

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**Моделювання мережевого сонячного фотоелектричного
інвертора в умовах несиметрії енергосистеми**

Виконав(ла): студент 6 курсу, групи ЕТм
спеціальності 141

**«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Колодій А.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник (підпис) Костик Л.М.
(прізвище та ініціали)

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

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

Рецензент (підпис) Микитишин А.Г.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль 2025

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 202_ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Колодію Андрію Васильовичу
(Прізвище, Ім'я, По Батькові)

1. Тема роботи Моделювання мережевого сонячного фотоелектричного інвертора в умовах несиметрії енергосистеми

Керівник роботи Костик Любов Миколаївна, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» Листопада 2025 року № 4/7-966

2. Термін подання студентом завершеної роботи Грудень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи характеристики сонячної фотоелектричної станції.

Параметри мережевого інвертора: номінальна вихідна потужність, величина та межі напруги ланки постійного струму, граничні значення струмів, топологія силової схеми. Модельна база MATLAB: блоки моделювання перетворювача, мережі, джерел несиметрії.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці. Безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Теслюк В.М., проректор з АГРБ		
Нормоконтроль	Коваль В. П. к.т.н., зав. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ		
2	Аналітичний розділ		
3	Розрахунково-дослідницький розділ		
4	Проектно-конструкторський розділ		
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
6	Висновки		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Оформлення графічної частини		

Студент

(підпис)

Колодій А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Костик Л.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Колодій А.В. Моделювання мережевого сонячного фотоелектричного інвертора в умовах несиметрії енергосистеми.

Стор.70; рис.36; табл.2 ; джерел -14; додатків - 0.

Метою кваліфікаційної роботи було дослідження, розроблення та порівняння методів керування небалансом у мережевих фотоелектричних інверторах з метою забезпечення стабільної роботи фотоелектричної системи в умовах несиметрії напруги мережі.

Представлено огляд та порівняння трьох механізмів керування перетворювачами напруги (ПН) в енергетичних модулях: гібридного режиму зі слідуванням за мережею, автономного режиму формування мережі та режиму підтримання мережі. Окреслено їхні конфігурації та роль у роботі системи, а також результати моделювання переходів між режимами в MATLAB/Simscapе. Розроблено два методи контролю небалансу для мережевого фотоелектричного інвертора, що забезпечують регулювання постійної та змінної напруги й зменшення двочастотних пульсацій потужності. Моделювання показало покращення динаміки, зниження перевантажень струму та ефективність під час асиметричних аварійних і перехідних режимів у мережі.

Ключові слова: мережевий фотоелектричний інвертор, несиметрія енергосистеми, контроль небалансу, динамічні характеристики системи.

ЗМІСТ

Реферат	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Принципи побудови системи управління перетворювачем напруги	9
1.1.1 Традиційне управління з відстеженням мережі	10
1.1.2 Традиційне управління з формування мережі	11
1.1.3 Управління з підтримкою мережі	13
1.2 Тематичні дослідження та результати симуляції для ЕМП	15
1.3 Висновок до розділу	22
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	23
2.1 Керування небалансом підключеного до мережі сонячного фотоелектричного інвертора	23
2.1.1 Конфігурація внутрішніх струмових контурів	23
2.1.2 Генерація еталонних струмів	30
2.1.3 Управління зовнішніми контурами	32
2.1.4 Розділена подвійна синхронна система відліку ОЗЗя незбалансованих умов	34
2.2 Моделювання фотоелектричної системи підключеної до мережі	35
2.3 Перевірки та результати моделювання фотоелектричної системи підключеної до мережі	37
2.3.1 Випробувальний стенд 1: Звичайний контроль УВМ	39
2.3.2 Випробувальний стенд 2: Схема контролю дисбалансу I	40
2.3.3 Випробувальний стенд 3: Схема контролю дисбалансу II	44
2.4 Висновки до розділу	46
3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	47
3.1 Структури фотоелектричних інверторів та аналіз ефективності контролю дисбалансу мережевої сонячної фотоелектричної системи	47
3.1.1 Випробувальний стенд 1: Звичайний контроль УВМ	48

3.1.2 Тестовий стенд 2: ПР-регулятор на основі контролю дисбалансу	49
3.2 Дослідження та результати моделювання сонячних фотоелектричних систем	50
3.2.1 Ефективність сонячних фотоелектричних модулів під час короткого замикання	50
3.3 Ефективність сонячних фотоелектричних модулів під час падіння напруги в мережі	55
3.4 Висновки до розділу	59
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	60
4.1 Охорона праці	60
4.1.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок	60
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	63
4.2.1 Захист електротехнічних систем та електронної апаратури від пошкоджень, які викликані електромагнітним імпульсом ядерного вибуху	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	69

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Зі зростанням проникнення розподілених енергетичних ресурсів, зокрема інверторних джерел, інтегрованих у сучасні енергосистеми та мікромережі (ЕМ), зростає і кількість експлуатаційних викликів, пов'язаних зі стабільністю та надійністю роботи мережі. Упродовж останніх років сонячні фотоелектричні станції дедалі частіше оснащуються функціями відключення або ізоляції від мережі під час аварійних чи аномальних режимів. Це дозволяє не лише уникнути дестабілізації енергосистеми, але й захистити інвертор від небезпечних режимів, спричинених перевантаженнями по струму або перенапругами.

Більшість мережевих сонячних інверторів працюють за класичною схемою керування з відстеженням мережі (УВМ), де особливо гостро проявляється проблема роботи в умовах несиметрії. Така стратегія регулює переважно струми позитивної послідовності, ігноруючи вплив негативної послідовності, що стає критичним під час коротких замикань і інших асиметричних відхилень напруги. У відповідь на ці виклики сучасні дослідження все більше зосереджуються на розробці методів керування несиметрією УВМ. Вони спрямовані на глибше дослідження ролі та впливу струмів негативної послідовності на роботу інвертора в аварійних режимах.

Тому актуальним є точне моделювання та аналіз несиметричних режимів роботи мережевих інверторів є необхідними для створення ефективних інженерних рішень та підвищення стійкості енергосистем.

Мета і завдання роботи: дослідження, розроблення та порівняння методів керування небалансом у мережевих фотоелектричних інверторах з метою забезпечення стабільної роботи фотоелектричної системи в умовах несиметрії напруги мережі.

Досягнення мети визначається вирішенням наступних завдань:

1. проаналізувати традиційні методи регулювання мережевих перетворювачів та визначити їх обмеження при роботі в умовах небалансу;.

2. оцінити вплив різних методів керування на пульсації активної потужності, напруги ланки постійного струму та якість трифазних струмів;
3. створити детальну модель фотоелектричної системи в MATLAB/Simscare для дослідження поведінки інвертора в умовах нормальних та несиметричних режимів мережі;
4. визначити оптимальний підхід керування для підвищення надійності й ефективності роботи мережевих сонячних фотоелектричних станцій.

Об'єкт дослідження: процеси у мережевій сонячній фотоелектричній системі з інвертором, що працює в умовах несиметрії напруги електричної мережі.

Предмет дослідження: техніко-енергетичні характеристики мережевого сонячного фотоелектричного інвертора та їх зміна під впливом несиметричних режимів роботи електроенергетичної системи.

Наукова новизна отриманих результатів: Розроблено та порівняно дві удосконалені схеми керування небалансом для мережевого сонячного фотоелектричного інвертора, що забезпечують одночасне регулювання струмів позитивної та негативної послідовностей у несиметричних режимах мережі.

Удосконалено модель фотоелектричної системи в MATLAB/Simscare, яка дозволяє точно відтворювати режими роботи інвертора під дією несиметричних впливів та оцінювати поведінку системи з урахуванням алгоритмів керування небалансом.

Практична цінність результатів дослідження. Розроблені моделі в MATLAB/Simscare можуть використовуватися інженерами та дослідниками для аналізу поведінки фотоелектричних систем у різних аварійних і перехідних режимах без необхідності проведення дорогих експериментів на реальному обладнанні.

Практичні рекомендації дозволяють підвищити стійкість мікромереж і розподілених систем до аварійних станів, що сприяє підвищенню загальної надійності енергопостачання.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і її результати доповідалися на Міжнародній науково-технічній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 2025 р.)

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Принципи побудови системи управління перетворювачем напруги

У керуванні перетворювачем джерела напруги (ПН) використано векторне керування, орієнтоване на систему керування середнім струмом. Цей метод дозволяє перетворювати компоненти струмів і напруг у постійні величини в стаціонарному режимі в d_q -системі координат. Таким чином, ПП-регулятори можуть бути реалізовані для точного відстеження [1], опорного сигналу [2].

Трифазне динамічне рівняння системи ПН, підключеної до розподільчої мережі, виражається наступним чином:

$$V_{c_{abc}} - V_{TЗП_{abc}} = L_f \frac{di_{abc}}{dt} + R_f i_{abc} \quad (1.1)$$

де $V_{c_{abc}}$ та i_{abc} - вихідна змінна напруга та струм перетворювача відповідно;

$V_{TЗП_{abc}}$ - напруга на ТЗП-шині.

Струм і напруга в (1.1) переносяться в систему відліку dq за допомогою трансформатора Парка наступним чином.

$$V_{c_d} - V_{mzn_d} = R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - \omega_0 L_f i_q \quad (1.2)$$

$$V_{c_q} - V_{mzn_q} = R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} - \omega_0 L_f i_d \quad (1.3)$$

Рівняння 1.2 і 1.3 - це дві лінійні системи першого порядку, де i_d і i_q пов'язані $\omega_0 L_f$. Для того, щоб досягти роздільного керування струмами, члени

зв'язку усуваються за допомогою сигналів прямого зв'язку. Кінцева напруга в dq-системі координат представлена в (1.4) і (1.5) як:

$$V_{c_d} = u_{id} + V_{T3П_d} - \omega_0 L_f i_q \quad (1.4)$$

$$V_{c_q} = u_{iq} + V_{T3П_q} + \omega_0 L_f i_d \quad (1.5)$$

$V_c(d)$ і $V_c(q)$ лінійно пропорційні сигналам модуляції m_d і m_q , відповідно, з коефіцієнтом пропорційності $V_{dc}/2$. Нарешті, регулятори струму ПН обмежені для захисту перетворювача від перевантажень за струмом [3-5].

1.1.1 Традиційне управління з відстеженням мережі

У випадку звичайного управління з відстеженням мережі (УВМ) перетворювачів внутрішні контури пов'язані із зовнішніми контурами, тобто регулювання реальної потужності та регулювання змінної напруги. Опорні струми i_d та i_q зазвичай забезпечуються регулятором реальної потужності, так само як і напруга кола постійного струму контролера.

Компоненти потужності, виміряні на ТЗП-шині в розрахунку на одиницю, виражаються як

$$P = V_{T3П_d} i_d + V_{T3П_q} i_q \quad (1.6)$$

$$Q = -V_{T3П_d} i_q + V_{T3П_q} i_d \quad (1.7)$$

$V_{T3П_q}$ у (1.6) і (1.7) примусово обнуляється через ФА в усталеному режимі. Таким чином, зовнішній контур активної потужності регулює потужність P при її опорному значенні P^* і генерує опорний сигнал струму по осі d i_d для внутрішнього контуру керування струмом. За допомогою i_q регулюється або реактивна потужність Q , або напруга ТЗП $V_{T3П}$, як показано на рис. 2.1.

Відповідно до співвідношення (1.6), регулювання реальної потужності передбачає негативний зворотний зв'язок, в той час як регулювання реактивної потужності або напруги змінного струму передбачає позитивний зворотний

зв'язок (1.7). У випадку регулювання напруги постійного струму використовується керування з позитивним зворотним зв'язком, оскільки напруга постійного струму зменшується, якщо реальна потужність збільшується.

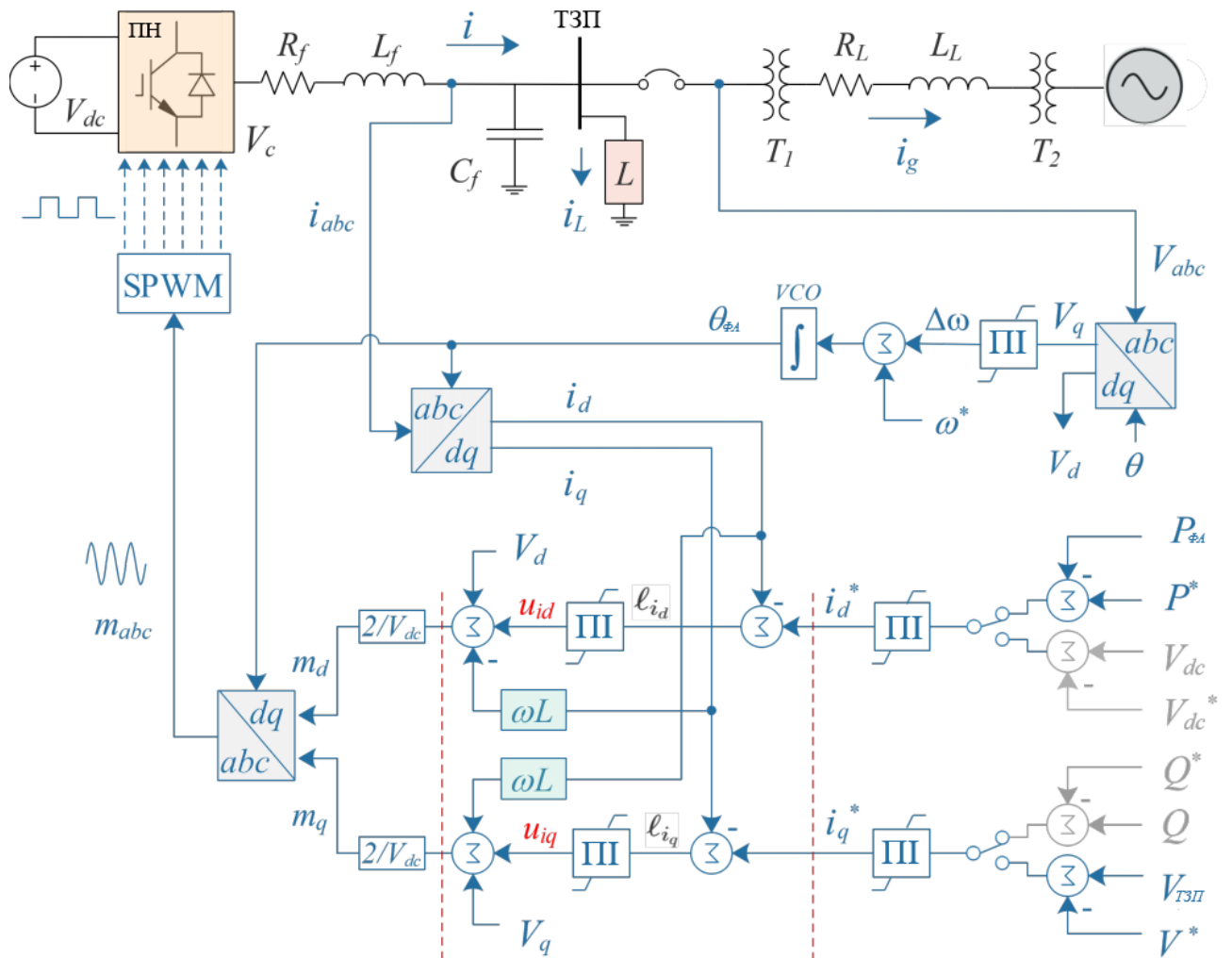


Рисунок 1.1 - Схема звичайної структури управління, що слідкує за мережею.

1.1.2 Традиційне управління з формування мережі

Традиційне управління з формування мережі (УФМ) ПН працює в автономному режимі. Він складається з двох каскадних контурів, як показано на рис. 1.2. Зовнішній контур напруги забезпечує задавання струму i_d та i_q для внутрішнього контуру струму, який інжектується перетворювачем. Динамічне рівняння регулятора напруги виражається в d_q -системі координат наступним чином.

$$C_f \frac{d}{dt} V_{L_d} = i_d - i_{L_d} + \omega_0 C_f V_{L_q} \quad (1.8)$$

$$C_f \frac{d}{dt} V_{L_q} = i_q - i_{L_q} + \omega_0 C_f V_{L_d} \quad (1.9)$$

де V_L та i_L - напруга та струм навантаження.

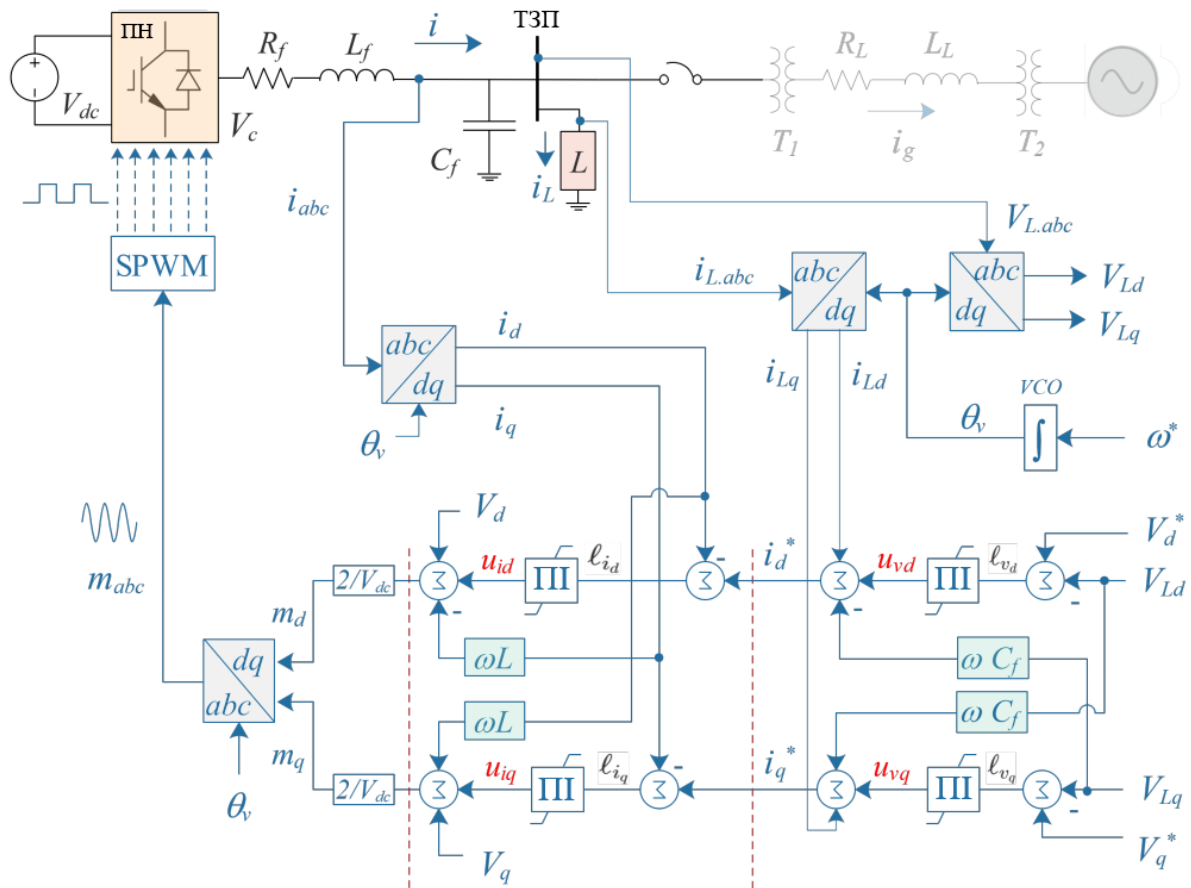


Рисунок 1.2 - Схематична структура управління з формування мережі.

Розв'язуючі компенсації прямого зв'язку впроваджуються в систему керування для того, щоб усунути зв'язок між членами V_{L_d} і V_{L_q} . Отже, напруга на навантаженні V_{L_d} і V_{L_q} можна керувати за допомогою i_d^* та i_q^* відповідно. Визначаються опорні струми i_q^* як:

$$i_d^* = u_{vd} + i_{L_d} - \omega_0 C_f V_{L_q} \quad (1.10)$$

$$i_q^* = u_{vq} + i_{L_q} - \omega_0 C_f V_{Ld} \quad (1.11)$$

де u_{vd} та u_{vq} - вихідні сигнали контролерів. ℓ_{u_d} та ℓ_{u_q} - похибки між опорною та вимірювальною напругами навантаження у d-q-системі координат.

1.1.3 Управління з підтримкою мережі

Мережевий ПН може працювати як в режимі підключення до мережі, так і в автономному режимі, без необхідності переналаштування системи управління [6]. Загалом, завдання мережевого ПН полягають у наступному. а) він може повністю забезпечувати навантаження, коли ЕМ ізольована від основної мережі; б) вона може сприяти регулюванню напруги ЕМ (напруги ТЗП) в обох режимах; с) вона може брати участь у регулюванні частоти ЕМ в обох режимах; г) перетворювачі, що підтримують мережу, можуть розділяти реальну та реактивну потужність завдяки своїй конструкції з падінням [7].

Структура керування трифазною мережопідтримуючою ПН зображена на рис. 1.3. Її керування працює як мережева ПН з додаванням керування падінням напруги. Механізм регулювання провалу спрямований на підтримку напруги та частоти мережі на номінальному рівні.

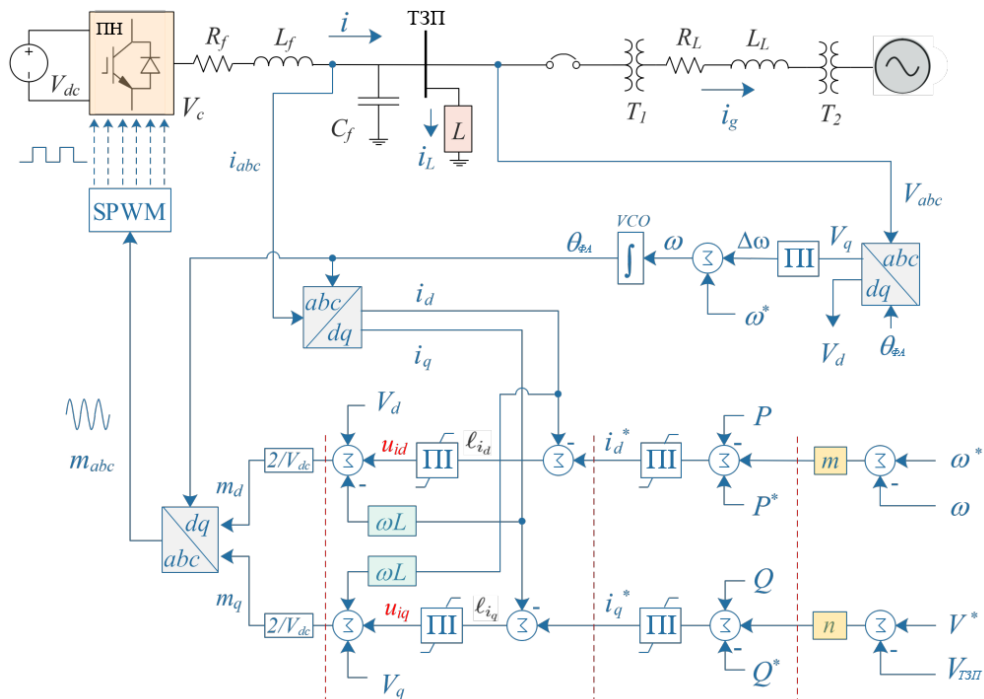


Рисунок 1.3 - Схематична структура управління з підтримкою мережі ПН.

У контурі провал частоти похибка між початковою ω^* (основною частотою ω_0), а виміряна частота ω через ФА подається на вхід блоку підсилення спаду (m), який на виході встановлює падіння опорної потужності до P . Аналогічно, падіння напруги додається до контуру реактивної потужності, щоб встановити опорну потужність падіння до Q . Управління падінням напруги широко використовується в синхронних генераторах для забезпечення первинного регулювання частоти і розподілу навантаження між генераторами [8]. Ця конструкція управління тепер включена в ПН. В енергопідтримуючих ПН регулятори падіння напруги реалізуються над структурою регулювання, з підтримкою мережі, як показано на рис. 1.3. Керування падінням напруги дозволяє регулювати частоту та напругу ЕМ на РСС, контролюючи відповідну активну та реактивну потужність, що передається в мережу та на навантаження. Вирази регуляторів виглядають наступним чином.

$$f - f^* = -m(P - P^*) \quad (1.12)$$

$$V - V^* = -n(Q - Q^*) \quad (1.13)$$

де $V - V^*$ та $f - f^*$ - відхилення напруги та частоти ТЗП від номінальних значень відповідно. Відхилення потужностей $P - P^*$ та $Q - Q^*$ має бути компенсовано системою ПН. Параметри спаду коефіцієнта підсилення m і n представляють нахил спаду частоти і напруги. На рис. 1.4 представлено графічні залежності цих характеристик.

