

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

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**РОЗРОБКА ФІЛЬТРУ ГАРМОНІК ДЛЯ
МЕРЕЖЕВОГО СОНЯЧНОГО ІНВЕРТОРА**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-41
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Балабан К.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

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

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

Рецензент Козбур І.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

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)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)
« » 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Балабану Костянтину Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка фільтру гармонік для мережевого сонячного інвертора

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «22» січня 2024 року № 4/7-50.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 15.06.2024

3. Вихідні дані до роботи При зміні генерованої потужності фотоелектричною станцією інвертор генерує в мережу високочастотні гармоніки. Розрахувати LCL-фільтр гармонік який зможе їх згладити

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Типи інверторів

2. Вимоги до вихідного фільтру інвертора

3. Проектування LCL-фільтра

4. Імітаційна модель трифазної мережевої сонячної електростанції

5. Продуктивність системи при ступінчастій зміні активної та реактивної потужності

6. Висновки

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

1. Топології інверторів.

2. LC-фільтр і LCL-фільтр

3. Блок-схема трифазної фотоелектричної системи, підключеної до мережі

4. Трифазна мережева сонячна електростанція потужністю 210 кВт

5. Вихідна напруга трифазного MOSFET інвертора

6. Напруга та струм з LCL фільтром

7. Швидкий аналіз Фур'є після фільтра

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 25.01.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 19.04.2024 по 25.04.2024	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 25.04.2024 по 21.05.2024	
3	Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	з 21.05.2024 по 23.05.2024	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 23.05.2024 по 24.05.2024	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 24.05.2024 по 28.05.2024	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 28.05.2024 по 01.06.2024	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 01.06.2024 по 15.06.2024	

Студент _____
(підпис)

Балабан К.С.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Коваль В.П.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 62 сторінки, _ аркушів презентації, 33 ілюстрацій, 6 таблиць та 18 використаних першоджерел.

Метою кваліфікаційної роботи є: розрахувати LCL-фільтр гармонік для мережевого сонячного інвертора та провести імітаційне моделювання його роботи.

У роботі проведено огляд відновлюваних джерел енергії, розглянуто фотоелектричну систему в цілому та схему фільтра, наведено математичний опис і всі пов'язані з ним рівняння кожного і всіх компонентів трифазного MOSFET-інвертора, таких як фотоелектричний перетворювач, буст-перетворювач, LCL-фільтр. Проаналізовано вплив LCL-фільтра на мережеву систему. Розроблена раніше модель була реалізована в MATLAB/Simulink. Змодельована фотоелектрична система потужністю 210 кВт з інвертором MOSFET, який постачає електроенергію в мережу. Після встановлення LCL-фільтра як пульсації, так і загальні гармонійні спотворення значно зменшилися. Оскільки напруга і струм мережі були синфазними, це свідчить про те, що система працювала коректно. Використання запропонованого LCL-фільтра обмежило гармоніки нижче 2 %.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ІНВЕРТОР, ГАРМОНІКИ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Відновлювальна енергетика.....	8
1.2 Підключення фотоелектричної системи на основі інвертора до мережі.....	9
1.3 Типи інверторів	10
1.4 Конфігурація мережевих інверторів	11
1.4.1 Централізована топологія.....	11
1.4.2 Стрінгова топологія	12
1.4.3 Багатострінгова топологія.....	12
1.4.4 Модульна топологія	13
1.5 Якість електроенергії.....	14
1.6 Фільтрація гармонік.....	15
1.7 Вимоги до вихідного фільтру	16
1.8 LC-фільтр	17
1.9 Висновки до розділу	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1 Опис системи	19
2.2 Проектування LCL-фільтра.....	19
2.2.1 Процес проектування.....	19
2.2.2 Проектування та розрахунок трифазного MOSFET інвертора.....	23
2.2.3 Синхронізація мережі з використанням методу PLL	25
2.2.4 Проектування синхронного опорного ФНЧ.....	26
2.3 Керування фотоелектричною мережею з прив'язкою до мережі	27
2.3.1 Відстеження точки максимальної потужності.....	27
2.3.2 Технологія керування в інверторах.....	28

2.4 Трифазне підключеного інвертора	31
2.4.1 Теоретична модель регулятора струму	31
2.4.2 Розробка схеми керування на основі ПІ-регулятора	34
2.5 Висновки до розділу	37
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	38
3.1 Імітаційна модель трифазної мережевої сонячної електростанції	38
3.2 Вихідний струм і напруга інвертора	42
3.3 Напруга і струм після фільтра	44
3.4 Напруга та струм мережі	44
3.5 Активна потужність, що подається в мережу	46
3.6 Реактивна потужність	47
3.7 Продуктивність системи при ступінчастій зміні активної та реактивної потужності	47
3.8 Реактивна потужність після ступінчастої зміни I_q	48
3.9 Висновки до розділу	51
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В	52
4.2 Інструктажі з охорони праці	54
4.3 Зонування територій за ступенем небезпеки	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	60

ВСТУП

Актуальність теми.

