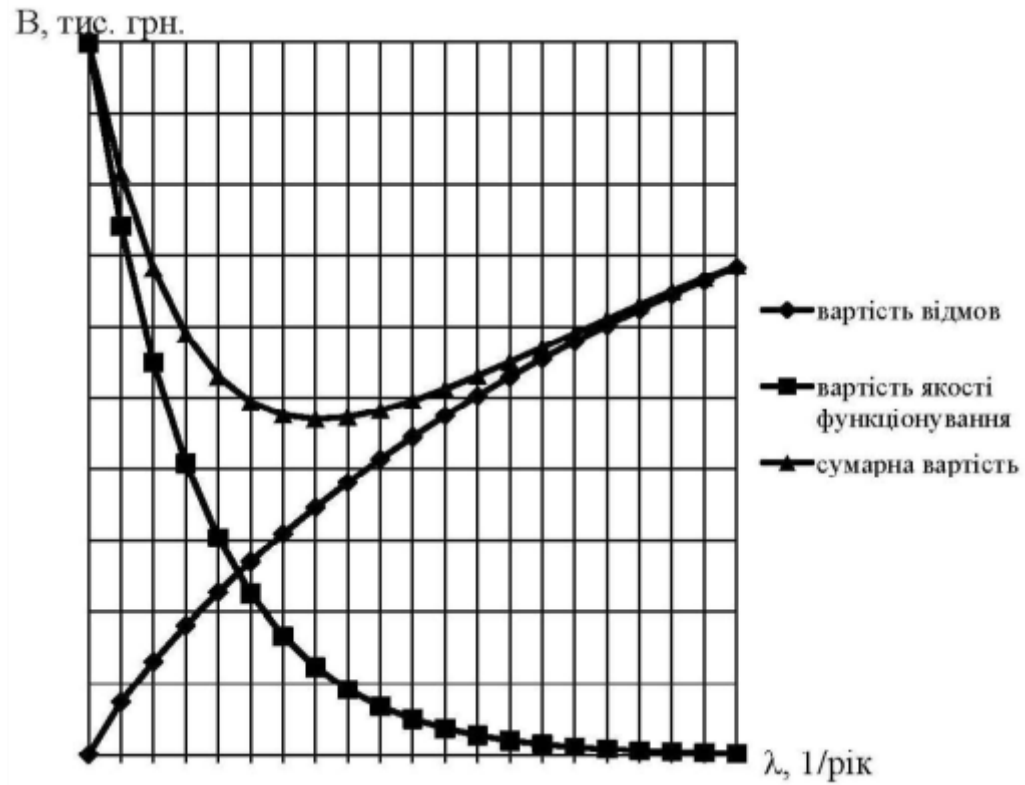


Рис. 5.2 Оцінка оптимального значення сумарної вартості розподільчої електричної мережі

Висновки до розділу

Якість електричної енергії - це сукупність певних властивостей електричної енергії, що регламентується відповідно до встановлених стандартів, які визначають рівень її придатності для використання за призначенням.

Для того, щоб прийняти оптимальне рішення про те, який рівень якості функціонування закладається для локальної електричної системи на майбутнє, необхідно враховувати такі фактори, як додаткові витрати, необхідні для підвищення якості функціонування; та вигоди, які можуть бути від цього отримані. Також необхідно оптимізувати і визначати ті частини мережі, на підвищення якості функціонування яких мають бути спрямовані додаткові капіталовкладення.

На рис. 5.2 показано конкуруючий ефект між вартістю якості функціонування та відмов в розподільчій мережі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Інтеграція СЕС та інших альтернативних джерел генерації в існуючі системи електропостачання разом з широким застосуванням пристроїв силової напівпровідникової електроніки змінює характер енергообмінних і перехідних процесів, що приводить до зміни балансу електричної енергії, виникнення фактів спотворення та пульсацій, зміни параметрів напруги та зниження якості електричної енергії.

У мережах, у яких активно розгортаються та експлуатуються разом з СЕС, має місце погіршення показників якості електричної енергії. Насамперед це надмірне відхилення напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ, а також такого показника якості, як коефіцієнт спотворення синусоїди напруги K_U .

Для того, що б виконати імітаційне моделювання режимів роботи сонячної електростанції в системі децентралізованого електропостачання було обрано програму Matlab з Simulink.

В ході роботи було перевірено наступні режими роботи інвертору СЕС, як основного вузлу керування параметрами станції:

- Підтримування напруги в режимі залежного;
- Підтримування напруги в режимі провідного;
- Підтримування напруги з переходом від залежного режиму до провідного;
- Робота в режимі активного фільтру.

Використання СЕС як активного силового фільтру в електромережі дозволяє досягати значного поліпшення електромагнітної сумісності нелінійного споживання з живлячою мережею, що позитивно впливає на показники якості електричної енергії та стабільності і надійності енергосистеми в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Західна маркетингова компанія. Ринок сонячної енергетики. 2019.
2. Впровадження сонячних електростанцій та дослідження їх впливу на роботу електроенергетичних систем. – 2017. – 20с.
3. Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью / Ф. Р. Исмагилов, Б. Н. Шарифов, Б. М. Гайсин, Т. Р. Терегулов, Н. Л. Бабкина - 2016. Т. 20 , № 4 (74). с. 71–79.
4. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. СПб: КОРОНА-принт 2001.320 с.
5. 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
6. Виссарионов В.И., Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, М.: 2004.-448 с.
7. Розанов Ю.К. Силовая электроника в системах с нетрадиционными источниками электроэнергии, 2002. - № 3.
8. Григораш О.В., Промышленная энергетика / Перспективный источник электроэнергии на базе торцевых синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов / О.В.Григораш, Е.Г.Вайнер, 2000. - № 10. -с. 30-33.
9. Григораш О.В. Промышленная энергетика / Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В.Григораш, Ю.И.Стрелков, 2001- № 4. - с. 37-40
- 10.Гриценко А.И., Нетрадиционные возобновляемые источники энергии, М.: ВНИИГАЗ. - 1996.
- 11.Дьяков А.Ф. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития, М.: МЭИ. - 1996.

12. Кожарский Г.В., Методы автоматизированного проектирования источников вторичного электропитания, М.: Радио и связь. -1985. - 184 с.

13. Креймер А.С., Материалы научной конференции «Энергосберегающие технологии и процессы в АПК» / Использование аккумулирующих систем на ветроэлектростанциях, Краснодар, 2000. с. 47-48.

14. Инверторы напряжения. Принципы построения инверторов.
http://avtomobil.vipsekret.ru/a_avtomobil&invertori-napryageniya&4.htm

15. Academic Press. Power Electronics Handbook. 2001.

16. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Минск.: ИПК Изд-во стандартов. — 1998. — 30 с.

17. Качество электрической энергии Том 1 «Экономико-правовая база качества электрической энергии в Украине и Евросоюзе» / под редакцией Гриба О.Г. / Монография ПП «Граф-Ікс». Харьков: 2014г.-300 с.

18. Шидловский А.К. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения. / А.К.Шидловский, В.Г.Кузнецов, В.Г. Николаенко - К., 1981. - 48 с.

19. <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>

20. <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/v-ukraini-vijna-vidchinila-vikno-mozhlivostej-dlya-rozvitku-vde-ekspert/>