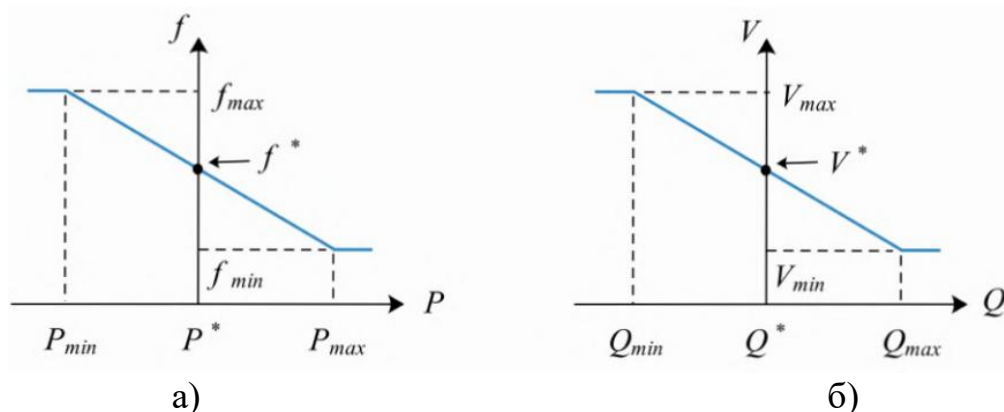


Рисунок 1.4 - Звичайні характеристики спаду. (а) Спад P - f (б) Q - V .

1.2 Тематичні дослідження та результати симуляції для ЕМП

Змодельована система складається з одного розподіленого енергетичного ресурсу (PER), представленого джерелом постійної напруги 500 В, дворівневого ПН, фільтра RL, шунтувальної компенсації та локального навантаження (послідовний RL), підключеного до шини ТЗП. Система ПН підключена до мережі через головний вимикач. Таким чином, вона може працювати як в мережевому, так і в автономному режимах. Перетворювач підключений до мережі 110 кВ через два підвищувальні трансформатори та лінію 35 кВ. Компенсація шунтування приймається на рівні 25% від номінальної потужності системи. Тестовий стенд розроблено в пакеті MATLAB/Simscare.

Система управління та контролю роботи ЕМ необхідна для моніторингу стану мережі та режиму її роботи. Схема виявлення в ЕМ має здатність виявляти збурення в мережі і потім ізолювати ЕМ від мережі шляхом розмикання головного вимикача. Стратегії виявлення посадки були запропоновані в [9]. Пасивний метод є одним з найпоширеніших методів виявлення витоків. Він залежить від вимірювання параметрів системи для виявлення автономної або підключеної до мережі роботи.

На рис. 1.5 показано базову схему керування виявленням на основі захисту від підвищеної/зниженої напруги та захисту від підвищеної/зниженої частоти, граничні пороги яких обрано 95%-105% для напруги та 49,3-50,5 Гц для частоти.

Для порівняння ефективності трьох методів управління системою ПН в MATLAB/Simscare було два тестових стенди ЕМП. У тестовому стенді 1 управління ПН реалізовано як слідування за мережею паралельно з неактивним формуванням мережі під час режиму підключення до мережі. До отримання сигналу від автономної схеми детектування, керування ПН перемикає керування. На стенді 2 прийнято режим ПН, що підтримує мережу, незалежно від режимів ізолювання або синхронізації. На кожному стенді результати моделювання будуть представлені двома подіями: режимами ізолювання та

повторної синхронізації. Для більшої швидкості моделювання прийнято усереднену модель перетворювача.

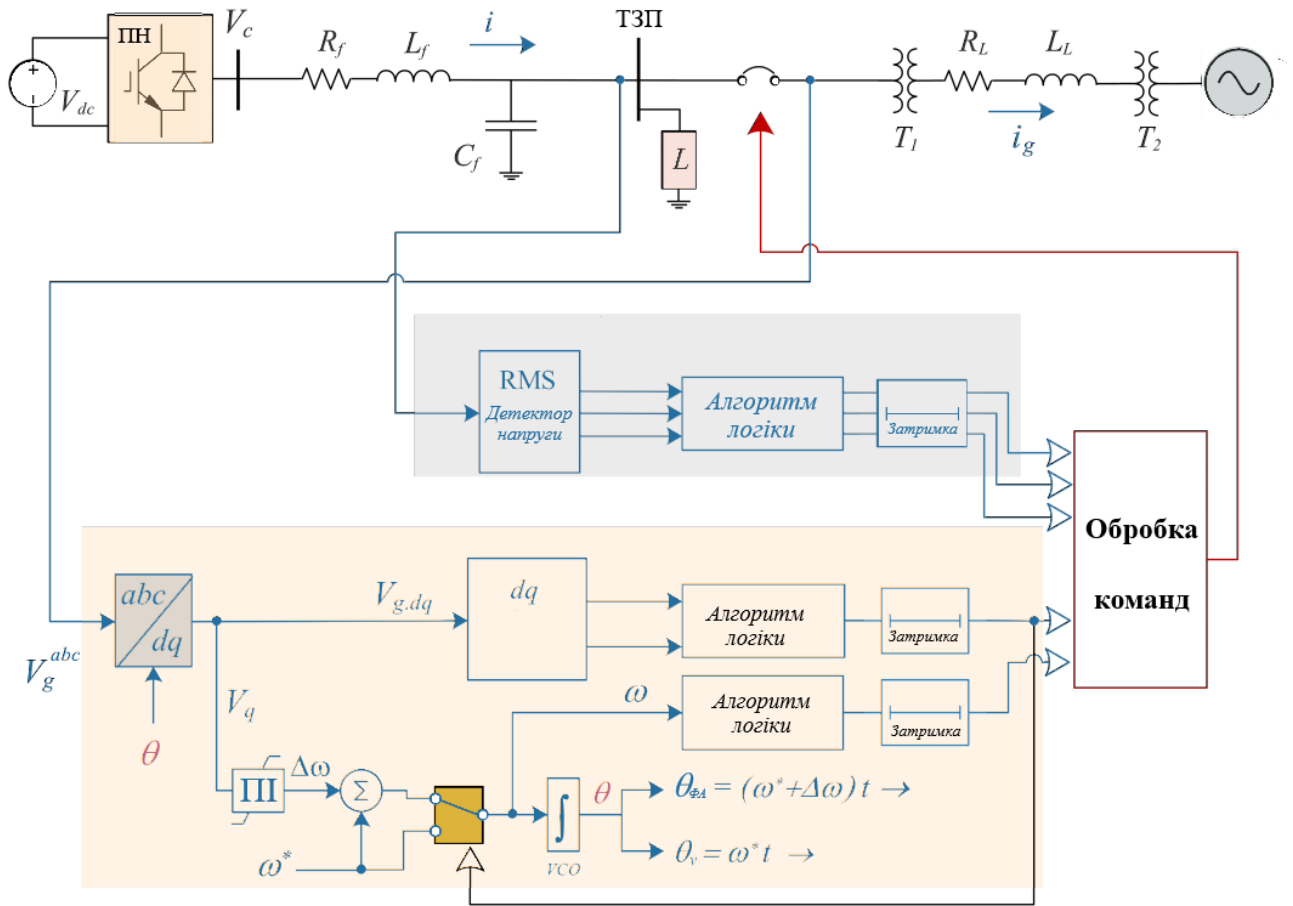


Рисунок 1.5 - Схема виявлення для роботи в режимах з підключенням до мережі та в автономному режимі.

Під час роботи з підключенням до мережі, керування ПН реалізується як керування ПН, що слідує за мережею, де регулюється активна потужність та напруга РСС. Неактивне формуванням мережі, знаходиться паралельно з керуванням, що слідує за мережею, і воно буде активоване, коли ЕМ отримає команду на роботу в автономному режимі, де регулюється напруга і частота ЕМ.

Спочатку ЕМ працює в режимі підключення до мережі, коли головний вимикач закритий. Йому дається команда віддати сумарну активну потужність, а тим часом регулювати напругу РСС на рівні його номінальної напруги. Вироблена перетворювачем потужність віддається в навантаження, яке

поглинає фіксовану активну потужність в обох режимах роботи, а решта потужності передається в мережу.

Трифазне замикання на землю виникає в системі змінного струму в момент часу $t = 1$ секунда, в той час як головний вимикач все ще замикається. Однак, конфігурація керування системою ПН залишається в роботі в мережі за цією умовою. На рис. 1.6 видно, що $V_{ТЗПabc}$ і V_{gabc} зменшуються під час несправності і перед розмиканням головного вимикача. Крім того, частота ω , яку вимірює ФА, зростає верхньої межі 383 рад/с через обмеження ПП-регулятора в ФА.

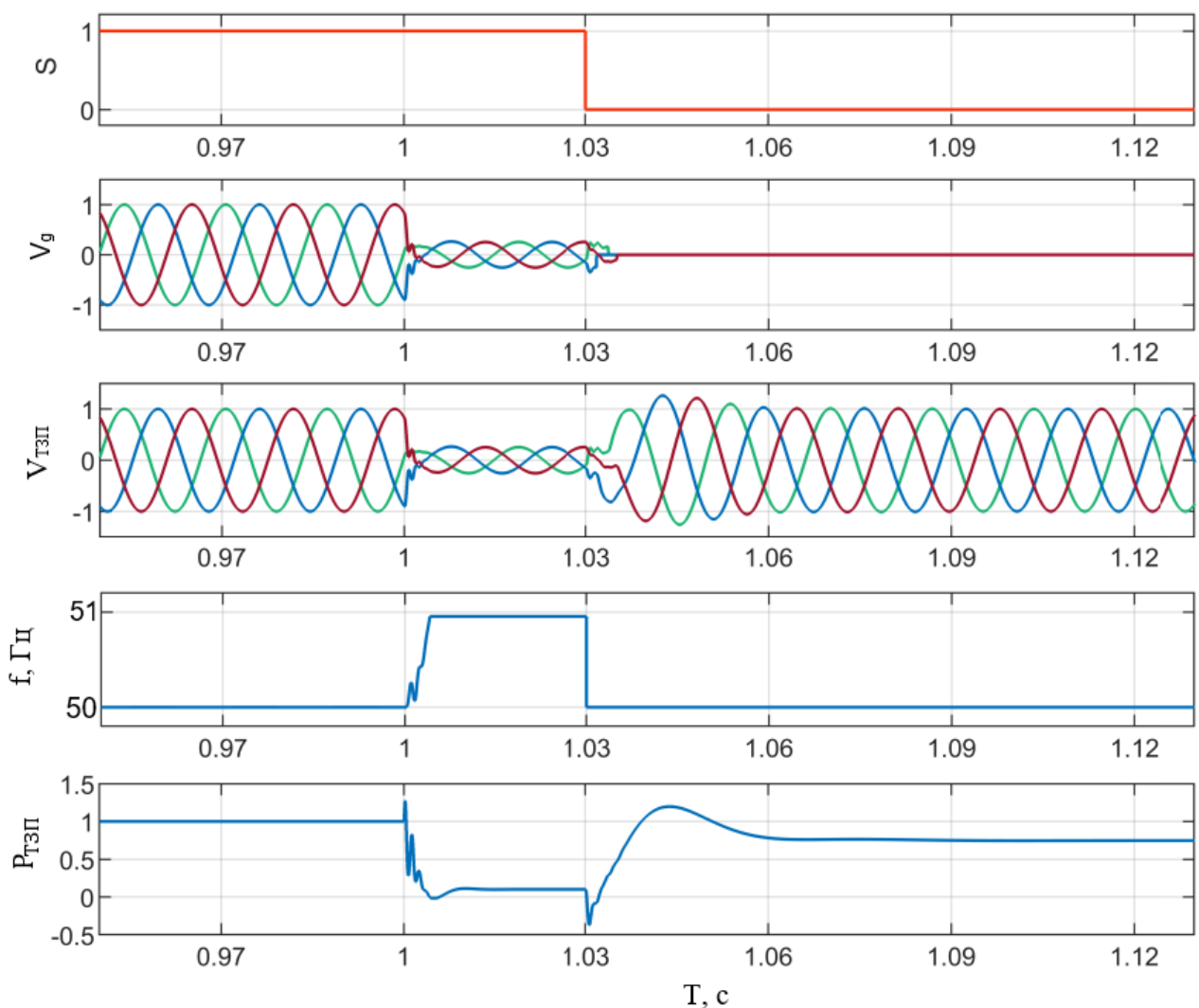


Рисунок 1.6 - Реакції під час переходу системи ПН з режиму підключення до мережі (grid-following) в автономний режим (grid-forming) внаслідок аварійної ситуації.

При виявленні стану аварійного відключення через 30 мс відбувається розмикання головного вимикача шляхом зміни команди режимів роботи з 1 на 0. Таким чином, керування ПН переключється формування мережі, де частота ω_0 встановлюється на рівні $\omega^*=377$ рад/с. Крім того, напруга навантаження V_L регулюється на номінальному значенні, тоді як напруга мережі стає нульовою. Таким чином, система ПН може віддавати в навантаження активну потужність. На рис. 1.6 показано реакцію системи на сигнал команди перемикавання, V_{gabc} , $V_{T3Пabc}$, частоту системи та активну потужність, що передається через ТЗП

Коли несправність усувається протягом 5 секунд, і мережа повертається до нормального режиму роботи, ЕМ повинен перевести свій перетворювач назад у мережу, де частота задається мережею. Напруга $V_{T3П}$ повинна бути повторно синхронізована з напругою мережі V_g перед замиканням головного вимикача, щоб мати плавний перехідний процес, який може виникнути через перемикавання режиму роботи. V_{gq} приймається від'ємним і великим значенням через фаз, $V_{T3П}$ відстає від V_g на 90° , як показано на рис. 1.8. Після навмисної затримки в 0,04 секунди частотний режим перемикається сигналом зворотного режиму мережі, при $t = 5,04$ секунди, як показано на рис. 1.7, з автономного режиму мережі, в якому $\theta_v = \omega * t$, на режим слідування за мережею, в якому він залежить від виходу регулятора ФА, тобто $\theta_{\phi A} = (\omega^* + \Delta \omega)t$. Таким чином, ФА починає відчувати напругу мережі, а потім вона падає до нижньої межі через те, що ФА-контролер зменшує ω , щоб вирівняти V_{gq} на нуль. Коли частота досягає свого номінального значення, V_{gq} і фазовий зсув наближаються до нуля. Як тільки ФА досягає стаціонарного стану, головному вимикачу подається команда на замикання в момент часу $t = 5.375$ секунди за сигналом режиму роботи. Тепер ЕМ працює в режимі з'єднання з мережею, тобто в режимі керування за мережею.

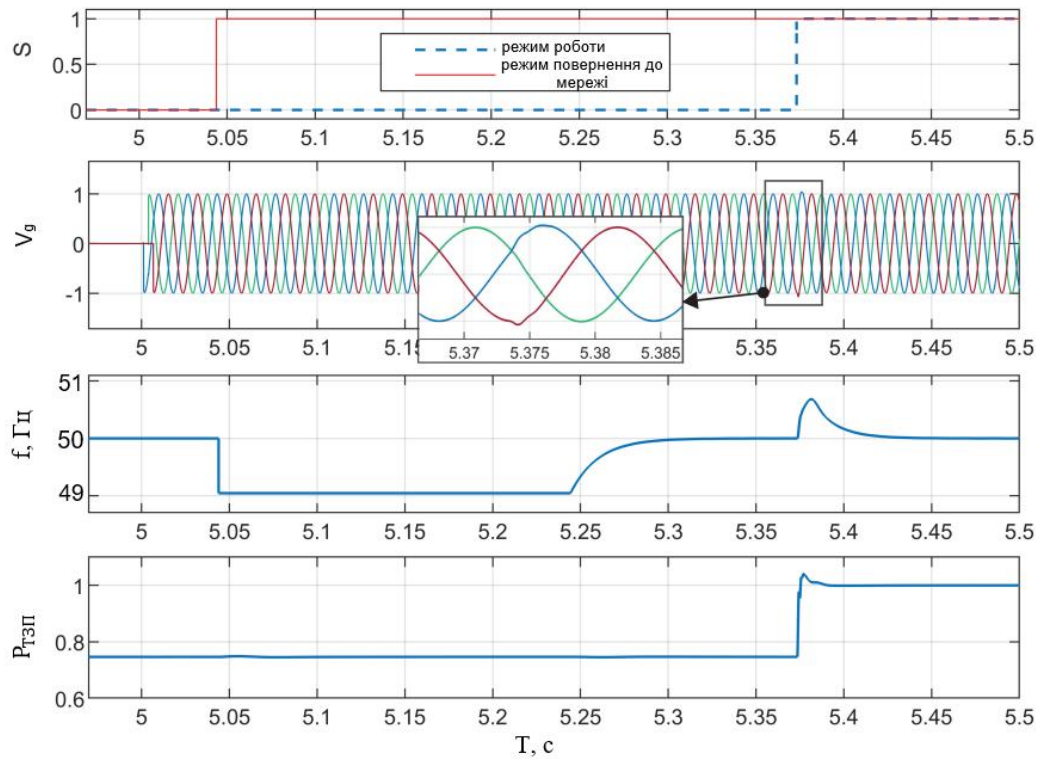


Рисунок 1.7 - Реакції під час перемикання системи ПН з автономного режиму (grid-forming) на режим підключення до мережі (grid-following) при усуненні несправності.

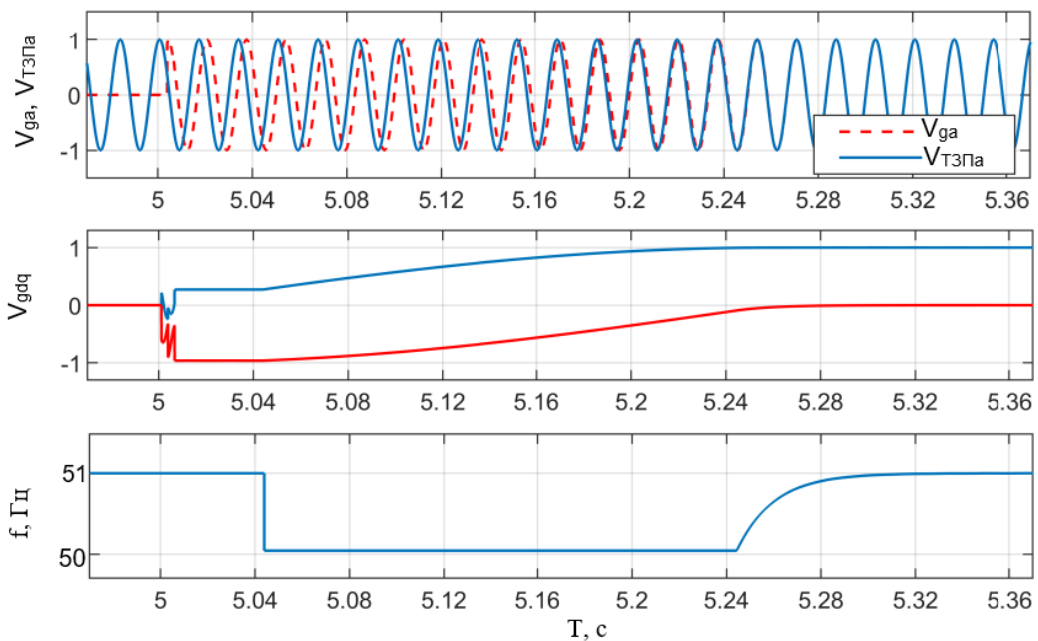


Рисунок 1.8 - Більш детальний погляд на реакції системи під час процесу синхронізації. На верхньому рисунку показані фази а, для напруги мережі та напруги ТЗП. Середній рисунок показує напругу мережі в dq. Нижній рисунок показує частоту ШІМ.

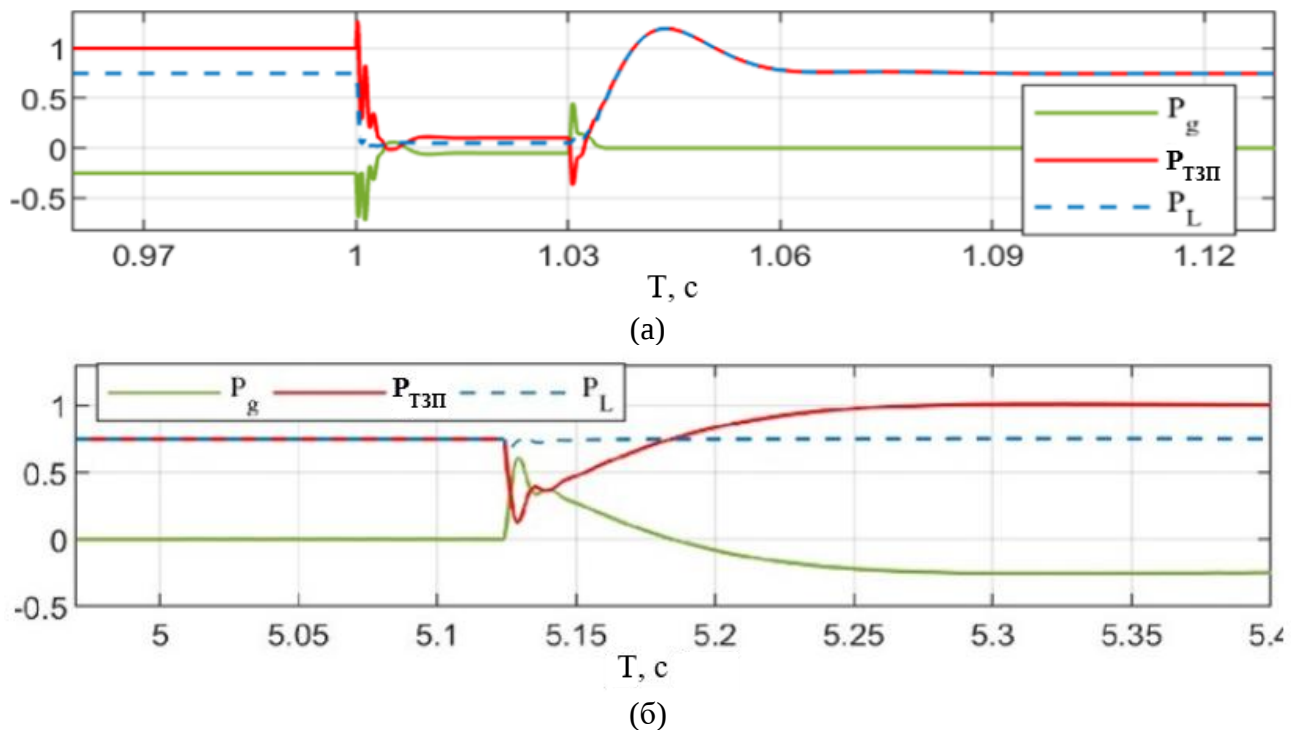


Рисунок 1.9 - Реакції активної потужності під час перемикання режиму роботи ЕМ. (а) із режиму з'єднання з мережею в автономний режим, (б) із автономного режиму в режим з'єднання з мережею.

На моделі рис. 1.3 де прийнято енергопідтримуюче ПН, показано процес перемикання з одного режиму роботи ЕМ на інший. На рис. 1.10 представлено реакцію системи під час переходу в автономний режим несправності. Автономний режим визначається через 30 мс, таким чином, ГД ізолюваний від мережі. Частота ЕМ має нову стабільну робочу точку з відхиленням, обумовленим до зміни потужності. Спочатку, реальне еталонне значення потужності P встановлюється на 1 пуд перед тим, як змінюється режим роботи. Таким чином, активна потужність, що регулюється ПН, зменшується на 0,25% від початкового значення, щоб жити навантаження ($P_L = 0,75\%$). Відхилення частоти можна визначити як ($\Delta\omega = \frac{\Delta P}{m} = 0,475 \text{ Гц}$). Варто зазначити, що ФА не є обмежена в цьому випадку, таким чином, керування падінням частоти може обмежити частоту під час несправності.