Фотоелектричні системи знаходяться на траєкторії зростання, яка, як очікується, продовжиться в найближчі роки. Ефективність, стійкість та надійність електромереж покращуються зі зростанням рівня проникнення відновлюваної енергетики, що стало можливим завдяки розвитку технології «розумних мереж». Фотоелектричні системи є одним з найважливіших джерел енергії завдяки тому, що це постійно доступне та економічно ефективне джерело енергії. Наявність «розумних» мереж відкриє нові можливості для виробництва сонячної енергії. Інвертор є основним компонентом фотоелектричної системи, оскільки він перетворює постійний струм в змінний. Існує три основні типи фотоелектричних інверторів: дахові сонячні фотоелектричні станції, мережеві фотоелектричні станції та інвертори з резервним живленням від акумулятора. Мережеві інвертори підключаються через силові електронні інвертори. Силове електронне з'єднання генерує гармоніки. Для досягнення прийняттого рівня якості електроенергії між інвертором та мережею необхідний фільтр. Фільтр використовується для мінімізації гармонійних струмів, але можуть з'явитися деякі труднощі з керуванням. І це призводить до проблем безпеки в рамках системи управління та резонансної частоти між інвертором та мережею. Деякі з ключових наслідків впливу гармонік напруги та струмів на різні компоненти мережі: зниження якості структури, надлишкова напруга та струм в результаті паралельної та компонуваної реверберації руйнуються, що призводить до скорочення терміну служби компонентів. Силові електронні пристрої, що використовуються в перетворювачах фотоелектричних систем, спричиняють проблеми з гармоніками. Сонячне випромінювання, інвертор і температура є ключовими елементами продуктивності фотоелектричної системи, і ці елементи впливають на профіль струму і потужність, що генерується. У цьому

дослідженні ми маємо на меті розробити модифіковану модель фільтра, яка може покращити роботу фотоелектричної системи.

Підключення фотоелектричних систем до мережі з силовим електронним інтерфейсом викликає деякі проблеми з якістю електроенергії. В ідеальних умовах фотоелектрична система повинна працювати без будь-яких проблем відносно її силового електронного інтерфейсу. Однак через ці компоненти силової електроніки генеруються гармоніки, які суттєво впливають на якість електроенергії. Ефект гармонік, що спотворюють напругу живлення, впливатиме на роботу побутових приладів. У відповідь на цю проблему в даній роботі досліджується конструкція фільтра для більш надійної та ефективної роботи фотоелектричних систем.

Мета і завдання роботи. Метою даної роботи є: розрахувати LCL-фільтр гармонік для мережевого сонячного інвертора та провести імітаційне моделювання його роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Вивчення літературних джерел щодо електричних компонентів фотоелектричної системи та LCL-фільтра інвертора.
2. Представити математичний опис і всі пов'язані з ним рівняння кожного і всіх компонентів трифазного MOSFET-інвертора.
3. Розрахувати параметри LCL-фільтра і провести аналіз його роботи.
4. Шляхом імітаційного моделювання, проаналізувати вплив ступінчастої зміни потужності на роботу LCL-фільтра.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (19 найменувань). Загальний обсяг текстової частини – 62 сторінки, 6 таблиць, 33 рисунки.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

2.4 Відновлювальна енергетика

Протягом багатьох років традиційні джерела енергії довели свій ефективний потенціал для стимулювання економічного прогресу. Однак у 2012 році через швидке вичерпання традиційних джерел енергії та зростаючий попит на них зросла потреба в первинних джерелах енергії. Оскільки первинні джерела енергії значно впливають на навколишнє середовище, багато пов'язаних з ними організацій активно підтримують дослідження, спрямовані на розробку чистіших установок. Насправді, ціни на всі поновлювані джерела енергії поступово знижуються, а монетарні механізми і механізми покриття, які мають сприяти значному поширенню стійких ринків для систем поновлюваних джерел енергії, швидко розвиваються. Очевидно, що майбутнє енергетики буде орієнтоване на відновлювану енергетику. Отже, перехід на відновлювану енергетику буде вигідним завдяки зменшенню викидів газу, а також забезпечить надійне, своєчасне та економічно ефективне постачання енергії. Енергетична безпека може бути забезпечена за допомогою відновлюваної енергетики.