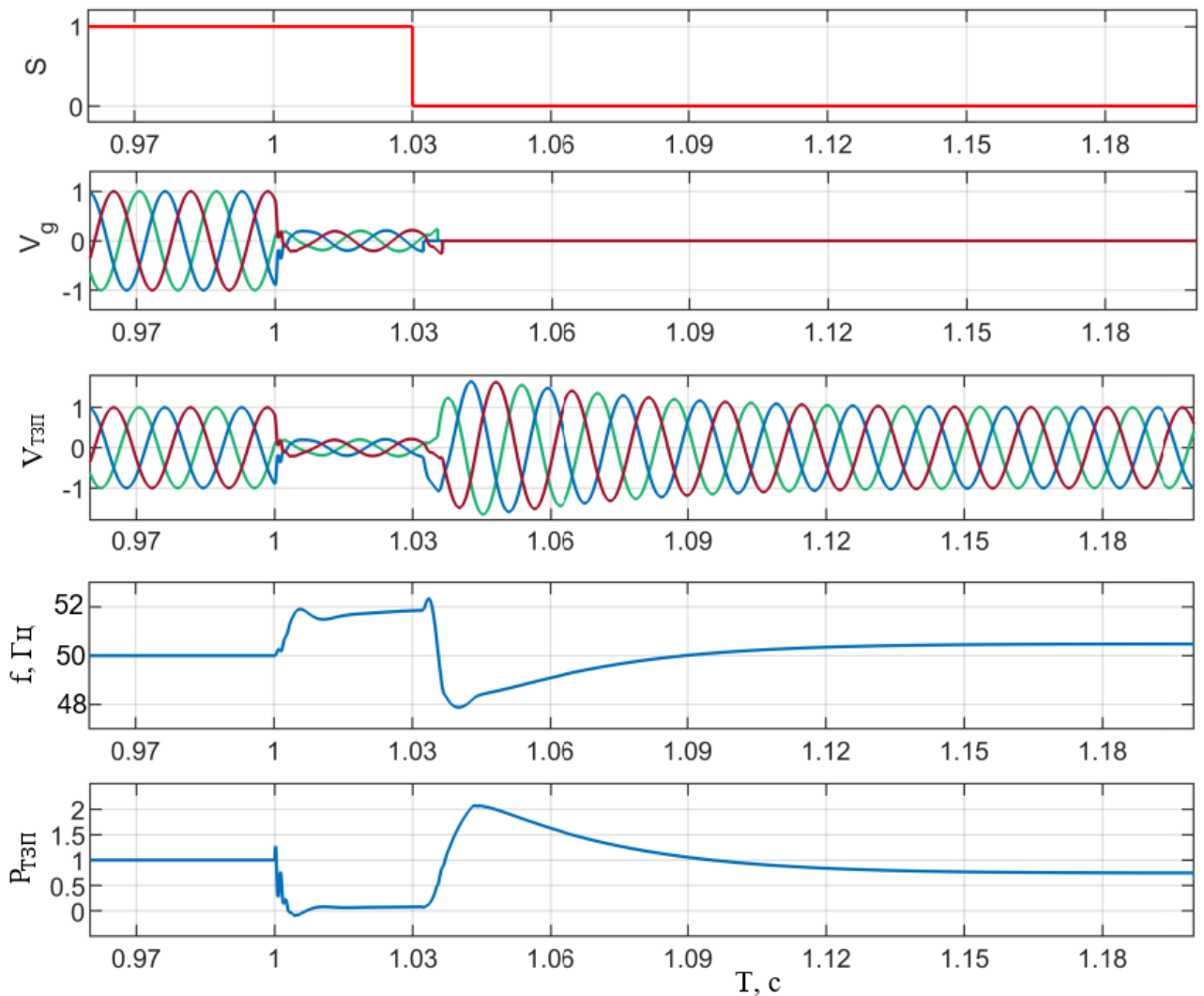


Рисунок 1.10 - Система реагування на поведінку перемикачів з автономного режиму в мережів ПН

Коли мережа повернеться до нормального режиму роботи, ЕМ може бути знову переключений в режим підключення до мережі після усунення несправності протягом $t = 5$ секунд. Режим роботи команда на перемикач після затримки близько 0,11 секунди з моменту скидання несправності, як Оскільки частота системи в обох режимах регулюється ФА, вона здатна синхронізувати напругу РСС з напругою мережі. Завдяки фазовому зсуву між напругою ТЗП та напругою мережі, $V_{ТЗПа}$ випереджає V_{ga} на 90° , в якому результуюча при перерегулюванні частоти. Активна потужність, яка регулюється системою ПН, $P_{ТЗП}$ повертається до свого опорного значення, при якому система ПН забезпечує 0,25% і 0,75% вихідної потужності в мережу та навантаження відповідно.

1.3 Висновок до розділу

У цьому розділі, представлено та обговорено огляд трьох різних механізмів керування ПН, що працюють у ЕМ: звичайний гібридний режим із слідуванням за мережею, звичайний автономний режим з формуванням мережі, та підтримання мережі. Їхні конфігурації керування класифіковано на основі ролі ПН у роботі ЕМ. Представлено, порівняння цих способів керування, побудованих у середовищі MATLAB/Simscape. Розглянуто результати моделювання переходу від однієї до іншої. Порівняно з ПН, що слідує за мережею або формують мережу. ПН, що підтримують мережу, мають перевагу в тому, що вони можуть працювати в обох режимах без зміни конфігурації керування.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Керування небалансом підключеного до мережі сонячного фотоелектричного інвертора

У розділі 1 розглядається реалізація та ефективність керування небалансом мережевого перетворювача на сонячній фотоелектричній електростанції (ФЕС). Традиційний контроль УВМ спрямований на регулювання тільки позитивних струмів. Звичайна схема УВМ розроблена для управління як позитивними, так і негативними струмами. У той час як завдання зовнішніх контурів керування включають регулювання напруги постійного струму і регулювання змінної напруги, внутрішні регулятори струму призначені для відстеження порядку струму, включаючи позитивні і негативні послідовності, що генеруються зовнішніми регуляторами, а також для пом'якшення коливань другої гармоніки (100 Гц) в реальній потужності. У MATLAB/Simscare реалізовано два типи внутрішніх регуляторів струму, а саме: розділена подвійна синхронна система відліку (РПССВ) та пропорційно-резонансний регулятор (ПР). Обидва ці регулятори розроблено на основі звичайного регулятора, що слідує за мережею.

2.1.1 Конфігурація внутрішніх струмових контурів

Система перетворювачів розподілених енергетичних ресурсів (ПЕР) являє собою стандартний трифазний дворівневий ПН, підключений до розподільчої мережі в її точці загального приєднання (ТЗП) через фільтр ($Z_f = R_f + jX_f$), як показано на рис.2.1(а). Трифазне динамічне рівняння системи ПН, підключеної до ТЗП, має вигляд наступним чином.

$$v_{c_{abc}} - v_{TЗП_{abc}} = L_f \frac{di_{c_{abc}}}{dt} + R_f i_{c_{abc}} \quad (2.1)$$

де $v_{c_{abc}}$, $i_{c_{abc}}$ та $v_{T3П_{abc}}$ - вихідні напруги трифазного перетворювача, струми та напруги на шині ТЗП, відповідно (2.1) можна перетворити до просторово-фазової векторної форми наступним чином.

$$\vec{V}_c - \vec{V}_{T3П} = L_f \frac{d\vec{I}_c}{dt} + R_f \vec{I}_c \quad (2.2)$$

Крім того, вектори простору можуть бути представлені або в стаціонарній системі відліку ($\alpha\beta$ -кадр), або в синхронній системі відліку (ССВ) (dq -системі координат). У стаціонарному стані dq -компоненти є постійними величинами, тоді як $\alpha\beta$ -компоненти є синусоїдальними величинами.

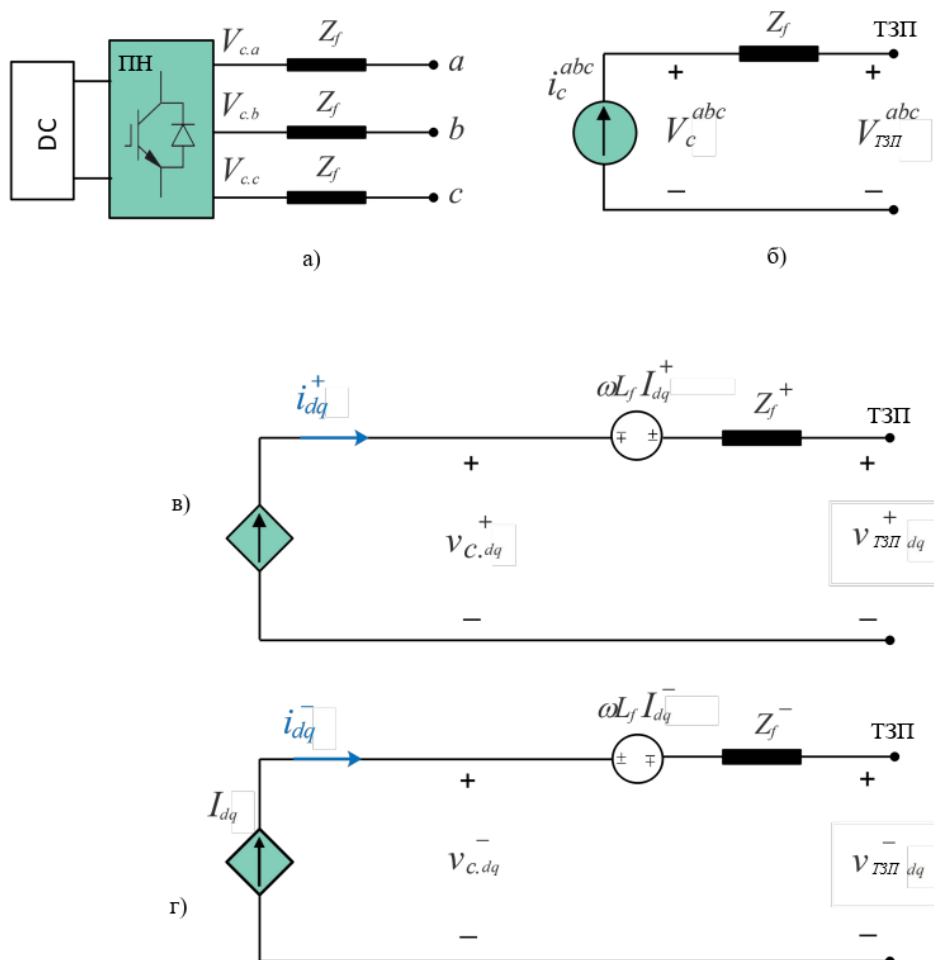


Рисунок 2.1 - Схеми електричних з'єднань для сторони змінного струму системи ПН, підключеної до мережі: а) Трифазне підключення ПН; б) Спрощене трохфазне коло; в) Спрощена схема позитивної синхронної системи відліку (ССВ); г) Спрощена схема негативної ССВ

Вектори величин у (2.2) можна представити у подвійних dq системах координат як суму, додатні та від'ємні вектори послідовності. Таким чином, (2.2) можна сформулювати в додатніх dq^+ та від'ємних dq^- системі координат. Перетворені декомпоновані підсистеми позитивного та від'ємної динаміки послідовності виражені в рівняннях (2.3) та (2.4), відповідно. Підсхеми сторони змінного струму показані на рис.2.1(в)-(г).

$$\begin{aligned} v_{c_d}^+ - v_{T3\Pi_d}^+ &= R_f i_{c_d}^+ + L_f \frac{di_{c_d}^+}{dt} - \omega_0 L_f i_{c_q}^+ \\ v_{c_q}^+ - v_{T3\Pi_q}^+ &= R_f i_{c_q}^+ + L_f \frac{di_{c_q}^+}{dt} - \omega_0 L_f i_{c_d}^+ \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} v_{c_d}^- - v_{T3\Pi_d}^- &= R_f i_{c_d}^- + L_f \frac{di_{c_d}^-}{dt} - \omega_0 L_f i_{c_q}^- \\ v_{c_q}^- - v_{T3\Pi_q}^- &= R_f i_{c_q}^- + L_f \frac{di_{c_q}^-}{dt} - \omega_0 L_f i_{c_d}^- \end{aligned} \quad (2.4)$$

Динамічні вирази в (2.3)-(2.4) є лінійними системами першого порядку, де $i_{c_{dq}}^+$ та $i_{c_{dq}}^-$ керує послідовність струмів у яких пов'язана залежністю $\omega_0 L_f$. В результаті утворюються два контури керування для кожної системи послідовності необхідні для того, щоб одночасно регулювати струми як позитивної, так і негативної послідовності. Кожен контур містить два ПІ-регулятори (здатність точно відстежувати сигнали постійного струму з нульовою усталеною похибкою), а також $\omega_0 L_f$ для досягнення розв'язаного керування. Таким чином, контрольовані вихідні напруги позитивної та негативної послідовності перетворювача виражаються в (2.5) і (2.6) відповідно.

$$\begin{aligned} v_{c_d}^+ &= u_d^+ + v_{T3\Pi_d}^+ - \omega_0 L_f i_{c_q}^+ \\ v_{c_q}^+ &= u_q^+ + v_{T3\Pi_q}^+ - \omega_0 L_f i_{c_d}^+ \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} v_{c_d}^- &= u_d^- + v_{T3\Pi_d}^- - \omega_0 L_f i_{c_q}^- \\ v_{c_q}^- &= u_q^- + v_{T3\Pi_q}^- - \omega_0 L_f i_{c_d}^- \end{aligned} \quad (2.6)$$

На рис. 2.2 показано схему керування роз'єднаних подвійних синхронних контролерів струму (а саме, керування РПССВ).

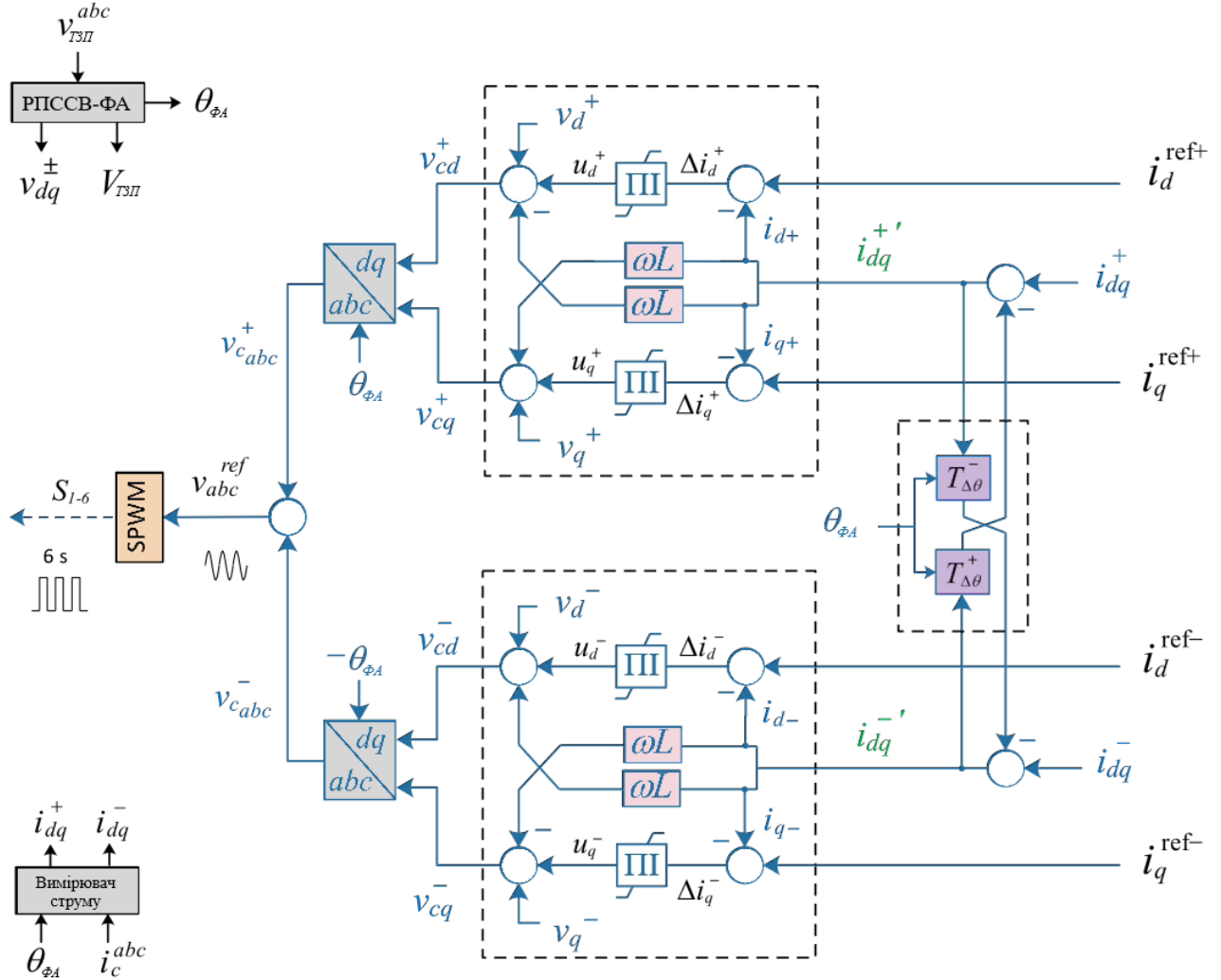


Рисунок 2.2 - Принципова схема структури управління підключеною до мережі системою ПН з використанням роз'єднаних подвійних синхронних контролерів струму (РПССВ).

Коли i_c вимірюються, а потім переводяться у dq величини, обидві складові послідовності взаємодіють одна з одною, генеруючи коливання на частоті 100 Гц (вдвічі вищій за основну частоту) в умовах розбалансування. Однак, ці пульсації не можуть бути скасовані ПІ-регулятором через його нескінченний коефіцієнт підсилення на вході постійного струму. Таким чином,

оскільки між виміряними послідовними струмами dq існує ефект перехресного зв'язку $2\omega_0$, для уникнення коливань струму можна використовувати термін перехресного зв'язку $2\omega_0$ як петлю зворотного зв'язку.

Вектор несиметрії трифазного струму, який буде інжектований в мережу в усталеному режимі, має вигляд

$$i_{abc} = I^+ \begin{pmatrix} \cos(\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} + I^- \begin{pmatrix} \cos(\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Де перший і другий члени представляють відповідно компоненти позитивної та негативної послідовності. Оскільки контроль струму виконується в подвійному системі координат dq , то трифазні струми i_{abc} потрібно належним чином перетворити. Цей крок робиться шляхом перетворення спочатку (2.7) до вигляду $\alpha\beta$, такий $i_{\alpha\beta} = i_{\alpha\beta}^+ + i_{\alpha\beta}^-$. Струми поділяються на додатні та від'ємні компоненти послідовності як:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= I^+ \cos(\theta^+) + I^- \cos(\theta^-) \\ i_\beta &= I^+ \sin(\theta^+) + I^- \sin(\theta^-) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Тоді, dq позитивних і негативних компонент струму можна отримати за допомогою трансформатора Паркса, через $i_{\alpha\beta}$ з відповідними кутами позитивної і негативної послідовності (θ^+, θ^-) , відповідно, як показано в (2.9).

$$i_{dq}^\pm = \begin{pmatrix} \cos(\theta^\pm) & -\sin(\theta^\pm) \\ -\sin(\theta^\pm) & \cos(\theta^\pm) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Нарешті, застосувавши (2.8) до (2.9), ми отримаємо вирази для кривих вимірної послідовності в dq системі координат як.

$$\begin{aligned}
i_{dq}^{\pm} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta^{\pm}) & -\sin(\theta^{\pm}) \\ -\sin(\theta^{\pm}) & \cos(\theta^{\pm}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} i_d^{\pm} \\ i_q^{\pm} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \bar{i}_d^{\pm} \\ \bar{i}_q^{\pm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\Delta\theta^{\pm}) & \sin(\Delta\theta^{\pm}) \\ -\sin(\Delta\theta^{\pm}) & \cos(\Delta\theta^{\pm}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{i}_d^{\mp} \\ \bar{i}_q^{\mp} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Перший доданок у (2.10) показує сигнали постійного струму. Тоді як другий доданок вказує на сигнали змінного струму, які є перехресним зв'язком між сигналами по осі d_q позитивних і негативних системі координат. Цей ефект зв'язку демонструється подвійною частотою пульсацій, що перекривають сигнали постійного струму на осях d_q . Ефект ідентифікується за різницею між кутовою частотою кожного кадру d_q . Можна помітити, що інжекція від'ємної складової струму (i_{abc}) призводить до коливання з частотою $2\omega_0$ додатної складової струму (i_{dq}) у системі відліку, що обертається, і навпаки.

Цих коливань $2\omega_0$ слід уникати, щоб досягти високоефективного керування для інжекції струмів при пошкодженні мережі. Однак, ПІ-регулятор здатен відстежувати лише сигнали постійного струму завдяки своєму нескінченному коефіцієнту підсилення на вході постійного струму, але не може усунути пульсації 100 Гц. Оскільки в (2.10), існує ефект перехресного зв'язку між обома системами відліку логічно сигнал перехресної розв'язки до кожного з цих струмів, щоб обидві системи відліку були незалежними. Така реалізація дозволяє отримати точну оцінку, щоб позбутися частотних коливань. Тому виміряні струми отримані шляхом перехресної розв'язки контурів зворотного зв'язку як.

$$i_{dq}^{+'} = \bar{i}_{dq}^{+'} + (\bar{T}_{\Delta\theta}^{-})\bar{i}_{dq}^{-} - (\bar{T}_{\Delta\theta}^{+})\bar{i}_{dq}^{-} \tag{2.11}$$

$$i_{dq}^{-'} = \bar{i}_{dq}^{-'} + (\bar{T}_{\Delta\theta}^{-})\bar{i}_{dq}^{+} - (\bar{T}_{\Delta\theta}^{-})\bar{i}_{dq}^{+} \tag{2.12}$$

Нарешті, (2.11) і (2.12) гарантують, що виміряні струми в dq-області вільні від явищ зв'язку, усуваючи коливання 100 Гц.

Оскільки (2.2) можна сформулювати в $\alpha\beta$ -системі координат, то сума додатного та від'ємного векторів послідовності має вигляд $\vec{i}_c = i_{c\alpha} + i_{c\beta}$, де $i_{c\alpha} = i_{\alpha}^+ + i_{\alpha}^-$ та $i_{c\beta} = i_{\beta}^+ + i_{\beta}^-$. Таким чином, (2.2) можна подати у вигляді:

$$u_{c\alpha} - u_{TЗП_{\alpha}} = R_f i_{c\alpha} + L_f \frac{di_{c\alpha}}{dt} \quad (2.14)$$

$$u_{c\beta} - u_{TЗП_{\beta}} = R_f i_{c\beta} + L_f \frac{di_{c\beta}}{dt} \quad (2.15)$$

Видно, що в (2.13)-(2.14) не представлено жодних членів зв'язку. Оскільки сигнали, представлені в $\alpha\beta$ -системі координат, мають синусоїдальну форму, два пропорційно-резонансні регулятори (ПР-регулятори) можуть одночасно відстежувати як позитивний, так і негативний струми в одному контурі керування. Таким чином, напругою перетворювача в $\alpha\beta$ -системі координат можна керувати як.

$$u_{c\alpha} = u_{\alpha} + u_{TЗП_{\alpha}} \quad (2.16)$$

$$u_{c\beta} = u_{\beta} + u_{TЗП_{\beta}} \quad (2.17)$$

Схему керування ПР-регуляторами в одному контурі, що керують струмами, зображено на рис. 2.3.

Цей регулятор має на меті не лише контролювати позитивний та негативний струми, але уникнути подвійної частоти його регуляторів. Оскільки ПР-регулятор має нескінченний коефіцієнт підсилення на частоті 100 Гц, він може досягти нульової похибки в усталеному режимі на цій частоті.

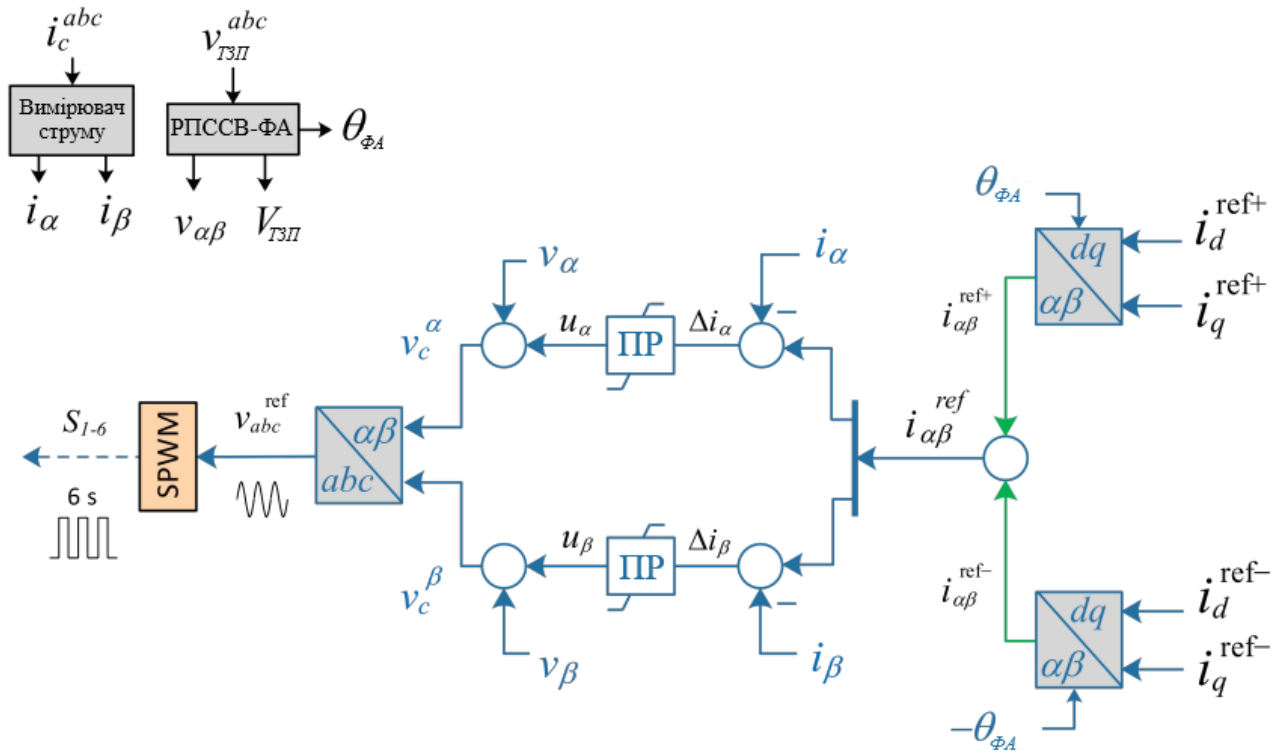


Рисунок 2.3 - Схематичні структури керування ПН в мережевій системі з використанням ПР регуляторів струму

2.1.2 Генерація еталонних струмів

Необхідно розрахувати відповідні позитивні та негативні опорні струми, які будуть подаватися на такі контури керування струмом на рис. 2.2 та рис. 2.3. Таким чином, ці опорні значення в основному отримуються на основі активної та реактивної потужностей. Миттєва комплексна потужність при ТЗП добре відома наступним чином.

$$S_{T3П} = v_{T3П} i_c^* = P_{T3П} + jQ_{T3П} \quad (2.17)$$

Потужність, виражена в термінах перетворених позитивно-негативних послідовностей напруг і струмів (dq-система⁺ і dq-система⁻), записується наступним чином.

$$S_{T3П} = (v_{dq}^+ e^{j\omega_0 t} + v_{dq}^- e^{-j\omega_0 t})(i_{dq}^+ e^{j\omega_0 t} + i_{dq}^- e^{-j\omega_0 t}) \quad (2.18)$$

Дійсна частина (2.18) представляє активну потужність, тоді як уявна частина вказує на реактивну потужність, як показано в (2.19), відповідно.

$$\begin{aligned} S_{T3П} &= (v_{dq}^+ e^{j\omega_0 t} + v_{dq}^- e^{-j\omega_0 t})(i_{dq}^+ e^{j\omega_0 t} + i_{dq}^- e^{-j\omega_0 t}) = \\ &= (P_0 + P_{c2} \cos(2\omega_0 t) + P_{s2} \sin(2\omega_0 t) + \\ &+ j(Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega_0 t) + Q_{s2} \sin(2\omega_0 t)) \end{aligned} \quad (2.19)$$

де P_0 та Q_0 - середні значення активної та реактивної потужностей, що надходять в мережу, відповідно. P_{c2} , P_{s2} , Q_{c2} та Q_{s2} - гармоніки другого порядку цих миттєвих потужностей. Ці гармонічні складові генерують пульсації активної та реактивної потужності при несиметричних перепадах напруги. Q_{c2} і Q_{s2} можна знехтувати, оскільки вони не впливають на коливання

$$\begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q_{c2} \\ Q_{s2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_d^+ & v_q^+ & v_d^- & v_q^- \\ v_q^+ & -v_d^+ & v_q^- & -v_d^- \\ v_d^- & v_q^- & v_d^+ & v_q^+ \\ v_q^- & -v_d^- & -v_q^+ & v_d^+ \\ v_q^- & -v_d^- & v_q^+ & -v_d^+ \\ -v_d^- & -v_q^- & v_d^+ & v_q^+ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Компоненти потужності в (2.20), виражені через перетворені додатні та від'ємні послідовності напруг і струмів, можуть бути сформовані в матрицю 6×4 . Оскільки Q_{c2} і Q_{s2} ігноруються, (2.20) можна перетворити в матрицю 4×4 . Таким чином, поточні відліки послідовності можна визначити, взявши обернену до (2.20) формулу, як показано в (2.21). P_{c2} і P_{s2} прирівнюються до нуля, щоб отримати правильні опорні струми. У цьому дослідженні P_0 і Q_0 визначаються до $P_{T3П}^{ref}$ та $Q_{T3П}^{ref}$, які отримано із зовнішніх циклів.

$$\begin{pmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{pmatrix}^{ref} = \begin{pmatrix} v_d^+ & v_q^+ & v_d^- & v_q^- \\ v_q^+ & -v_d^+ & v_q^- & -v_d^- \\ v_d^- & v_q^- & v_d^+ & v_q^+ \\ v_q^- & -v_d^- & -v_q^+ & v_d^+ \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} P_0 = P_{T3П}^{ref} \\ Q_0 = Q_{T3П}^{ref} \\ P_{c2} = 0 \\ P_{s2} = 0 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Слід підкреслити, що додатні та від'ємні опорні команди, отримані з (2.21), будуть застосовані до обох типів регулювання несиметрії на рис. 2.2 та рис. 2.3. На рис. 2.3, для цього, потрібно, щоб опорні команди dq були переведені в $\alpha\beta$ -систему.

2.1.3 Управління зовнішніми контурами

У звичайних мережевих ПН регулюються тільки компоненти позитивної послідовності, а активний струм задається регулятором напруги ланки постійного струму, в той час як задавання реактивного струму отримують від регулятора змінної напруги. При регулюванні як позитивних, так і негативних компонентів послідовності, напруга ланки постійного струму та ПН більше не контролюється лише позитивними компонентами. Однак, реалізації регулювання несиметрії разом із зовнішніми контурами є те, як визначити опорні значення потужності: $P_{T3П}^{ref}$ та $Q_{T3П}^{ref}$ у (2.21). Зовнішні контури регулюють постійну та змінну напругу. Таким чином, тільки опорна напруга постійного струму та опорна напруга змінного струму можуть розглядатися як задані.

$$\frac{d}{dt}(C_{dc}V_{dc}^2) = P_{PV} - P_{dc} \quad (2.22)$$

$$= P_{PV} - V_{T3Пd} I_{C_d} \quad (2.23)$$

Рівняння (2.22) представляє динамічну систему балансу потужності в конденсаторі ланки струму в розрахунку на одиницю при сталому режимі роботи. P_{PV} - сумарна вихідна потужність фотоелектричних модулів, а P_{dc} - сумарна вихідна вхідна потужність перетворювача, де $P_{dc} = V_{dc}I_{dc}$. Це співвідношення є фундаментальне динамічне рівняння для керування напругою

ланки постійного струму. Фільтр перетворювача має невеликий опір, і пов'язана з ним потужність є незначною порівняно з потужностями на клеммах перетворювача та шині ТЗП, як показано на рис. 2.5. Зауважимо, що втрати потужності в конденсаторі також не враховуються. Напруга постійного струму є змінною стану, а вихідна потужність перетворювача - вхідним сигналом керування. Тому опорну активну потужність $P_{ТЗП}^{ref}$ можна визначити, керуючи напругою постійного струму, як показано на рис. 2.4.

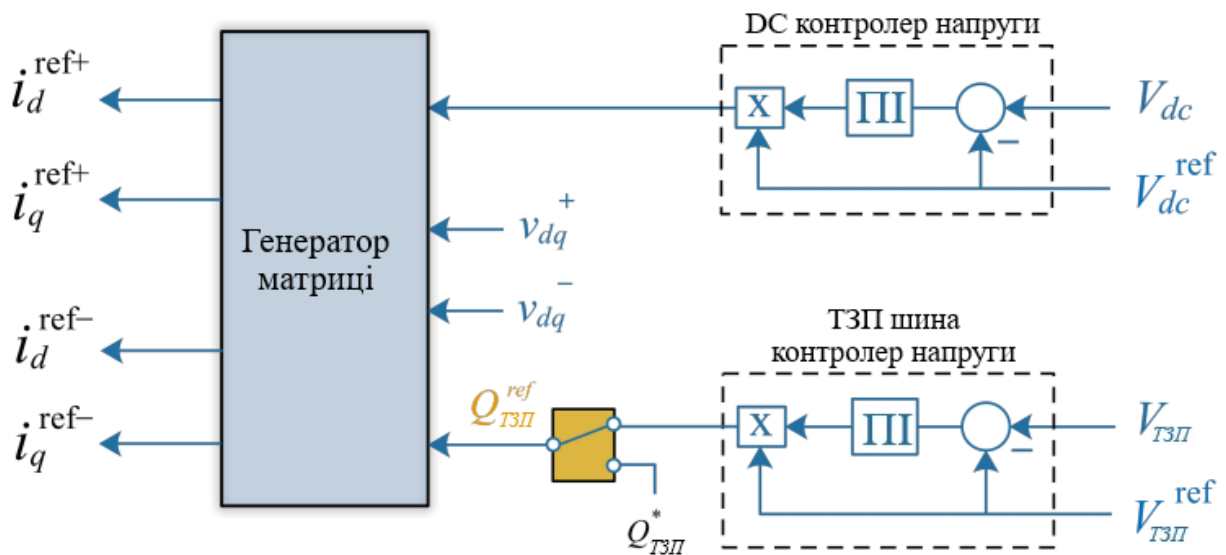


Рисунок 2.4 - Реалізація зовнішніх контурів; контролери постійної та змінної напруги для генерації команд живлення і для генерації позитивного та негативного опорних струмів.

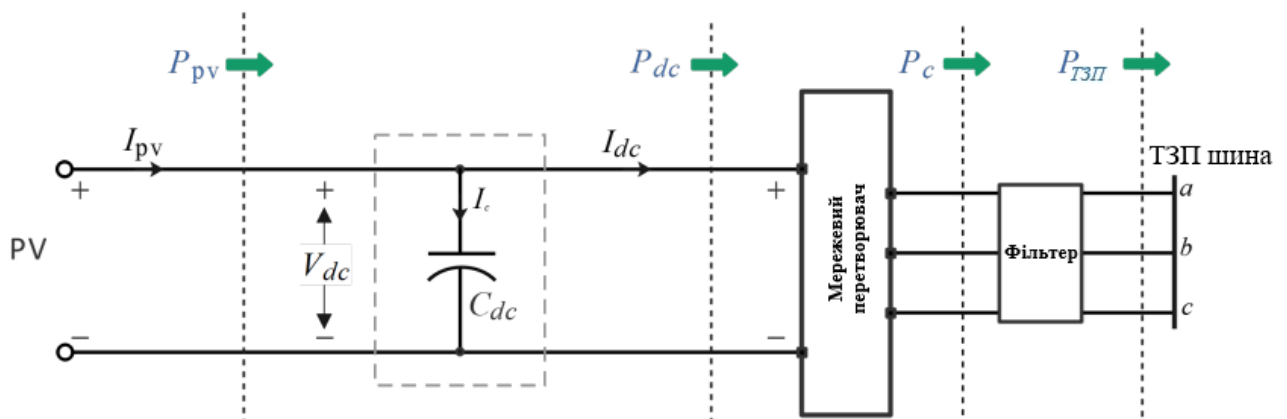


Рисунок 2.5 - Сторона постійного струму, конденсатор і живлення.

Змінна напруга, виміряна на шині ТЗП, контролюється на основі позитивної напруги dq , як показано на рис. 2.6. Вимірювання напруги визначаються блоком ФА незалежно від схеми керування.

Зауважте також, що відповідно до співвідношення (2.23), керування напругою в колі постійного струму передбачає керування з позитивним зворотним зв'язком, оскільки напруга зменшується, якщо реальний експорт електроенергії зростає. В той час як регулювання напруги змінного струму передбачає управління з негативним зворотнім зв'язком.

2.1.4 Розділена подвійна синхронна система відліку ОЗЗя незбалансованих умов

Кут зсуву фаз напруги мережі зазвичай визначається за допомогою звичайної синхронної системи відліку ФА для збалансованих випадків. Коли мережа несиметрична, звичайний ФА не працює належним чином, оскільки виявлений кут має частотні пульсації. Таким чином, як альтернатива, в цих умовах добре відомо використання розділеної подвійної синхронної системи відліку з фазовим синхронізатором (РПССВ-ФА). Цей ФА не тільки здатний точно витягувати фазовий кут, але й усунути пульсації 100 Гц зі свого входу. Він підходить для використання разом зі схемою контролю небалансу. В основному, він використовує мережу розв'язки з перехресним зворотним зв'язком для усунення пульсацій від позитивних і негативних переданих напруг dq через зв'язок. Для того, щоб позбутися пульсацій 100 Гц, концепції, що використовуються для вимірювання струмів, як показано в (2.11) і (2.12), подібні до тих, що використовуються для вимірювання напруги. Блок РПССВ-ФА також використовується для вимірювання напруги. На рис. 2.6 показано структурну схему блоку РПССВ-ФА.

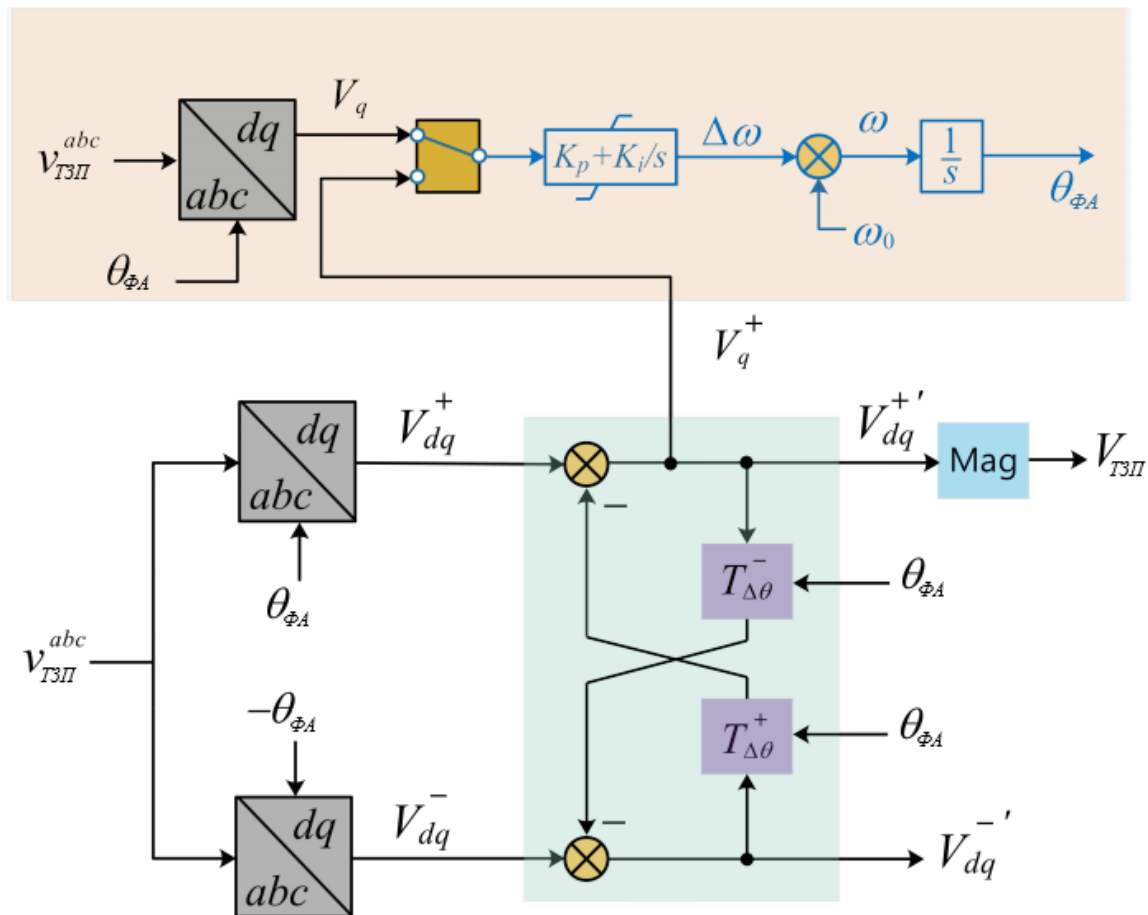


Рисунок 2.6 - Принципова схема розділеної подвійної синхронної системи відліку з фазовим автопідстроюванням (РПССВ-ФА).

2.2 Моделювання фотоелектричної системи підключеної до мережі

Тестовий стенд електромагнітних процесів (ЕМП), що використовується в цьому дослідженні, як показано на рис. 2.7, являє собою трифазну систему, підключену до мережі, розроблену в середовищі MATLAB/Simscapе. ФЕС складається з чотирьох паралельно з'єднаних фотоелектричних модулів, кожен з яких виробляє максимальну потужність 100 кВт при сонячному випромінюванні 1000 Вт/м². Сонячні батареї з'єднані з дворівневою системою ПН через DC/DC підвищувальний перетворювач для кожної батареї, що працює за алгоритмом відстеження точки максимальної потужності (MPPT) - збурення та спостереження. Система ПН підключена до мережі на шині ТЗП 260 В через фільтр (R_f , X_f). Два трансформатори з Y-подібним заземленням (Т1, Т2) підвищують напругу 260 В до лінії електропередачі (R_L , X_L), а потім до мережевої шини 110 кВ.

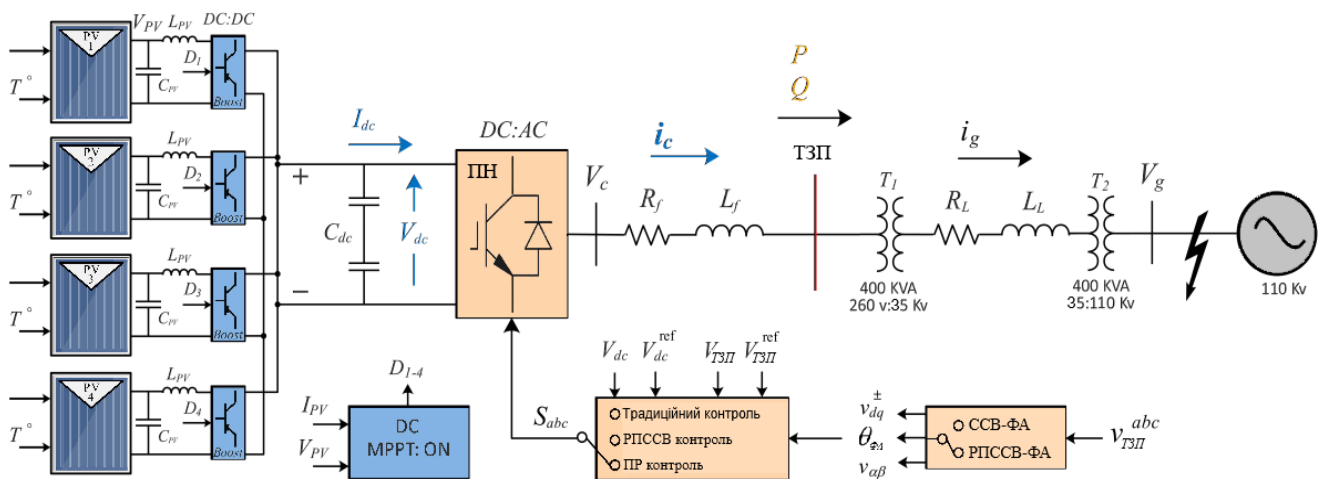


Рисунок 2.7 - Випробувальний стенд електромагнітних процесів ФЕС потужністю 400 кВт, підключеної до мережі, при різних методах керування ПН.

Фотоелектричний масив, що використовується в цій роботі, реалізовано у вигляді масиву фотоелектричних (ФЕМ) модулів. Масив побудовано з 64 модулів, з'єднаних паралельно. Кожна лінія складається з 5 модулів, з'єднаних послідовно. Цей фотоелектричний масив дозволяє моделювати задані фотоелектричні модулі. Фотоелектрична батарея - це п'ятипараметрична модель з використанням джерела струму, що генерується світлом (I_L), діода, послідовний опір (R_s) та шунтуючий опір (R_{sh}) для представлення опромінення та температурно-залежні I-V характеристики модулів.

Кут зсуву фаз напруги мережі зазвичай визначається за допомогою звичайного ФА (ССВ-ФА) для збалансованих випадків. ССВ- ФА застосовано до випробувального стенду 1. Однак, коли мережа несиметрична, звичайний ФА не працює належним чином, оскільки виявлений кут має частотні пульсації. Таким чином, в якості альтернативи можна використовувати незалежну ФА-ССВ. РПССВ-ФА не тільки здатний точно визначити фазовий кут, але й усунути $2\omega_0$ на вході контролера ФА (тобто $V_q = 0$). Цей ФА придатний для контролю несиметрії, тому його реалізовано в тестових стендах 2 і 3.

2.3 Перевірки та результати моделювання фотоелектричної системи підключеної до мережі

Для оцінки ефективності представлених методів керування ПН у підключених до мережі фотоелектричних станціях в умовах незбалансованої мережі було створено три випробувальні стенди ЕМП. На стенді 1 управління ПН здійснюється за допомогою звичайного управління, де регулюється лише струм позитивної послідовності, тобто одина ССВ, як показано на рис. 2.1. У випробувальних стендах 2 і 3 регулювання ПН реалізовано в режимі РПССВ (регулювання небалансу I) і ПР (регулювання небалансу II), де регулюються струми позитивної і негативної послідовності, відповідно.

По-перше, для того, щоб дослідити роботу регуляторів зовнішніх контурів запропонованих систем керування ПН, як показано на рис. 2.2 та рис. 2.3, було визначено два сценарії представлення динамічних характеристик роботи перетворювача при нормальних та аномальних режимах роботи мережі.

У прикладі 1 розглядається динамічна характеристика регулятора напруги постійного струму та позитивно-негативного d при ступінчастій зміні V_{dc}^{ref} , як показано на рис. 2.8. Сині лінії представляють вимірні сигнали, а червона пунктирна лінія - еталонні значення. Регулятор напруги спочатку працює на номінальному значенні 1 в.о. Потім подаються ступінчасті команди (+0,2 та - 0,2 в.о.) під час нормальних (на 1 та 2 секунди) та несиметричних (на 4 та 5 секунди) умов, відповідно. Аналогічно, у прикладі 2 розглядається регулятор напруги змінного струму та позитивно-негативні струми q , що реагують на покрокові команди V_{T3II}^{ref} (-0.2 та +0.2 в.о.) в нормальному та несиметричному режимах відповідно. Видно, що обидва струми послідовності можуть одночасно відслідковувати свої еталонні порядки в усталених режимах незалежно від стану мережі, як показано на рис. 2.9.

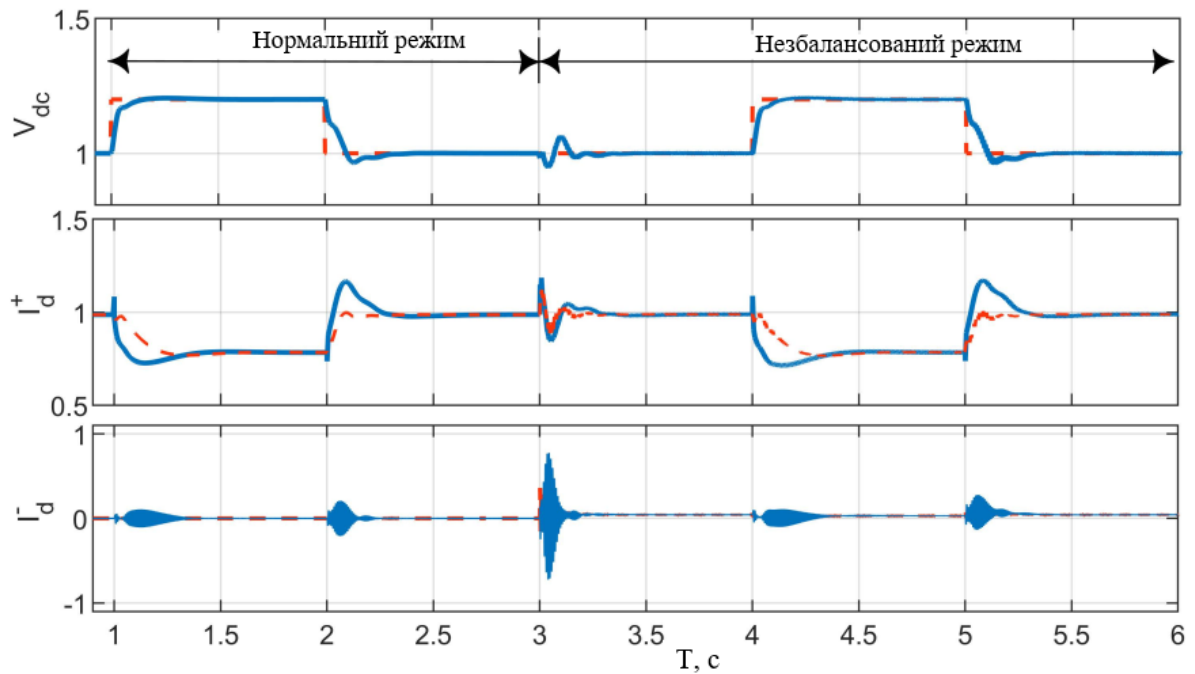


Рисунок 2.8 - Динамічна характеристика струмів послідовностей d та q після їхніх опорних команд під час нормальної та несиметричної роботи через ступінчасту зміну V_{dc} відповідно.