Відновлювана енергія – це, як правило, теоретично невичерпне джерело енергії, таке як вітер [1,2], сонце [3-10] і вода (гідроенергія) [11]. Розвиток добре відпрацьованих технологій, таких як гідроенергетика, а також технологій, що розвиваються, таких як вітрова та сонячна енергетика, швидко поширюється. Це викликало інтерес і відкрило нові можливості, як показано на рис. 1.1, де наведено огляд деяких відновлювальних джерел.

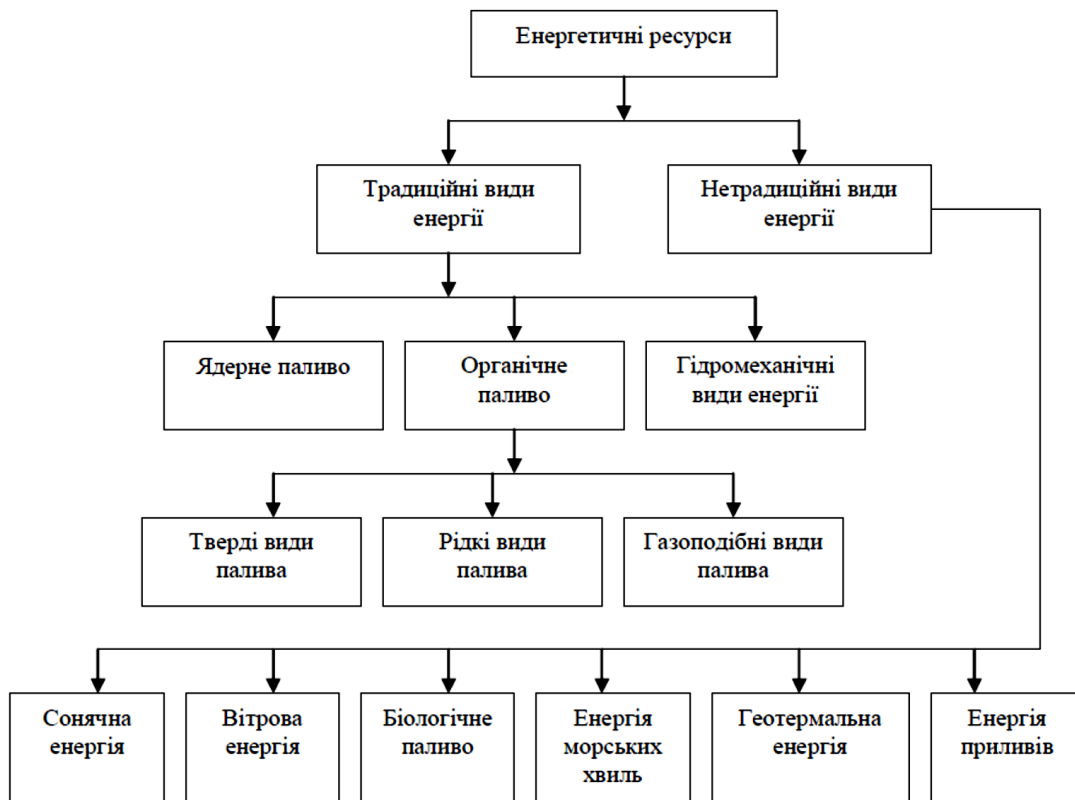


Рисунок 1.1 – Первинні джерела енергії

1.2 Підключення фотоелектричної системи на основі інвертора до мережі

Звичайна сонячна панель дозволяє фотонам і частинкам світла вибивати електрони з атомів і, таким чином, генерувати певний потік енергії. Це означає, що фотоелектричні елементи мають здатність перетворювати енергію сонячного світла в електрику, особливо в постійний струм. Дослідження показали, що загальна кількість енергії, яка надходить на поверхню землі у вигляді сонячного світла, приблизно в 10000 разів перевищує світові потреби в енергії.