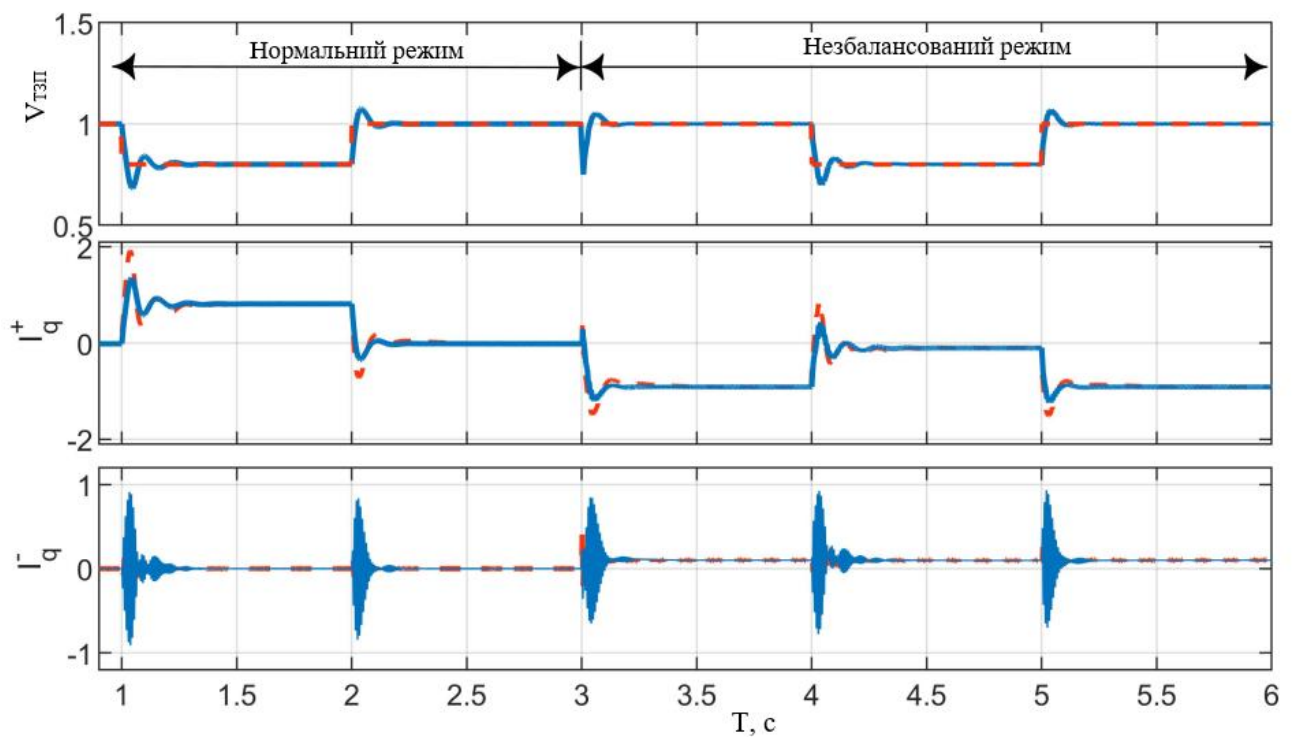


Рисунок 2.9 - Динамічна характеристика струмів послідовностей d та q після їхніх опорних команд під час нормальної та розбалансованої роботи через ступінчасту зміну $V_{гдп}$ відповідно.

При цьому, для всіх випадків моделювання, міжлінійне замикання з падінням напруги по фазах на 30 % b і c застосовуються на стороні мережі протягом періоду часу від 1 секунди до 1,5 секунди.

Крім того, опорні команди для напруги постійного струму та напруги змінного струму ($(V_{dc}^{ref}, V_{TЗП}^{ref})$) спочатку встановлюються на 1 в.о. Для швидкої швидкості моделювання прийнято усереднену модель для ПН.

2.3.1 Випробувальний стенд 1: Звичайний контроль УВМ

Рис. 1.1 ілюструє звичайне керування з підключенням до мережі, де регулюється лише позитивна послідовність. На рис. 2.10 (а) зверху вниз показані результати моделювання трифазної напруги мережі, величини позитивної напруги, напруги постійного струму, а також активної та реактивної потужностей, що вводяться в мережу, де суцільною лінією позначені вимірні сигнали, а пунктирною лінією - опорні команди.

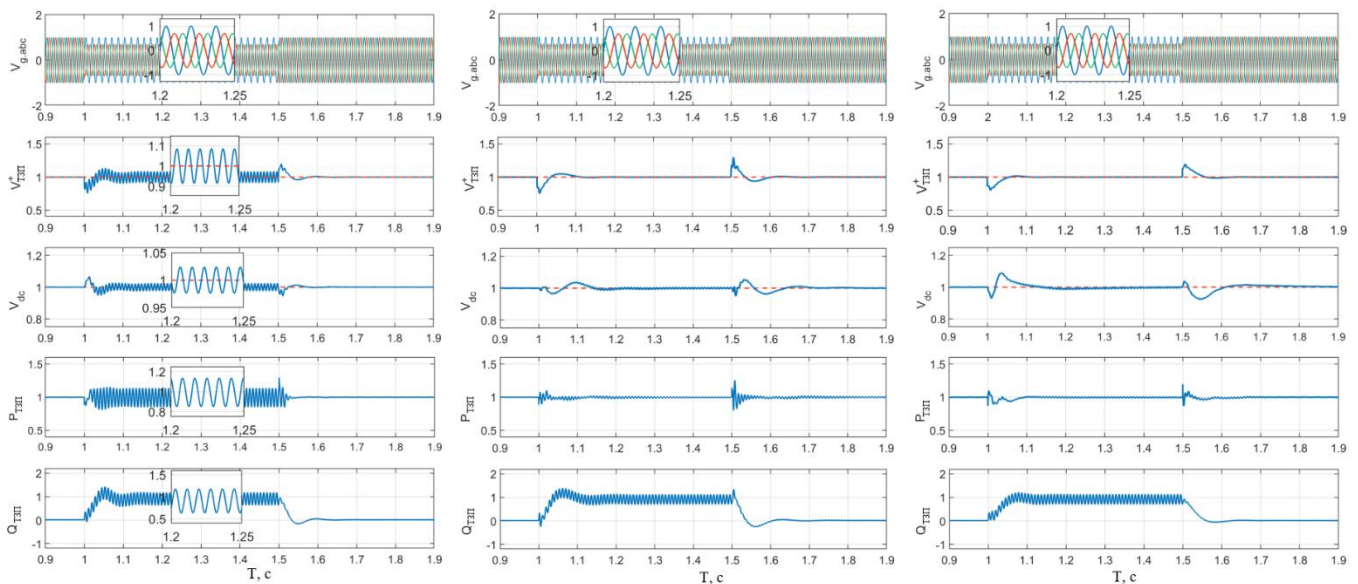


Рисунок 2.10 - Результати моделювання реакції системи під час падіння напруги в мережі. (а) звичайне керування УВМ, (б) керування несиметрією I (РПССВ) та (в) керування несиметрією II (ПР-резонансне).

Напруга ланки постійного струму і напруга шини ТЗП можуть відповідати своїм відповідним характеристикам. Однак, змінна напруга генерує коливання на частоті $2\omega_0$, яких неможливо уникнути за допомогою ССВ-ФА.

Напруга постійного струму також має пульсацію $2\omega_0$. Така пульсація порівняно невелика, але вона призводить до коливань активної потужності, як показано на рисунку.

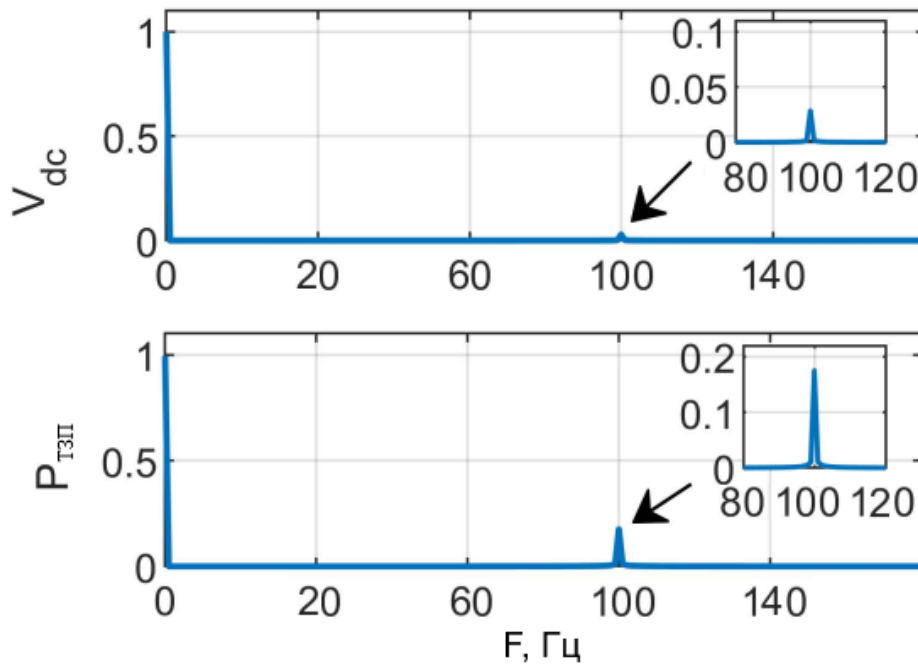
2.3.2 Випробувальний стенд 2: Схема контролю дисбалансу I

На цьому стенді керування ПН виконується в режимі регулювання небалансу, тобто в режимі РПССВ, в якому регулюються струми як позитивної, так і негативної послідовності.

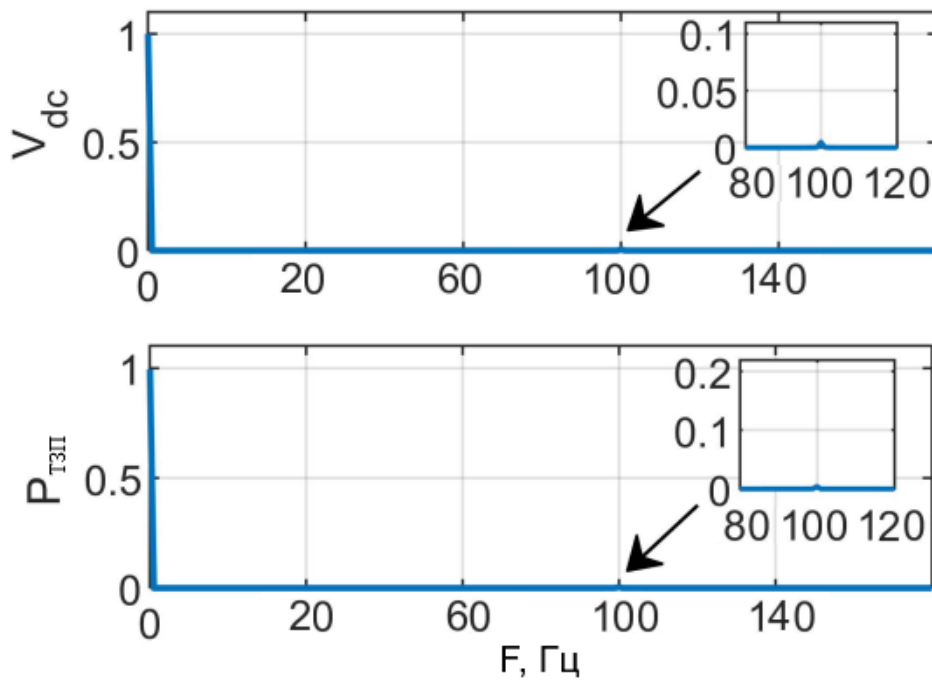
З рис. 2.10(б) видно, що і напруга постійного струму, і напруга ТЗП здатні швидко відслідковувати свої відповідні опорні значення. Пульсації 100 Гц в змінній напрузі усуваються схемою РПССВ-ФА. Крім того, керування струмом РПССВ здатне пом'якшити пульсації активної потужності та постійної напруги. На рис. 2.11 наведено порівняння напруги та активної потужності ланки постійного струму за допомогою аналізу швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) 3.11(а) представляє випробувальний стенд 1, що працює в режимі звичайного керування, тоді як (б) показує випробувальний стенд 2, що працює в режимі керування несиметрією I. Рис. 2.12 надає чіткі ілюстрації динамічних характеристик струмів, що інжектуються.

На рис. 2.12(а) показано трифазний струм, виміряний на шині ТЗП. На рис. 2.12 (б) представлено струм послідовності в позитивній та негативній dq-області, де суцільною лінією позначено виміряні сигнали, а пунктирною лінією - опорні команди. Очевидно, що струми як позитивної, так і негативної послідовності є керованими і швидко слідують своїм командним значенням (пунктирні лінії), а також вільні від пульсацій в усталеному режимі.

На рис. 2.13 показано трифазні струми, виміряні на шині ТЗП під час падіння напруги в мережі. Порівняно зі звичайним керуванням видно, що ПН-перетворювач з регулюванням небалансу збільшує струми, що інжектуються в мережу, за рахунок зменшення основних струмів від'ємної послідовності. Аналіз ШПФ підтверджує, що струми небалансу не тільки зменшують коливання реальної потужності 100 Гц, але й в третій степені гармонічну складову (180 Гц) у трифазних струмах, як показано на рис. 2.14.



(а) тестовий стенд 1



(б) тестовий стенд 2

Рисунок 2.11 - Аналіз ШПФ для напруги та активної потужності ланки постійного струму під час несиметрії. (а) звичайне керування (б) керування несиметрією I.

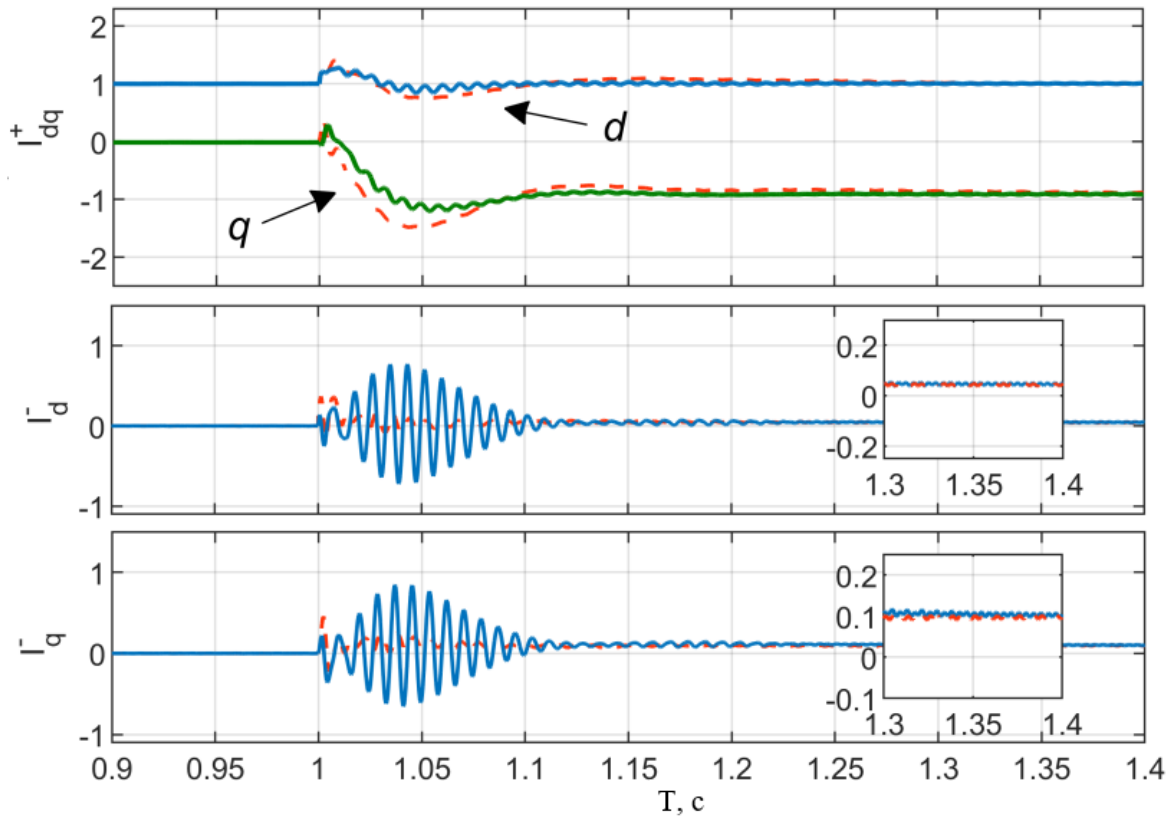
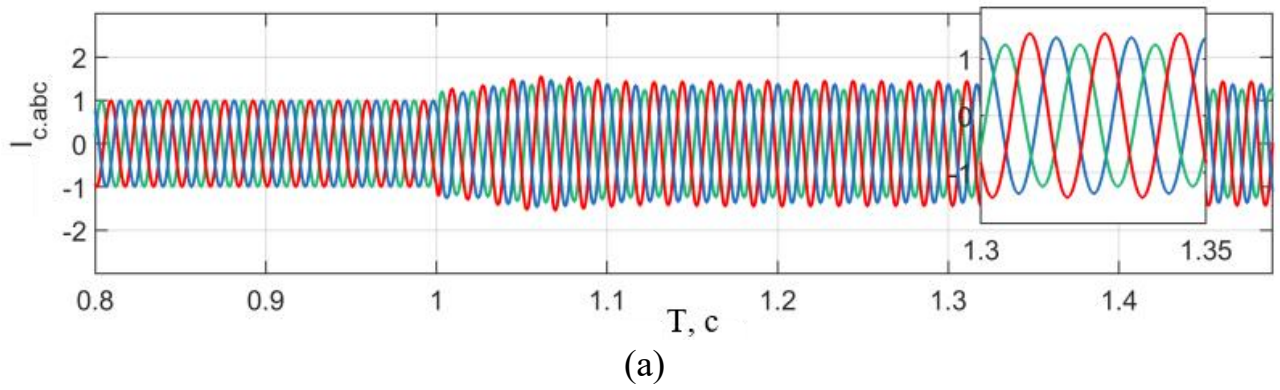
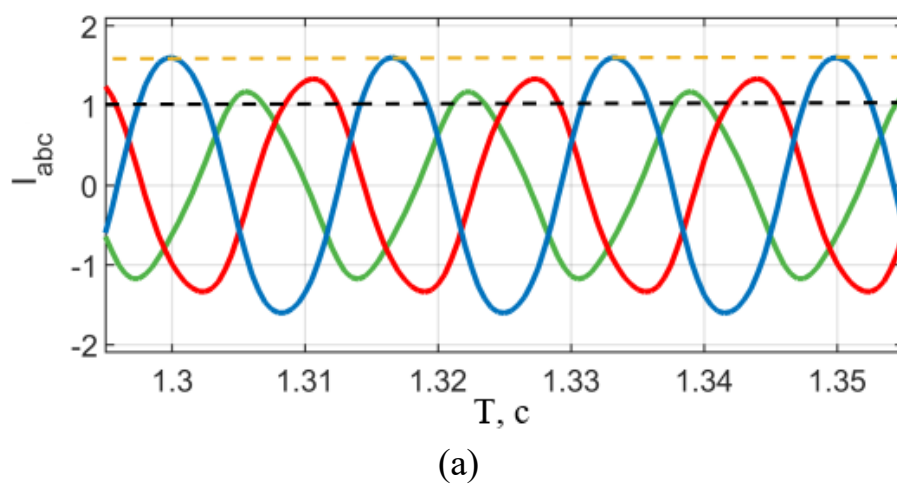
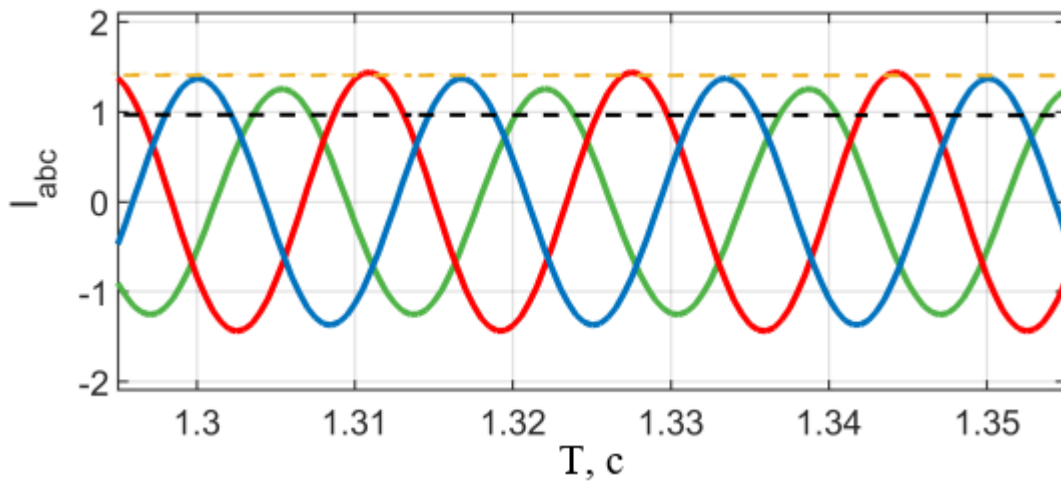


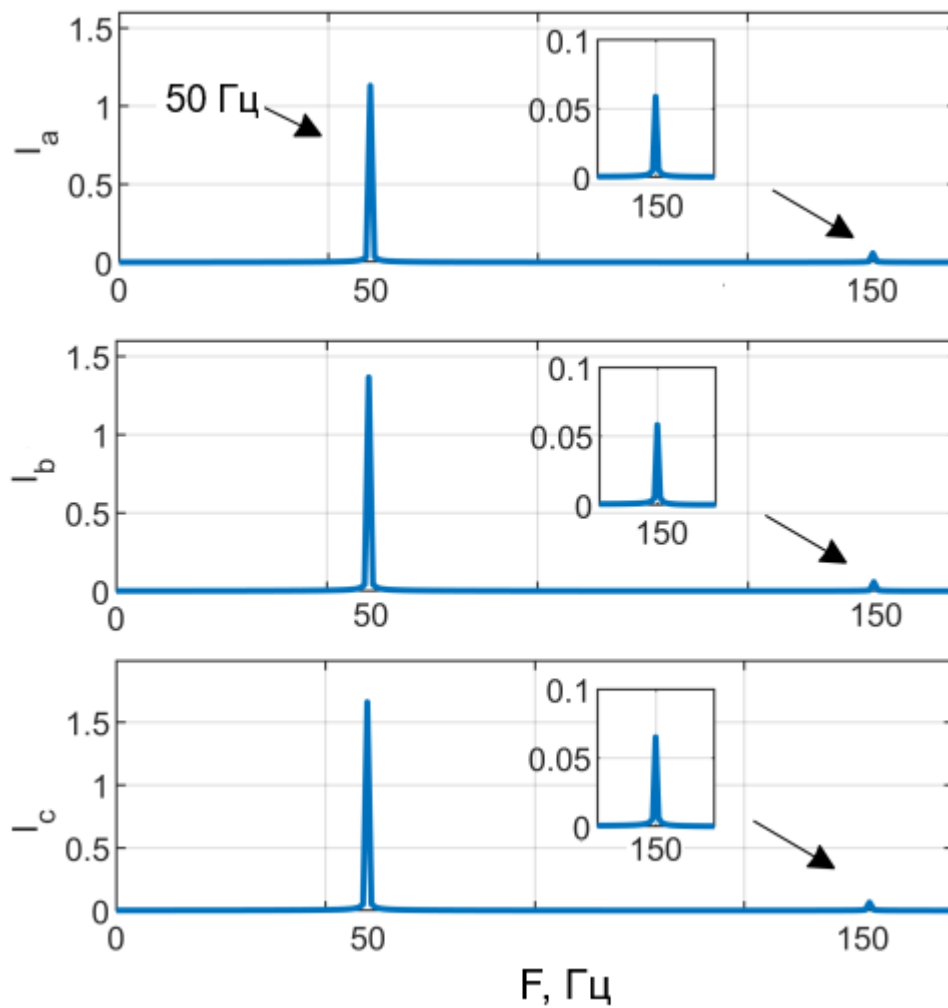
Рисунок 2.12 - Динамічні характеристики вихідного струму ПН при несиметрії мережі, коли інвертор працює в режимі регулювання несиметрії I: а) Виміряні струми в системі abc ; б) Контрольовані струми в dq та dq системі