Мережеві інвертори мають різні схеми підключення, вони можуть використовуватися в для підключення навантаження до електромережі, як показано на рис.1.2. Висока ефективність та низька вартість є найбільшою перевагою мережевих інверторів). Найчастіше мережеві інвертори поділяються на дві основні категорії: одноступеневі та двоступеневі або багатоступеневі. Але чим більше ступенів, тим нижча ефективність GCI. Двокаскадний

складається з каскаду постійного/постійного струму та каскаду постійного/змінного струму (рис.1.2). Основна мета цих двох каскадів – підвищити фотоелектричну напругу, відстежуючи максимальну потужність. Етап перетворення постійного струму в змінний є критично важливим. У порівнянні з двома каскадами, один каскад, так би мовити, складається з постійного струму до змінного. Одноступеневий каскад має просту топологію і високу ефективність, окрім того, що він має складніший алгоритм керування. На відміну від цього, двоступенева система потребує програми алгоритму пеленгування, яка є набагато менш вимогливою, оскільки кілька команд виконуються на двох різних етапах [12].

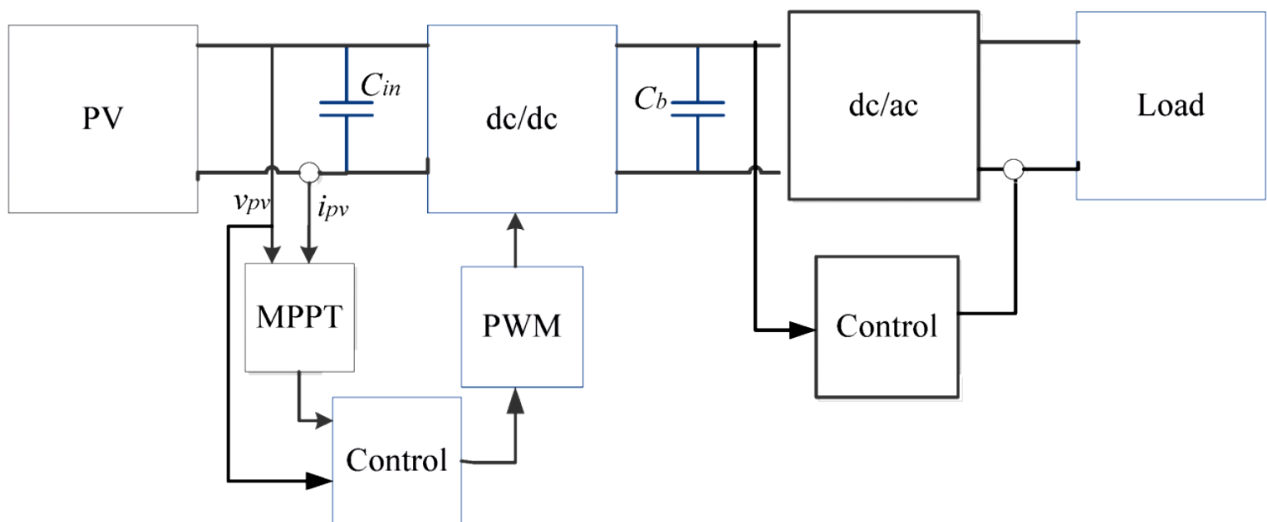


Рисунок 1.2 – Система, підключена до мережі

1.3 Типи інверторів

Навантаження змінного струму бувають однофазні та трифазні, залежно від того, як живиться система. Тому може бути однофазна або трифазна мережа. Для зменшення коливань потужності використовуються різні типи інверторних установок. Збурення, пов'язані з напругою, які трапляються як в однофазній, так і в трифазній системі, мають майже однакові особливості. Крім того, забезпечення якості електроенергії можливі за допомогою компенсації несиметрії напруги. Зниження реактивної потужності є основною проблемою однофазної системи. Топологія інвертора з підключенням до мережі в

однофазній системі, як правило, не має накопичувальних елементів, що здебільшого використовується в невеликих електростанціях у відновлюваній енергетиці. Однофазні мережеві інвертори мають більше потужностей, мають більше переваг як їх попередники і здебільшого використовуються в домашніх фотоелектричних системах. Відомо, що стратегії ідентифікації гармонік у трифазних мережевих інверторах частіше за все є не просто незбалансованим джерелом. Отже, трифазні мережеві інвертори мають багато переваг, що робить їх придатними для великого набору розробок. Трифазна система для живлення високопотужних споживачів має кілька переваг:

1. Це зменшує навантаження на ключі інвертора.
2. Зменшується кількість реактивних компонентів.
3. Підвищується частота вихідного струму.
4. Залишає незмінним розподіл втрат.

1.4 Конфігурації мережевих інверторів

1.4.1 Централізована топологія

Це найбільш розвинена з усіх. Вона використовується в дорогих фотоелектричних системах потужністю до декількох мегават. У цій топології один інвертор пов'язаний з фотоелектричною системою, як показано на рис.

1.3. Найвигіднішою перевагою цієї технології є її дивовижно низька вартість.

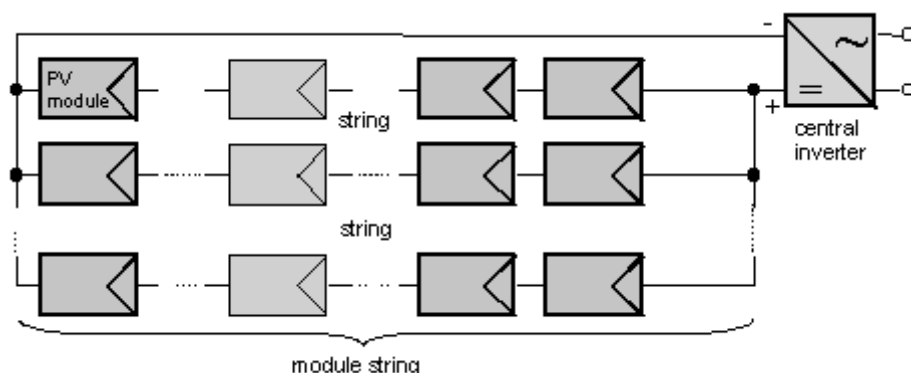


Рисунок 1.3 – Централізована топологія [13]

Але вона має низьку надійність, оскільки вихід з ладу інвертора зупиняє роботу фотоелектричної системи. Крім того, існує основний інцидент

управління у випадку невідповідності між модулями і половинного затінення. Це погіршує якість центральної топології.

1.4.2 Стрінгова топологія

Кожний стрінг пов'язаний з інвертором. Це позитивно впливає на якість електроенергії. Крім того, зменшуються проблеми, пов'язані із затіненням, оскільки кожен стрінг може працювати на своїй заявленій найбільшій потужності. На рис.1.4 показано конфігурацію стрінгової топології. Вона підвищує адаптивність фотоелектричної системи. Як правило, номінальна потужність повинна бути до 222-3 кВт. Найбільшим недоліком є розширений фетч через зростання кількості інверторів.

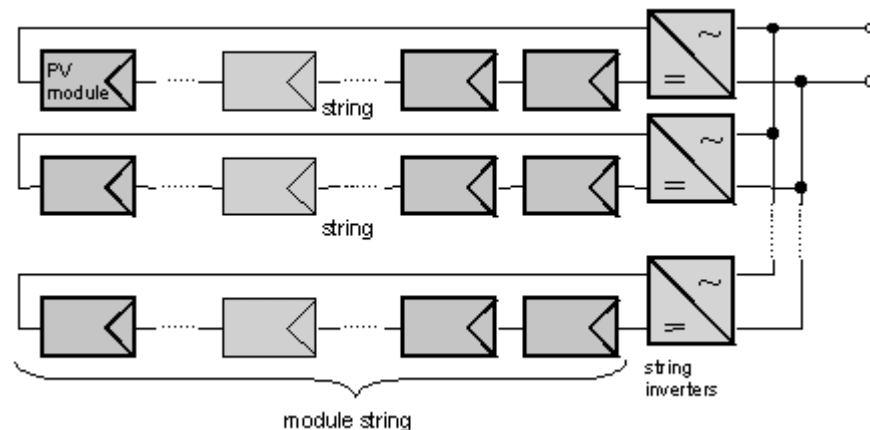


Рисунок 1.4 – Стрінгова топологія [13]

1.4.3 Багатострінгова топологія

Кожний стрінг пов'язаний з DC-DC перетворювачем для отримання точки максимальної потужності та підвищення напруги. Перетворювачі в цій точці пов'язані з одним інвертором за допомогою мережі постійного струму, як показано на рис.1.5. Ця топологія поєднує переваги стрінгової та централізованої топологій і використовує центральний інвертор для зменшення вартості. У будь-якому випадку, якість системи є менш ефективною порівняно з іншими конфігураціями.