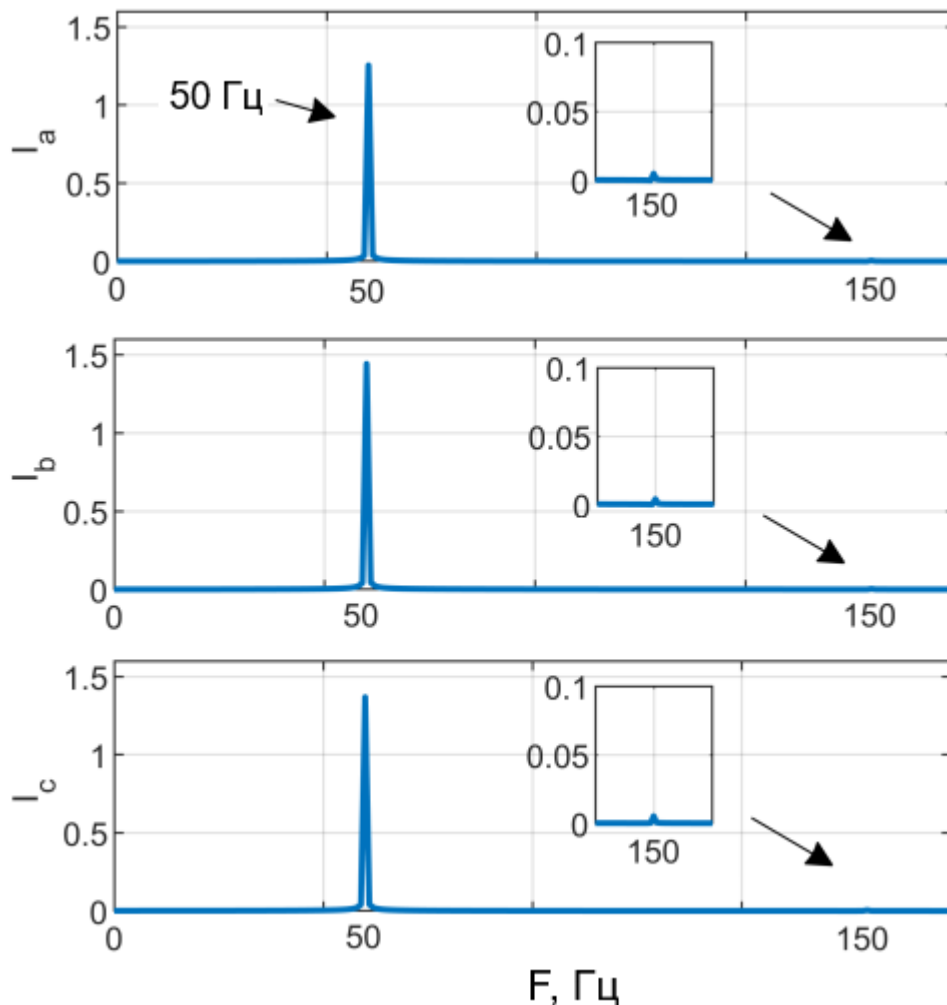


(б)

Рисунок 2.13 - Виміряні сигнали трифазних струмів на ТЗП-шині під час падіння напруги в мережі. (а) звичайне керування; (б) керування несиметрією I



(а)



(б)

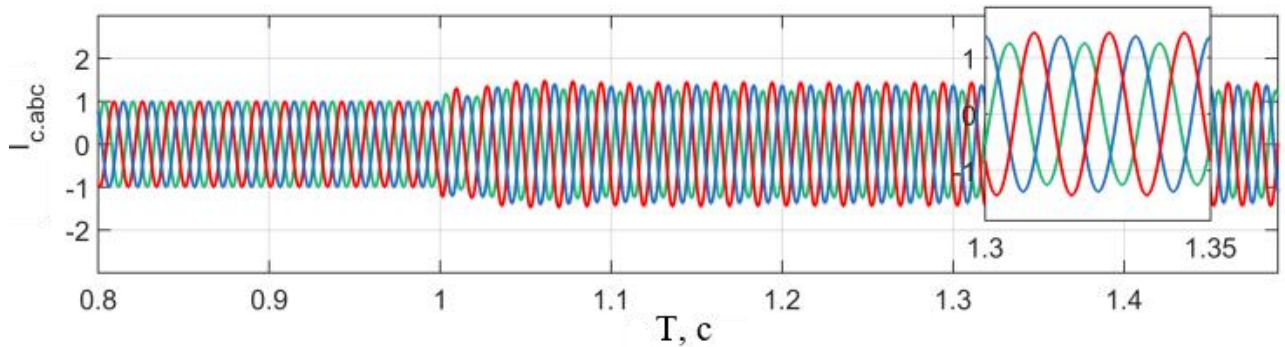
Рисунок 2.14 - Аналіз ШПФ трифазних струмів під час падіння напруги в мережі. (а) звичайне керування та (б) керування небалансом I

2.3.3 Випробувальний стенд 3: Схема контролю дисбалансу II

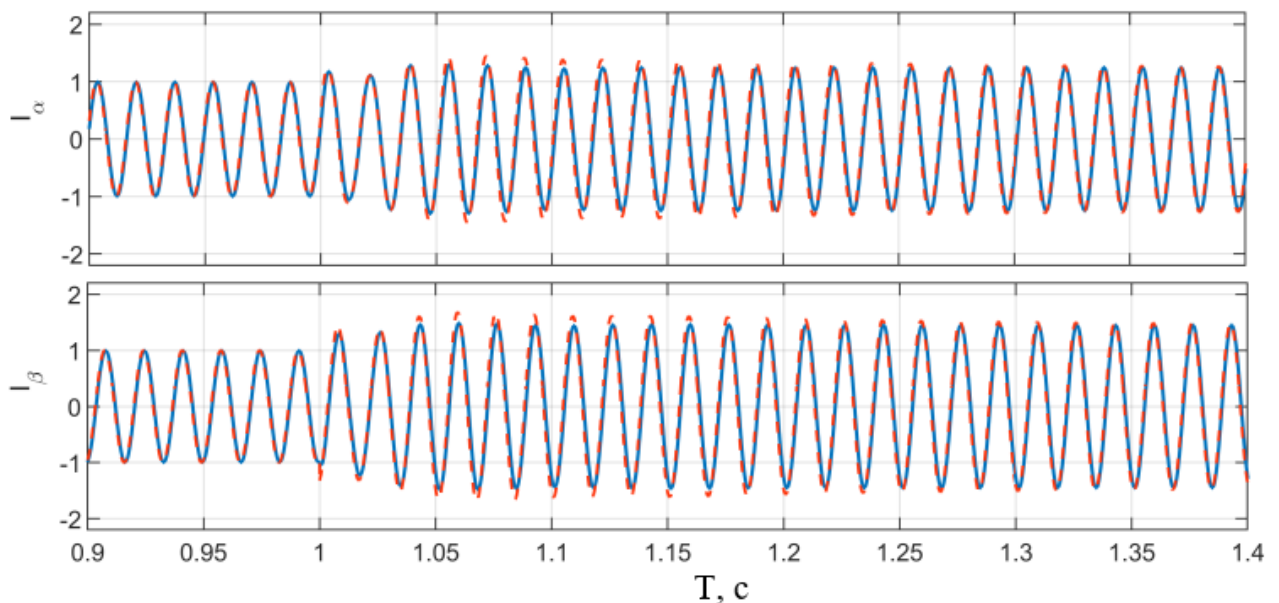
Випробувальний стенд 3 здійснює контроль небалансу для системи ПН, яка використовує регулятор ПР, як показано на рис. 2.3, разом з регуляторами зовнішніх контурів, як показано на рис. 2.4, де обидва струми послідовності регулюються в одному контурі.

Рис. 2.10 (в) підтверджує, що зовнішні контури регулювання напруги постійного струму та ТЗП мають здатність відстежувати опорні команди в нульовому усталеному режимі. На рис. 2.15 (а) показано також виміряні трифазні вихідні струми на виводі перетворювача, а на рис. 2.15 (б) - струми керованої послідовності в $\alpha\beta$ -системі координат. Суцільною лінією показано виміряні сигнали, а пунктирною - еталонні значення струмів. Очевидно, що

регулятор небалансу II здатен не тільки ефективно регулювати струми послідовності (штрихові лінії), але згладжувати пульсації $2\omega_0$. Таким чином, коливання напруги в колі постійного струму і реальної потужності, що інжектується, пом'якшуються.



(а)



(б)

Рисунок 3.15: Динамічні характеристики вихідного струму ПН в умовах несиметрії мережі, коли інвертор працює в режимі регулювання несиметрії II: а) Виміряні струми в системі abc ; б) Контрольовані струми в системі $\alpha\beta$.

Можна зробити висновок, що обидві схеми регулювання небалансу досягають не тільки відмінних показників з точки зору регулювання струмів позитивної та негативної послідовності, але пом'якшують пульсації 100 Гц в активній потужності та напрузі ланки постійного струму, а також гармонійні складові 150 Гц у трифазних струмах. Порівняно з керуванням несиметрією I

(контролери РПССВ), можна сказати, що використання керування несиметрією II (контролери ПР) відносно покращує динамічні характеристики підключеної до мережі сонячної фотоелектричної системи, оскільки немає необхідності розділяти струми позитивної та негативної послідовності для керування внутрішнім контуром.

2.4 Висновки до розділу

У розділі розроблено два типи методів контролю небалансу в мережевому сонячному фотоелектричному інверторі, щоб не тільки регулювати напругу постійного струму і змінну напругу, але і пом'якшити подвійні частотні пульсації в загальній потужності, що подається в мережу, а також пульсації в колі постійного струму. У першій схемі використовуються подвійні внутрішні петлі в системі dq разом із зовнішніми контурами. У другій схемі разом із зовнішніми контурами використовується один внутрішній контур у стаціонарній системі. В обох схемах регулювання, регулюються додатні та від'ємні струми на додаток до регулювання постійної та змінної напруги. Для перевірки переваг керування несиметрією було проведено два імітаційних експерименти з ЕМП за допомогою пакету MATLAB/Simscapе. Для порівняння також побудовано випадок зі звичайною схемою керування, щоб показати регулювання струму негативної послідовності, регулювання змінної напруги та зменшення пульсацій реальної потужності.

3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Структури фотоелектричних інверторів та аналіз ефективності контролю дисбалансу мережевої сонячної фотоелектричної системи

Основною метою дослідження є оцінка впливу керування небалансом УВМ на мережеву сонячну фотоелектричну систему в асиметричних умовах. Регулювання небалансу не тільки ефективно підвищує пропускну здатність і стабільність мережі, але й обмежує інжекцію струму від'ємної послідовності в мережу. Переваги такого контролю розглядаються на прикладі чотирьох сценаріїв: однофазного замикання на землю (ОЗЗ), багатofазного замикання на землю (БЗЗ), однофазного падіння напруги в мережі та двофазного падіння напруги в мережі. Дослідження проводяться за допомогою імітаційного стенду електромагнітних процесів (ЕМП), побудованого в середовищі MATLAB/Simscare. Для демонстрації регулювання струму від'ємної послідовності та зменшення пульсацій реальної потужності для порівняння також побудовано випадок без схеми контролю несиметрії.

Тестовий стенд ЕМП, що використовувався в цьому дослідженні, показаний на рис. 3.1. Стенд являє собою трифазну фотоелектричну систему з підключенням до мережі, розроблену в середовищі MATLAB/Simscare. ФЕС складається з чотирьох паралельних фотоелектричних модулів, кожен яких генерує максимальну потужність 100 кВт при сонячному випромінюванні 1000 Вт/м^2 . Сонячні батареї з'єднані з дворівневим ПН через DC/DC підвищувальний перетворювач для кожного масиву. DC/DC перетворювачі працюють за алгоритмом відстеження точки максимальної потужності (MPPT) - збурення та спостереження, щоб регулювати напругу фотоелектричних модулів (V_{pv}) на рівні 260 В. Система ПН підключена до лінії через два трансформатори з Y-подібним заземленням, які підвищують напругу 260 В до лінії 35 кВ, а потім до мережі 110 кВ.

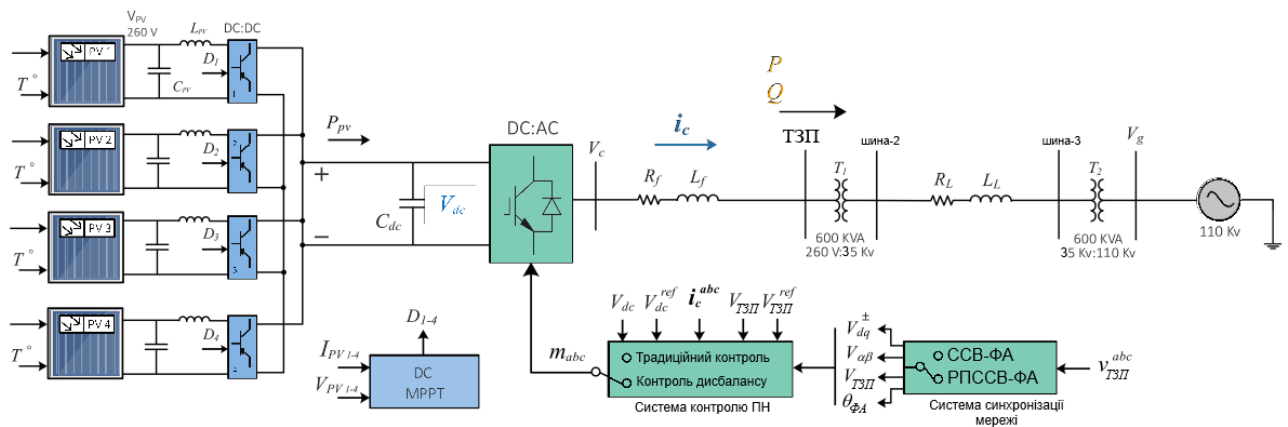


Рисунок 3.1 - Сонячна фотоелектрична система потужністю 400 кВт на випробувальному стенді ЕМП, підключена до трифазної мережі. ПН працює в різних системах управління ПН.

3.1.1 Випробувальний стенд 1: Звичайний контроль УВМ

По-перше, звичайне керування інвертором, реалізоване в dq-системі координат з ШІМ, показано на рис. 3.2.

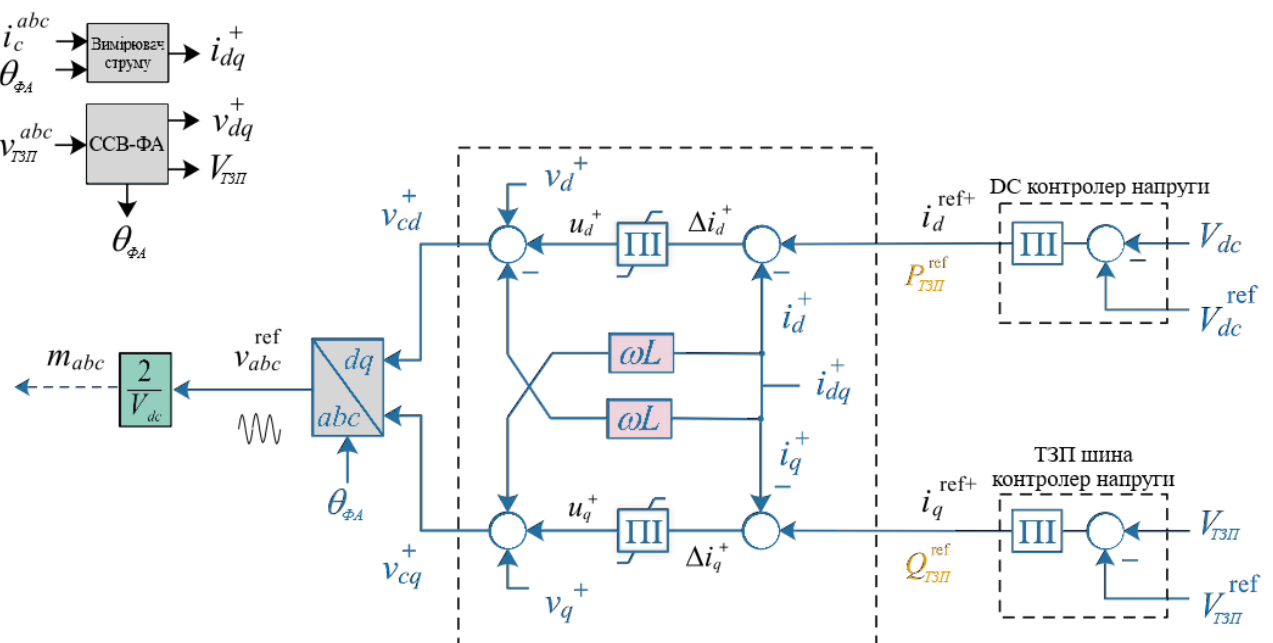


Рисунок 3.2 - Випробувальний стенд 1: звичайний блок структури управління ПН в системі, підключеній до електромережі.

Керування інвертором регулює напругу постійного струму та змінну напругу на шині ТЗП. Керування струмом по осі d генерується керуванням напругою ланки постійного струму тоді як порядок струму по осі q генерується

керуванням змінної напруги. Внутрішнє керування струмом реалізовано в dq-системі координат за допомогою ПІ-регулятора для відстеження порядку струму. Ця структура керування є добре відомою і була детально розглянута в класичній книзі з ПН,

3.1.2 Тестовий стенд 2: ПР-регулятор на основі контролю дисбалансу

Така структура керування дозволяє перетворювачу регулювати струми як позитивної, так і негативної послідовності в одному замкненому контурі. Реалізоване в даній роботі керування несиметрією УФМ представлено на рис. 3.3. Внутрішній контур струму разом із зовнішніми контурами регулює напруги ланки постійного струму та шини ТЗП, які забезпечують замовлення активної та реактивної потужності. Ці порядки використовуються для генерації матриці послідовності опорних струмів у (2.21). Потім опорні команди dq перетворюються в систему координат $\alpha\beta$. Таким чином, сума $i_{\alpha\beta}^{ref+}$ та $i_{\alpha\beta}^{ref-}$ дає комбіновані опорні команди ($i_{\alpha\beta}^{ref}$), які будуть реалізовані в єдиному внутрішньому циклі. ПР-регулятор, що базується на контролі дисбалансу, розглянуто в Розділі 2.

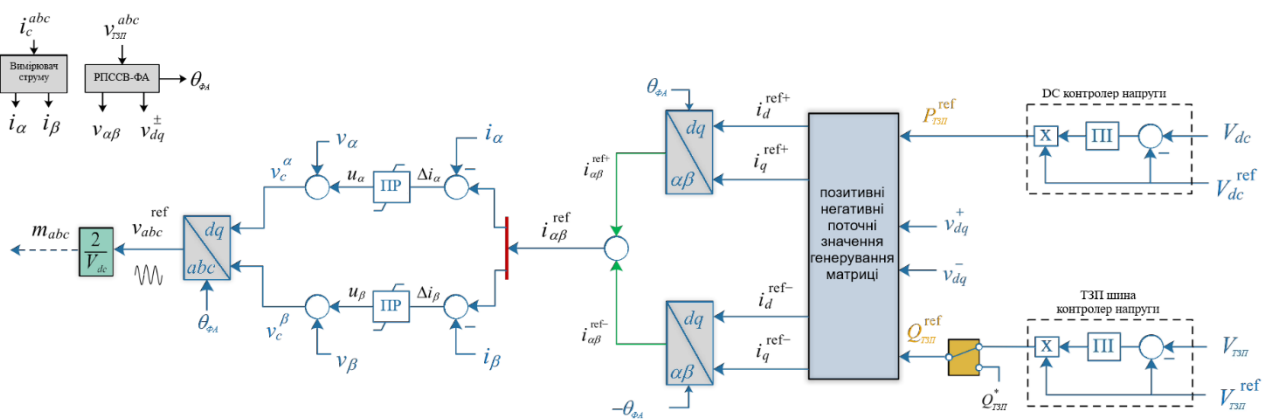


Рисунок 3.3 - Випробувальний стенд 2: структурний блок управління небалансом ПН в енергосистемі, підключеній до електромережі.

У цьому дослідженні використовуються дві схеми фазових петель (ФА), що пов'язано з потребами системи синхронізації енергосистеми. Кут зсуву фаз напруги мережі зазвичай визначається за допомогою звичайної синхронної системи відліку ФА (ССВ-ФА). Він зазвичай використовується разом зі

звичайним керуванням для збалансованих випадків. Однак, коли мережа розбалансована, цей ФА більше не може належним чином визначати кут через пульсації напруги на його вході. Таким чином, в якості альтернативи, розділений РССВ-ФА підходить для використання з контролем несиметрії. Цей тип ФА не тільки здатний точно витягувати фазовий кут, але й пульсації напруги на своєму вході

3.2 Дослідження та результати моделювання сонячних фотоелектричних систем

Продемонстровано два сценарії для оцінки динамічних характеристик сонячних фотоелектричних модулів потужністю 400 кВт за аномальних умов, якими є коротке замикання та падіння напруги в електромережі. На випробувальному стенді 1 використовується звичайний режим керування, а на випробувальному стенді 2 - режим керування небалансом. В обох стендах значення опорної напруги постійного струму (V_{dc}^{ref}) та опорної напруги змінного струму ($V_{T3П}^{ref}$) перед збуренням спочатку встановлюються на рівні 1 в.о. Для швидкого моделювання прийнято усереднену модель для ПН.

3.2.1 Ефективність сонячних фотоелектричних модулів під час короткого замикання

Коротке замикання подається на лінію електропередачі на 0,6 секунди протягом двох циклів. Розглянуто два випадки замикання: однолінійне замикання на землю (ОЗЗ) та багатолінійне замикання на землю (БЗЗ). Продемонстровано порівняння динамічних характеристик традиційного керування та керування несиметрією під час збурення. Результати показують часові характеристики трифазної напруги на шині-2, напруги постійного струму, миттєвої реальної потужності на шині ТЗП, величини напруги на шині ТЗП та частоти системи, виміряної блоком ФА. Компоненти симетричної послідовності, виміряні на шині ТЗП, потім аналізуються в часовій області для кожного випадку.

Випадок 1: Однолінійне замикання на землю. Через пошкодження лінії електропередачі ОЗЗ на рис. 3.4 представлено часові характеристики моделювання трифазної напруги на шині-2, напруги постійного струму, реальної потужності ТЗП, напруги на шині ТЗП та частоти системи, виміряної за допомогою блоку ФА.

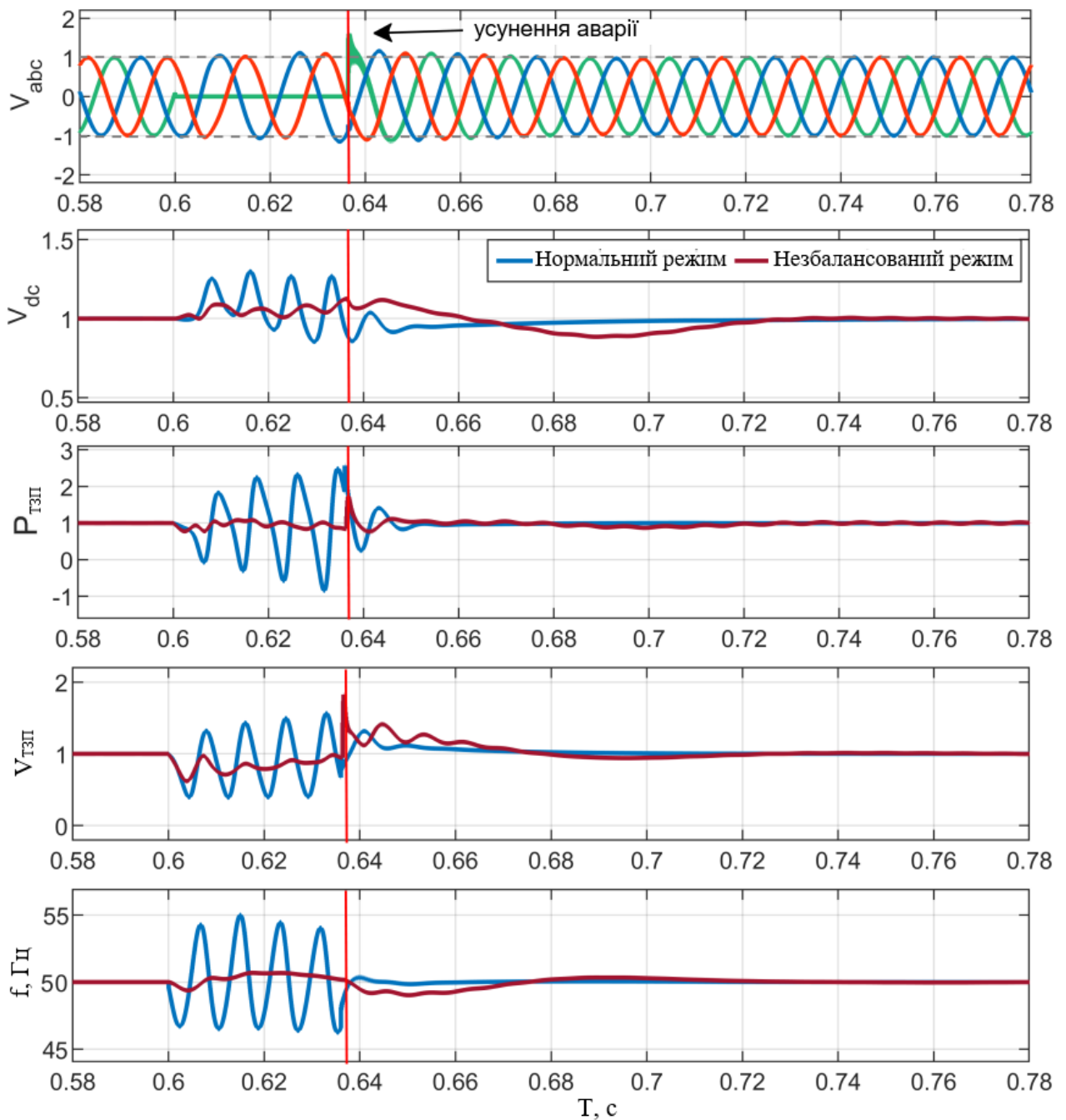


Рисунок 3.4 - Випадок 1: представлено часові характеристики моделювання трифазної напруги на шині-2, напруги постійного струму, реальної потужності ТЗП, напруги на шині ТЗП та частоти системи, виміряної за допомогою блоку ФА через пошкодження ОЗЗ на лінії електропередачі.

Видно, що високі перехідні процеси з'являються як в реальній потужності, так і в напрузі постійного струму, коли використовується традиційне керування (синя лінія). Однак очевидно, що контроль небалансу здатен згладити ці перехідні процеси, оскільки контролюються обидва струми послідовності (червона лінія). Це також покращує здатність передачі електроенергії і підтримує систему в тих самих робочих умовах.

Симетричні компоненти послідовності пошкоджених трифазних струмів аналізуються в часовій області, як показано на рис. 3.5. Ліва та права панелі показують струми та напруги позитивної та негативної послідовності, відповідно. Значення перевантаження за струмом на 1,1 в.о. вище номінального значення струму позитивної послідовності I_1 , що виникає під час несправності, коли перетворювач працює у звичайному режимі (синя лінія). Коли використовується режим небалансу, перевантаження за струмом значення I_1 зменшується до 0,7 в.о. (червона лінія). Також показано, що при звичайному регулюванні, коли I_1 не контролюється, струм I_1 має значення 1,1 в.о., тобто перевантаження по струму. На противагу цьому, перевантаження по струму I_1 знижується до 0,6 в.о., коли використовується регулювання небалансу. Подібні ефекти чітко проявляються і в компоненті напруги від'ємної послідовності.

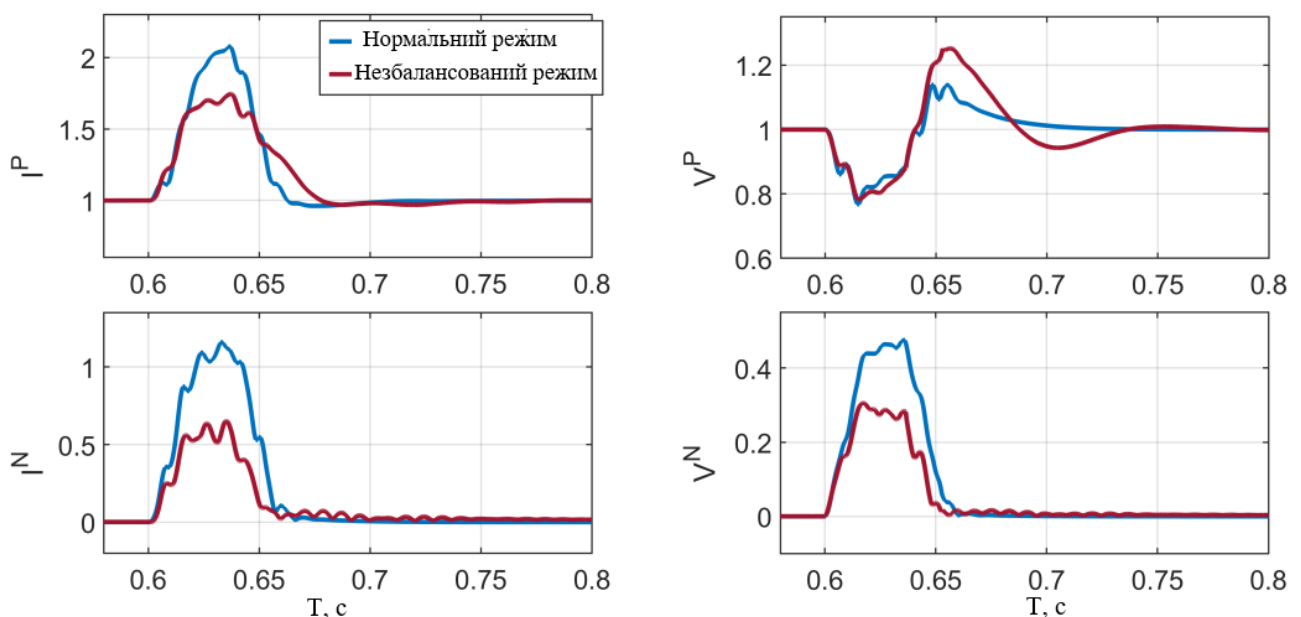


Рисунок 3.5 - Випадок 1: динамічні реакції симетричних послідовних складових струму та напруги внаслідок ОЗЗ. Струми (ліворуч), напруги (праворуч).

Випадок 2: багатолінійне замикання на землю. В результаті несправності БЗЗ реальна потужність і напруга постійного струму демонструють значні перехідні процеси, коли перетворювач працює в звичайному режимі керування. На противагу цьому, керування небалансом здатне мінімізувати перехідні, щоб покращити потужність. Рис. 3.6 ілюструє динамічні реакції моделювання трифазної напруги на шині-2, напруги в колі постійного струму, реальної потужності ТЗП, напруги на шині ТЗП та частоти системи, виміряної за допомогою схеми РПССВ- ФА через несправність БЗЗ на 0,6 секунди.

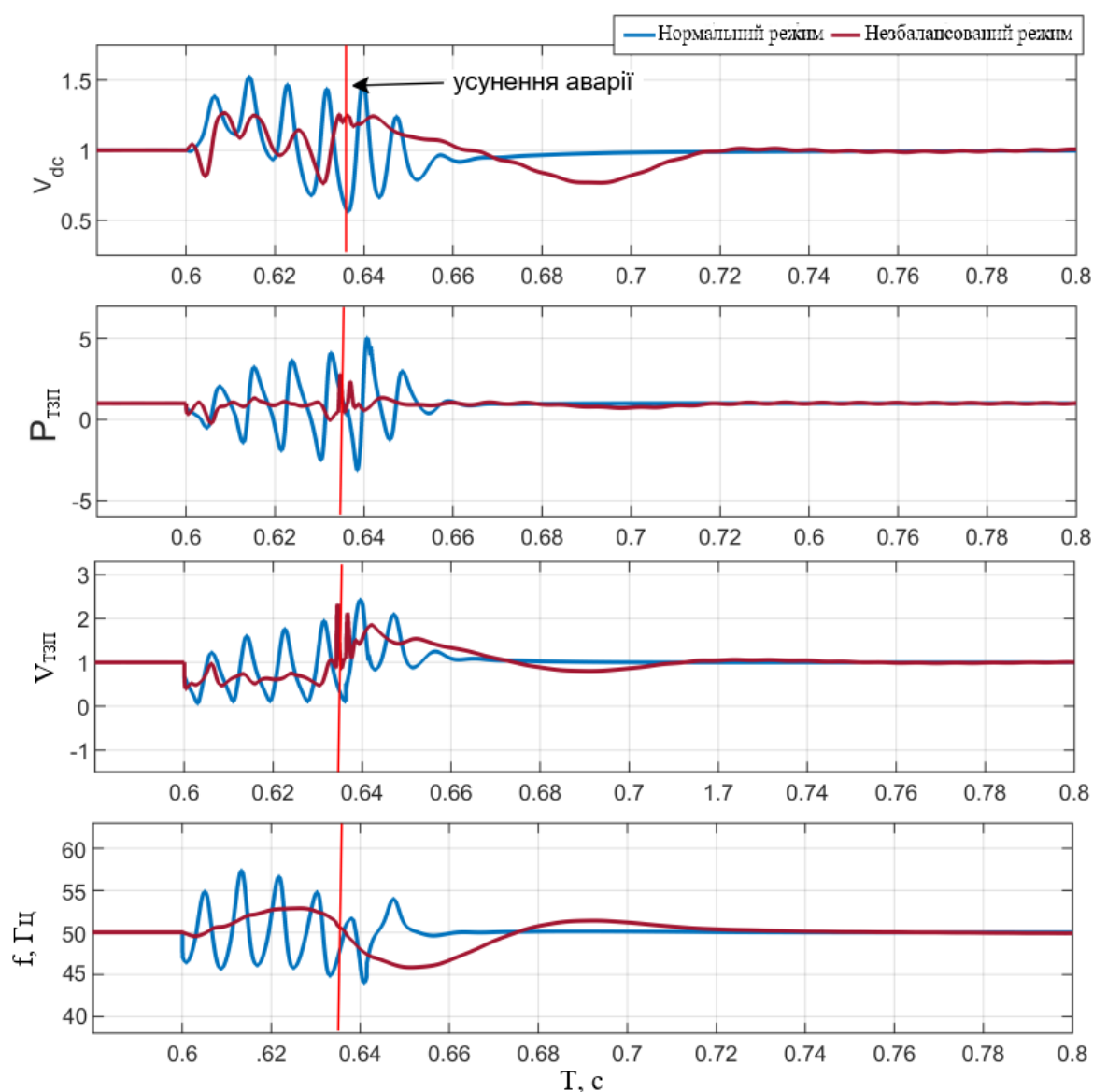


Рисунок 3.6 - Випадок 2: реакція моделювання трифазної напруги на шині-2, напруги в колі постійного струму, реальної потужності ТЗП, напруги на шині ТЗП та частоти системи, виміряної за допомогою схеми РПССВ- ФА через пошкодження БЗЗ на лінії електропередачі

Трифазні струми, виміряні на ТЗП-шині, проаналізовано шляхом отримання їх симетрії, як показано на рис. 3.7, під час виникнення несправності струм позитивної послідовності змінюється в залежності від часу, коли виникає несправність. Коли перетворювач працює у звичайному режимі, струм позитивної послідовності I^+ під час збурення має перевантаження до 3,2 в.о. вище номінального значення. Однак, коли використовується режим небалансу, значення перевантаження за струмом I^+ зменшується до 3,1 в.о.. Також показано, що струм від'ємної послідовності I^- досягає значення перевантаження 1,9 в.о. в режимі конвенційного керування, де I^- не регулюється. На противагу цьому, перевантаження за струмом I^- мінімізується до 1,5 в.о. при роботі перетворювача в режимі регулювання дисбалансу.

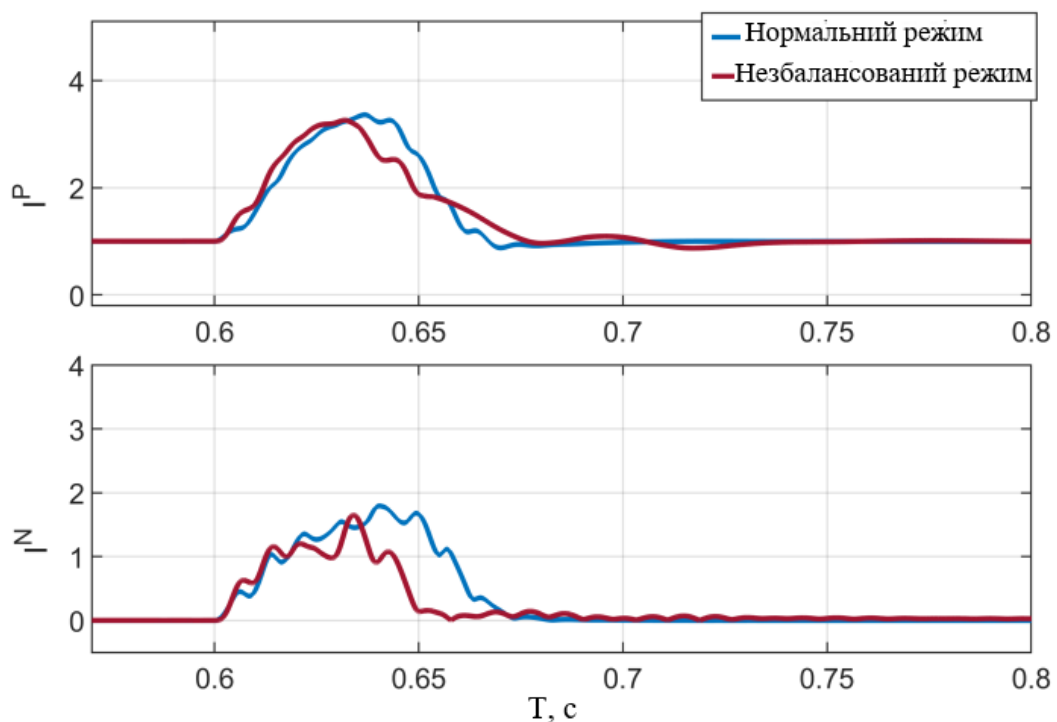


Рисунок 3.7 - Випадок 2: динамічні реакції компонентів струму симетричної послідовності через пошкодження БЗЗ.

Мережева сонячна фотоелектрична система може скористатися перевагами використання схеми контролю небалансу для регулювання мережевого перетворювача під час короткого замикання. Це показує, що таке вдосконалене керування може пом'якшити наслідки несправностей; отже, сонячна фотоелектрична система може працювати під час збурень.

3.3 Ефективність сонячних фотоелектричних модулів під час падіння напруги в мережі

Випадок 1: Однофазне падіння напруги. У цьому випадку аналізуються динамічні характеристики фотоелектричної системи потужністю 400 кВт при падінні напруги в мережі. V_g у фазі а падає до 0,7 в.о. за час від 0,6 секунди до 0,8 секунди. Спочатку на рис. 3.8 зверху вниз показано трифазну напругу на шині мережі, напругу в колі постійного струму, активну потужність ТЗП, напругу на шині ТЗП та частоту системи, виміряну блоком ФА.

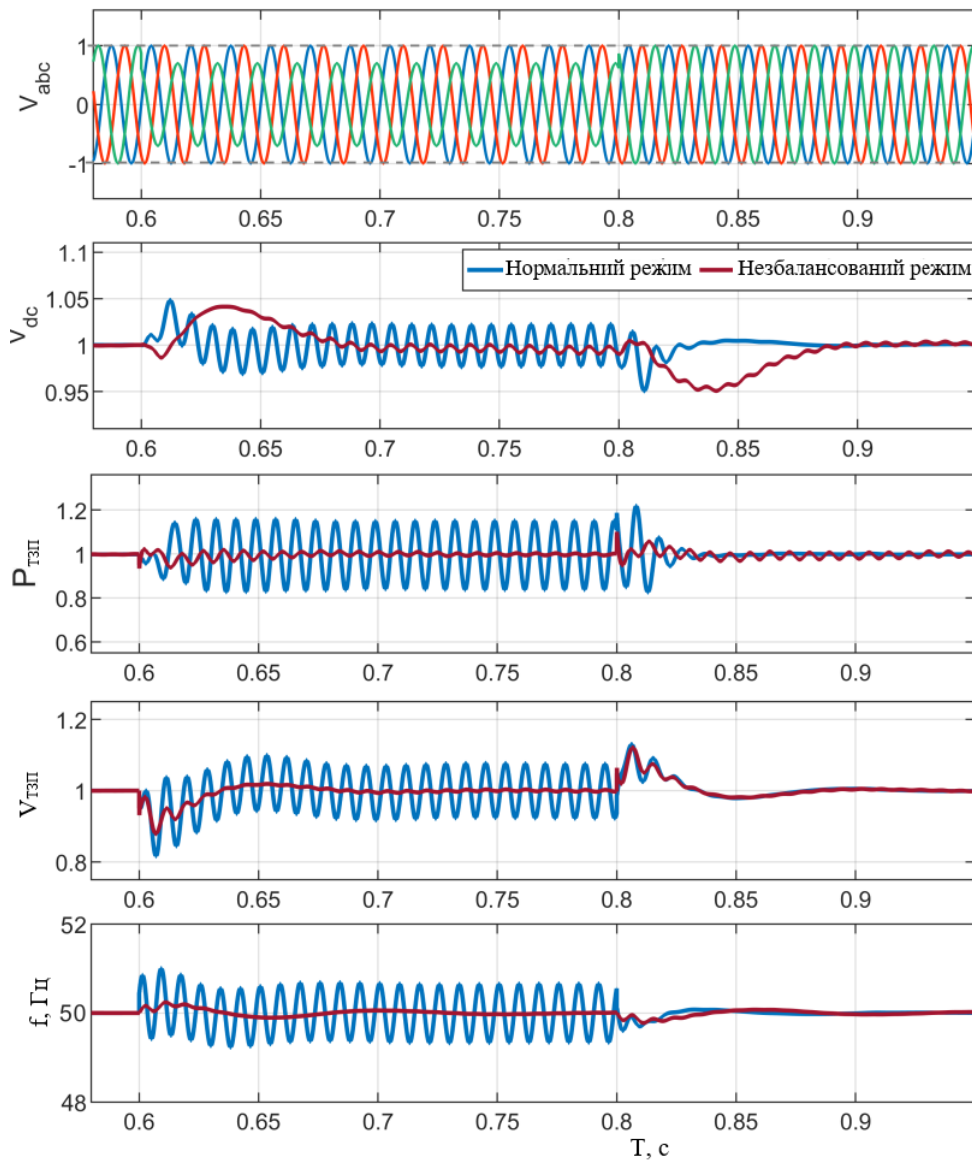


Рисунок 3.8 - Випадок 1: реакція системи на однофазне падіння напруги в часовій області: зверху вниз показано трифазну напругу на шині мережі, напругу в колі постійного струму, активну потужність ТЗП, напругу на шині ТЗП та частоту системи, виміряну блоком ФА

Очевидно, що звичайній схемі керування вистачає здатності компенсувати пульсації частоти 100 Гц реальної потужності та напруги постійного струму (синя лінія). На відміну від цього, коли система ПН працює в режимі регулювання небалансу, вона забезпечує стабільну роботу системи для видачі рівномірної реальної потужності в мережу за рахунок пом'якшення коливань частоти 100 Гц (червона лінія). Крім того, оскільки РПССВ-ФА працює разом з контролем небалансу, він здатний усунути пульсації змінної напруги та частоти системи.

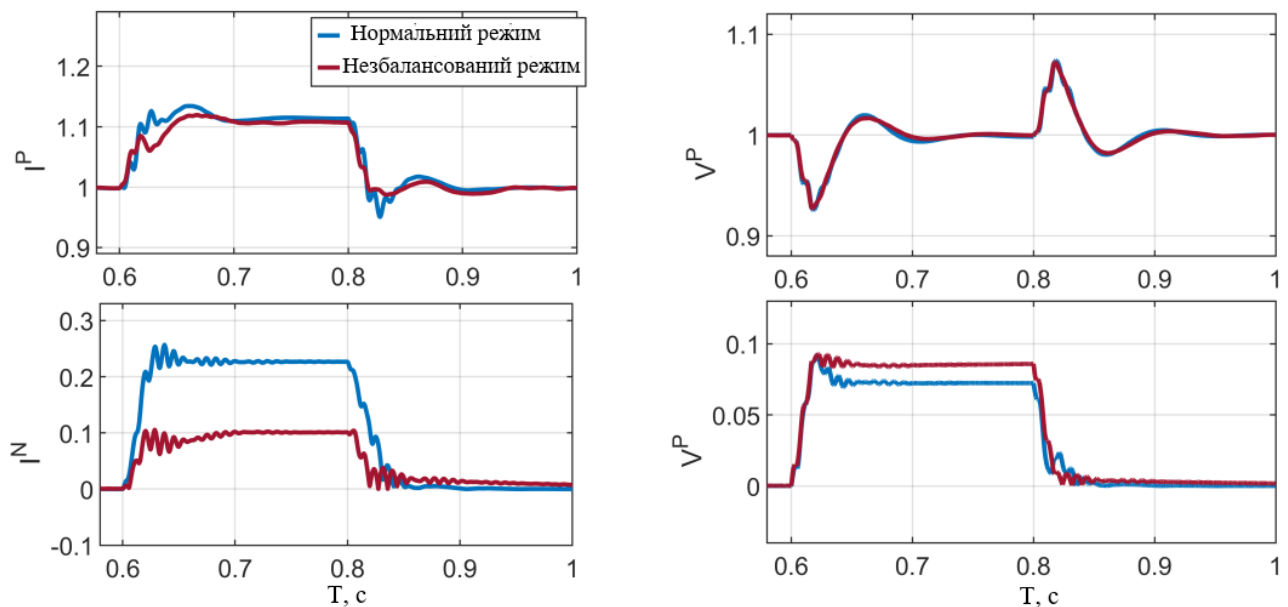


Рисунок 3.9 - Випадок 1: динамічні реакції компонентів струму та напруги симетричної послідовності на однофазне падіння напруги. Струми (ліворуч), напруги (праворуч)

По-друге, на рис. 3.9 показано часові характеристики струмів позитивної та негативної послідовності (I^+ , I^-) під час провалу напруги (ліва панель), а також напруг послідовності (V^+ , V^-) (права панель). Як звичайний, так і несиметричний регулятори вводять 1,11 в.о. I^+ для забезпечення номінальної реальної потужності. Однак, неконтрольований струм I^- встановлюється на рівні 0,21 в.о. в звичайному режимі (синя лінія), тоді як керований струм— обмежений на рівні 0,1 в.о. в режимі небалансу (червона лінія). Очевидно, що на вплив струму від'ємної послідовності впливають реальні пульсації потужності (P_{ripple}). Таким чином, прирівнявши P_{c2} і P_{s2} до нуля, можна

обмежити Γ^- . Оскільки змінна напруга регулюється на номінальному значенні (1 в.о.) як у звичайній схемі, так і в схемі регулювання небалансу, вони поведуться подібно до реакції на V^+ при попередньому збурення після збурення.

Режим регулювання відносно покращує динамічні характеристики сонячної фотоелектричної системи оскільки застосовується на одному внутрішньому контурі регулювання, причому одночасно з регулюванням постійної та змінної напруги.

Випадок 2: Двофазне падіння напруги. У цьому випадку напруга на шині мережі V_g у фазах а і b падає до 0,7 в.о. за час від 0,6 секунди до 0,8 секунди. Через збурення видно що звичайне керування не може усунути частотні пульсації реальної потужності та напруги постійного струму. На противагу цьому, завдяки контролю небалансу забезпечується стабільна системи, яка видає в мережу належну реальну потужність. Крім того, цей контроль може позбутися пульсацій 100 Гц в змінній напрузі та частоті системи, оскільки РПССВ-ФА працює разом з контролем небалансу. На рис. 3.10 зверху вниз показано напругу в колі постійного струму, активну потужність ТЗП, змінну напругу, виміряну на шині ТЗП, і частоту системи, виміряну за допомогою блоку ФА.

Крім того, на рис. 3.11 представлено часові характеристики струмів позитивної та негативної послідовності, тобто Γ^+ та Γ^- , виміряні на шині ТЗП, під час падіння напруги. Як звичайний регулятор, так і регулятор небалансу інжектують 1,38 в.о. струму позитивної послідовності, щоб забезпечити номінальну реальну потужність. Однак неконтрольований струм негативної послідовності встановлюється на рівні 0,22 в.о. в звичайному режимі, тоді як струм негативної послідовності обмежується на рівні 0,12 в.о. в режимі небалансу.

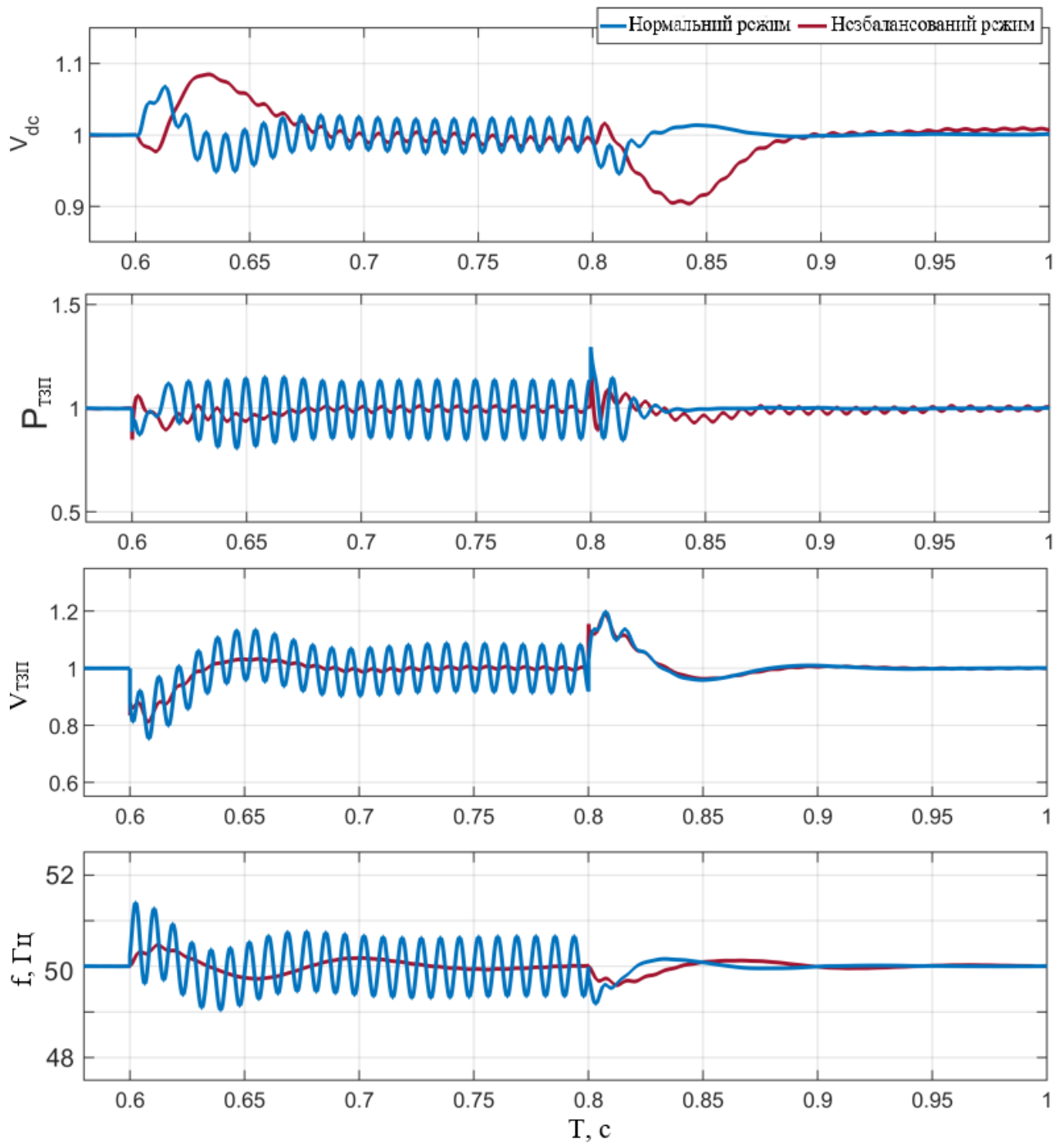


Рисунок 3.10 - Випадок 2: реакція системи на двофазне падіння напруги на шині мережі в часовій області моделювання: показано напругу в колі постійного струму, активну потужність ТЗП, змінну напругу, виміряну на шині ТЗП, і частоту системи, виміряну за допомогою блоку ФА

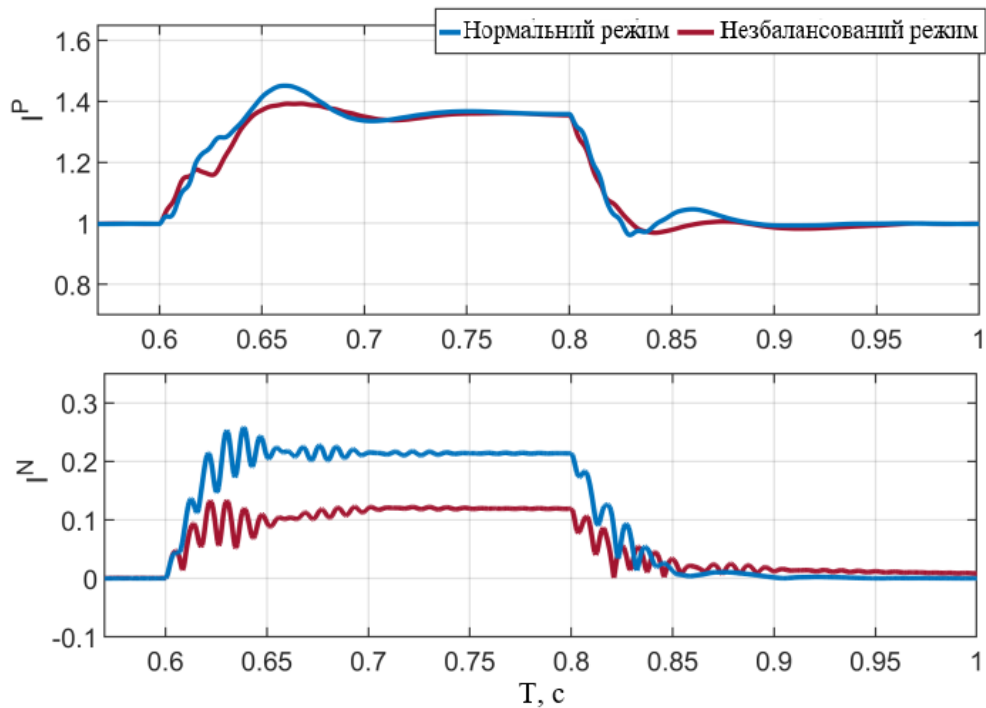


Рисунок 3.11 - Випадок 2: динамічні реакції компонентів струму та напруги симетричної послідовності на двофазне падіння напруги.

3.4 Висновки до розділу

У цьому розділі проаналізовано динамічні характеристики підключеної до мережі сонячної фотоелектричної системи, коли реалізовано керування несиметрією УВМ. На додаток до зменшення пульсацій реальної потужності та напруги постійного струму, керування застосовує регулювання напруги змінного та постійного струму разом із внутрішнім контуром струму. Ефект контролю дисбалансу демонструється шляхом порівняння його динамічних характеристик зі звичайним контролем УВМ. Сонячна фотоелектрична система досліджується під час різних сценаріїв несиметричних умов. По-перше, контроль небалансу покращує перехідні процеси в системі і зменшує перевантаження по струму, коли на лінії електропередачі виникає несправність ОЗЗ. Крім того, це спостереження було розглянуто при пошкодженні БЗЗ. По-друге, коли напруга в мережі зазнає однофазного або двофазного провалу, режим регулювання небалансу не тільки здатний погасити двочастотні пульсації потужності, але й зменшити величину струму негативної послідовності порівняно зі звичайним режимом регулювання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок

При дослідженні систем живлення електроустановки трансформаторних підстанцій оглядаються без зняття з них напруги, на віддалі від струмоведучих частин. Дефекти виявляються візуально – оглядом і на слух. Право одноособового огляду електроустановки має черговий із кваліфікаційною групою не нижче III або адміністративно-технічний працівник, що має V групу в установках напругою вище 1000 В і IV групу в електроустановках напругою нижче 1000 В.

При оглядах діючих електроустановок не можна проходити за огороження, знімати їх і входити в камери розподільних пристроїв, що не мають бар'єрів. При необхідності дозволяється працівникові з кваліфікаційною групою не нижче IV увійти за огороження, але за умови, що струмоведучі частини недоступні, тобто нижні фколі ізоляторів знаходяться від сталі на відстані більше 2 м, а необгороджені струмоведучі частини - на відстані більше 2,75 м при напрузі 35 кВ і 3,5 м при напрузі 110 кВ.

При менших відстанях входити за огороження можна тільки в присутності другої особи, що має кваліфікаційну групу не нижче III, і за умови, що струмоведучі частини знаходяться на відстані зазначеному в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Допустимі відстані від місця проведення робіт до струмоведучих частин у залежності від їх напруги

Номінальна напруга електроустановки, кВ	Допустима відстань, м
до 15	0,7
від 15 до 35	1,0
від 35 до 110	1,5
154	2
220	2,5
330	3,5
400 і 500	4,5

Вимкнення і зміни в електричних схемах РЕМ здійснюються тільки за розпорядженням або з відома чергового персоналу, у керуванні або підпорядкуванні якого знаходиться устаткування. При пожежах, нещасних випадках або при стихійних лихах негайно потрібно вимикати електроустаткування без узгодження, з послідуєчим записом у оперативному журналі.

Розпорядження вважається виконаним після того, як черговий повідомить особисто або телефоном черговому диспетчерові енергосистеми мереженого району, черговому інженерові, тобто особі, що дала розпорядження. Керуватися показами приладів та повідомленнями осіб не оперативного персоналу про виконання розпорядження не можна.

Особа, що віддає розпорядження про переключення, обов'язково перевіряє послідовність операцій за оперативною схемою. Черговий, який отримав розпорядження, зобов'язаний повторити його і записати в оперативний журнал.

За оперативною схемою або макетові цей черговий намічає порядок операції. Якщо переключення виконують дві особи, то перша особа є старшою, роз'ясняє другій (виконавцю) завдання і послідовність його виконання.

В електроустановках напругою вище 1000 В, не обладнаних повністю блокованими від неправильних операцій роз'єднувачів, складні переключення проводяться за бланками. В бланку переключень виконується запис усіх операцій про увімкнення і вимкнення електрообладнання точно у тій послідовності, у якій ці операції повинні виконуватись.

Прості переключення на одному електричному приєднанні і переключення в електроустановках повністю обладнаних блокуванням роз'єднувачів від неправильної операції, можуть виконуватися без бланків.

Бюла переключень заповнює і підписує черговий який є безпосереднім виконавцем. Старший черговий контролюючий виконання операцій, перевіряє бланк і також його підписує. Старший черговий зачитує зміст операції виконавець повторює прочитане і приступає до виконання. Старший контролює дії виконавця і відразу відзначає в бланку виконання операції. При сумніві в

правильності операцій робота припиняється до в'яснення правильного порядку переключень. Якщо черговий робить переключення одноосібно, то він зачитує послідовність операцій вказаних у бланку телефоном старшому черговому який віддав розпорядження. Цей черговий є контролюючою особою.

Дозвіл на переключення виконавець зобов'язаний одержати телефоном безпосередньо перед їх виконанням. Приєднання вмикають або вимикають з допомогою вимикачів.

Якщо роз'єднувач має ручний привід, то операції з ним виконують в діелектричних рукавицях з ізолюваною основою. Вимикати і вмикати потрібно швидко, рішуче і до упора. Увімкнення і вимкнення роз'єднувачів виконується, як правило без навантаження. Роз'єднувачами допускається розмикати струми замикання на землю і зарядні струми повітряних і кабельних ліній не вище наведених в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Залежність струму замикання на землю і зарядного струму від напруги

Напруга, kV	Струм замикання на землю, A	Зарядний струм на фазу, A
3 – 6	7,5	2,5
10 – 20	3,0	1,0
35	1,5	0,5

Дозволяється вимикати навантажувальний струм лінії до $I \leq 15 A$ при напрузі $U \leq 10 kV$.

Роз'єднувачі необхідно вмикати ривком. Якщо при цьому виникає дуга, то ножі необхідно довести до кінця. У протилежному випадку зворотний хід ножа викличе виникнення дуги й нещасний випадок. Вимикати роз'єднувачі треба, навпаки, повільно, особливо в початковий момент. Якщо з'явиться дуга при відході ножів від губок, то роз'єднувач необхідно увімкнути назад.

Роз'єднувачі відключають (включають) у діелектричних рукавицях. Роз'єднувачі з пофазним керуванням і з вертикальним розташуванням – у діелектричних рукавицях, з використанням ізолюючих штанг і стоячи на

ізолюючій підставці. Старшим може бути черговий, що має не меншу ніж IV кваліфікаційну групу. Прості перемикання на одному електричному приєднанні дозволяється виконувати оперативному персоналу, що має не нижче ніж IV кваліфікаційну групу, одноосібно.

Перевіряти відсутність напруги, накладати й знімати переносні заземлення дозволяється не менш ніж двом виконавцям.

В установках напругою до 1000 В апаратуру перемикає один працівник, що має III кваліфікаційну групу, якщо він черговий, IV кваліфікаційну групу, якщо він не є черговим.

Персонал, що виконує перемикання, повинен твердо знати, що у випадку зникнення напруги воно може бути подане знову без попередження як в умовах нормальної експлуатації, так і при аваріях.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1 Захист електротехнічних систем та електронної апаратури від пошкоджень, які викликані електромагнітним імпульсом ядерного вибуху

Створення напівпровідникових приладів, а потім і інтегральних схем, особливо пристроїв цифрової техніки на їх основі, і широке впровадження засобів в радіоелектронну військову апаратуру примусили військових фахівців з іншого оцінити загрозу ЕМІ. З 1970 року питання захисту зброї і військової техніки від ЕМІ стали розглядатися міністерством оборони США як що мають вищу пріоритетність.

Механізм генерації ЕМІ полягає в наступному. При ядерному вибуху виникають гамма і рентгенівське випромінювання і утвориться потік нейтронів. Гамма-випромінювання, взаємодіючи з молекулами атмосферних газів, вибиває з них так звані комптонівські електрони. Якщо вибух здійснюється на висоті 20-40 км., То ці електрони захоплюються магнітним полем Землі і, обертаючись відносно силових ліній цього поля створюють струми, що генерують ЕМІ. При цьому поля ЕМІ когерентно підсумовуються у напрямі до земної поверхні, тобто магнітне поле Землі виконує роль, подібну фазованою антеною грат. В

результаті цього різко збільшується напруженість поля, а отже, і амплітуда ЕМІ в районах південніше і на північ від епіцентру вибуху. Тривалість даного процесу з моменту вибуху від 1 - 3 до 100 *нс*.

На наступній стадії, що триває приблизно від 1 *мкс* до 1 *з*, ЕМІ створюється комптонівськими електронами, вибитими з молекул багато разів відображеним гамма-випромінюванням і за рахунок непружного зіткнення цих електронів з потоком що випускаються при вибуху нейтронів. Інтенсивність ЕМІ при цьому виявляється приблизно на три порядки нижче, ніж на першій стадії.

На кінцевій стадії, що займає період часу після вибуху від 1 *з* до декількох хвилин, ЕМІ генерується магнітогідродинамічним ефектом, породжуваним збуреннями магнітного поля Землі струмопровідних вогняною кулею вибуху. Інтенсивність ЕМІ на цій стадії вельми мала і становить декілька десятків вольт на кілометр.

Найбільшу небезпеку для радіоелектронних засобів представляє перша стадія генерування ЕМІ, на якій відповідно до закону електромагнітної індукції через надзвичайно швидкого наростання амплітуди імпульсу (максимум досягається на 3 - 5 *нс* після вибуху) наведеної напруга може досягати десятків кіловольт на метр на рівні земної поверхні, плавно знижуючись в міру віддалення від епіцентру вибуху.

Амплітуда напруги, що наводяться ЕМІ в провідниках, пропорційна довжині провідника, що перебуває в його полі, і залежить від його орієнтації щодо вектора напруженості електричного поля.

Так, напруженість поля ЕМІ в високовольтних лініях електропередачі може досягати 50 *кВ/м*, що призведе до появи в них струмів силою до 12 *тис.А*.

ЕМІ генеруються і при інших видах ядерних вибухів - повітряному і наземному. Теоретично встановлено, що в цих випадках його інтенсивність залежить від ступеня асиметричності просторових параметрів вибуху. Тому повітряний вибух з точки зору генерації ЕМІ найменш ефективний. ЕМІ наземного вибуху буде мати високу інтенсивність, проте вона швидко зменшується в міру віддалення від епіцентру.

Ідеальною захистом від ЕМВ стало б повне укриття приміщення, в якому розміщена радіоелектронна апаратура, металевий екран.

Разом з тим ясно, що практично забезпечити такий захист у ряді випадків неможливо, тому що для роботи апаратури часто потрібно забезпечити її електричну зв'язок із зовнішніми пристроями. Тому використовуються менш надійні засоби захисту, такі, як струмопровідні мережі або плівкові покриття для вікон, стільникові металеві конструкції для повітрозабірників і вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, які розміщуються по периметру дверей і люків.

Більш складною технічною проблемою вважається захист від проникнення ЕМІ в апаратуру через різні кабельні вводи. Радикальним вирішенням цієї проблеми міг би стати перехід від електричних мереж зв'язку до практично не схильним до дії ЕМІ волоконно-оптичних. Однак заміна напівпровідникових приладів у всьому спектрі виконуваних ними функцій електронно-оптичними пристроями можливо тільки у віддаленому майбутньому. Тому в даний час засобів захисту кабельних вводів найбільш широко використовуються фільтри, в тому числі волоконні, а також іскрові розрядники, металлоокисні варистори і високошвидкісні зенеревські діоди.

Найбільш раціональним підходом до проектування засобів захисту від ЕМІ кабельних вводів є створення таких роз'ємів, в конструкції яких передбачені спеціальні заходи, що забезпечують формування елементів фільтрів і встановлення вбудованих зенеревських діодів. Подібне рішення сприяє отриманню дуже малих значень ємності та індуктивності, що необхідно для забезпечення захисту від імпульсів, які мають незначну тривалість і, отже, потужну високочастотну складову. Використання роз'ємів подібної конструкції дозволить вирішити проблему обмеженою масо-габаритних характеристик пристрою захисту.

Складність вирішення завдання захисту від ЕМІ і висока вартість розроблених для цих цілей коштів і методів змушують піти на перших парах по шляху їх вибіркового застосування в особливо важливих системах зброї і військової техніки. Першими цілеспрямованими роботами в цьому напрямку

були програми захисту від ЕМІ стратегічної зброї. Такий самий шлях обраний і для захисту мають велику протяжність систем керування та зв'язку. Проте основним методом вирішення даної проблеми зарубіжні фахівці вважають створений так званих розподілених мереж зв'язку (типу "Гвен"), перші елементи яких вже розгорнуто на континентальній частині США.

Сучасний стан проблеми ЕМІ можна оцінити таким чином. Досить добре досліджені теоретично і підтверджено експериментально механізми генерації ЕМІ і параметри його вражаючої дії. Розроблено стандарти захищеності апаратури і відомі ефективні засоби захисту. Однак для досягнення достатньої впевненості в надійності захисту систем і засобів від ЕМІ необхідно провести випробування за допомогою імітатора. Що стосується повномасштабних випробувань систем зв'язку та керування, то це завдання навряд чи буде вирішена в доступному для огляду майбутньому.

Потужний ЕМІ можна створити не тільки в результаті ядерного вибуху.

Сучасні досягнення в області неядерних генераторів ЕМІ дозволяють зробити їх достатньо компактними для використання з звичайними і високоточними засобами доставки.

В даний час у деяких західних країнах ведуться роботи по генерації імпульсів електромагнітного випромінювання магнітодинамічними пристроями, а також високовольтними розрядами. Тому питання захищеності від впливу ЕМІ будуть залишатися в центрі уваги фахівців при будь-якому результаті переговорів про ядерне роззброєння.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

З проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

Представлено та обговорено огляд трьох різних механізмів керування ПН, що працюють у ЕМ: звичайний гібридний режим із слідуванням за мережею, звичайний автономний режим з формуванням мережі, та підтримання мережі. Їхні конфігурації керування класифіковано на основі ролі ПН у роботі ЕМ. Представлено, порівняння цих способів керування, побудованих у середовищі MATLAB/Simscapе. Розглянуто результати моделювання переходу від однієї до іншої.

Розроблено два типи методів контролю небалансу в мережевому сонячному фотоелектричному інверторі, щоб не тільки регулювати напругу постійного струму і змінну напругу, але і пом'якшити подвійні частотні пульсації в загальній потужності, що подається в мережу, а також пульсації в колі постійного струму. У першій схемі використовуються подвійні внутрішні контури в системі dq разом із зовнішніми контурами. У другій схемі разом із зовнішніми контурами використовується один внутрішній контур у стаціонарній системі. В обох схемах регулюються додатні та від'ємні струми на додаток до регулювання постійної та змінної напруги. Для перевірки переваг керування несиметрією було проведено два імітаційних експерименти з ЕМП за допомогою пакету MATLAB/Simscapе.

Проаналізовано динамічні характеристики підключеної до мережі сонячної фотоелектричної системи, коли реалізовано керування несиметрією з управлінням з відстеженням мережі. На додаток до зменшення пульсацій реальної потужності та напруги постійного струму, керування застосовує регулювання напруги змінного та постійного струму разом із внутрішнім контуром струму. Ефект контролю дисбалансу демонструється шляхом порівняння його динамічних характеристик зі звичайним контролем керування з відстеженням мережі. Сонячна фотоелектрична система досліджувалася під час різних сценаріїв несиметричних умов. По-перше, контроль небалансу покращує перехідні процеси в системі і зменшує перевантаження по струму, коли на лінії електропередачі виникає несправність

однофазного замикання на землю (ОЗЗ). Крім того, це спостереження було розглянуто при пошкодженні багатофазного замикання на землю (БЗЗ). По-друге, коли напруга в мережі зазнає однофазного або двофазного провалу, режим регулювання небалансу не тільки здатний погасити двочастотні пульсації потужності, але й зменшити величину струму негативної послідовності порівняно зі звичайним режимом регулювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," IEEE transactions on power electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, 2004..
2. L. Fan, Control and dynamics in power systems and microgrids. CRC Press, 2017
3. A. Yazdani and R. Iravani, Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications. John Wiley & Sons, 2010.
4. M. J. Erickson, T. Jahns, and R. H. Lasseter, "Comparison of pv inverter controller configurations for certs microgrid applications," in 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2011, pp. 659–666.
5. T G. Kou, L. Chen, P. VanSant, F. Velez-Cedeno, and Y. Liu, "Fault characteristics of distributed solar generation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 2, pp. 1062–1064, 2019
6. Andriychuk, V., Filiuk, Y. (2017). Research of energy potential of solar radiation in Ternopil. Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, (1), 85.
7. Верешко, В. Ю., Філюк, Я. О. (2021). Вплив мережевого інвертора на ефективність перетворення струму, що генерується фотоелектричною системою. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 19-19.
8. Колівошко, А. М., Соловко, Д. Ю., Філюк, Я. О. (2023). Електрична мережа з розподіленими відновлювальними джерелами енергії. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 262-262.
9. Буняк, О. А., Микулик, П. М. (2003). Дослідження інтегральних показників електроенергії за спектральними параметрами напруги електропостачання. Харків: "Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства", 70-75.

10. Microprocessor Control of the Electric Drive of Variable Radiation Installation and Ensuring of Operation Reliability // Andriychuk V., Kostyk, L., Filiuk Ya., Nakonechnyi M., Babiuk S. (2024). Science and Innovation, 2024. 20(5). Pp.62–70. ISSN 2409-9066.
11. Плешевський, В. В., Ухач, І. І., Філюк, Я. О. (2024). Використання альтернативні джерела енергії для побутових споживачів. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 281-281.
12. Сигіль, В. Д., Колодій, А. В., & Філюк, Я. О. (2025). Вплив мережевого сонячного фотоелектричного інвертора на енергосистему. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 58-58.
13. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
14. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.