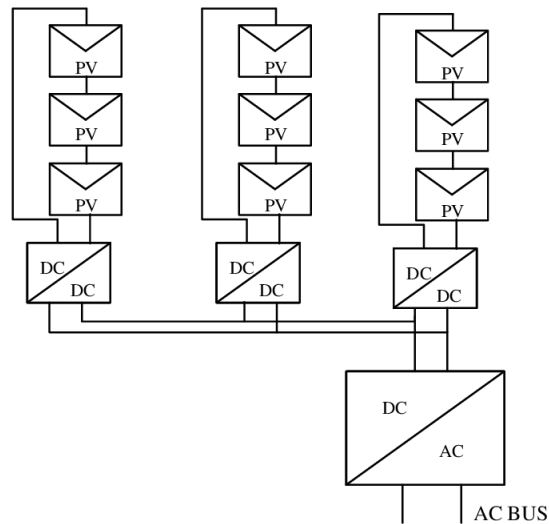


Рисунок 1.5 – Багаторядкова топологія [13]

1.4.4 Модульна топологія

Зазвичай найпоширеніша топологія. Їх додатково називають модулями змінного струму, оскільки в них вставляється інвертор (рис.1.6).

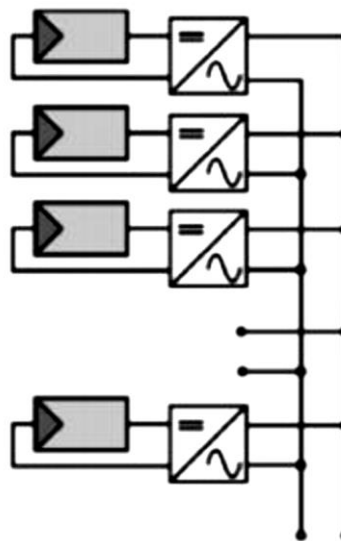


Рисунок 1.6 – Модульна топологія

Вона має багато переваг, таких як зменшення втрат через дробове затінення та адаптація до конфігурації масиву. У будь-якому випадку, вона підходить для електростанцій з низькою потужністю (до 500 Вт), а її вартість є помірно високою. Крім того, термін служби інвертора зменшується, оскільки

він знаходиться у відкритому контакті з фотоелектричним модулем, що призводить до збільшення його теплового навантаження.

1.5 Якість електроенергії

Якість електроенергії – це стабільна напруга живлення, яка залишається в межах встановленого або адекватного діапазону потужності. Крім того, основними цілями контролю якості є покращення обслуговування споживачів та зменшення кількості скарг. Деякі автори виділяють два основні фактори, які є важливими для якості електроенергії, а саме: безперебійність постачання та якість напруги. У роботі [14] автор зазначає причини та вплив спотворення напруги та обговорює природу, параметри та наслідки швидких провалів напруги, асиметрії та коливань, а також гармонік та перехідних перенапруг.

Електромагнітна сумісність характеризує здатність обладнання працювати, не створюючи негативних електромагнітних завад для будь-чого в цьому середовищі. Незважаючи на всі переваги, які фотоелектричні системи надають комунальним службам, це не виключає того факту, що існує кілька потенційних проблем, пов'язаних з системами, підключеними до електромережі. Лінійні або високочастотні перетворювачі можуть здійснювати перетворення з постійного струму в змінний. За допомогою таких перетворювачів можна створити чудову синусоїдальну форму хвилі. Система запускається в роботу з певним коефіцієнтом потужності за допомогою регулятора на перетворювачі. Під час передачі реактивної потужності відбувається падіння напруги; воно відбувається в мережі, яка, швидше за все, генерує низьку напругу на виході фідерів. Інвертор може розпізнати несправність або відключення електроенергії в мережі і відключитися від системи. Якщо виникає несправність, перетворювач продовжує функціонувати. При генерації високої напруги постійного струму шляхом послідовного з'єднання значної кількості фотоелементів. Використання DC/DC перетворювача дає можливість запобігти цій проблемі.

У минулі роки проблема гармонік не порівнювалася з надмірним використанням перетворювачів, таким чином здійснюючи координатний вплив на якість електроенергії. По суті, проблеми гармонік визнані як свого роду негативний вплив, який не пов'язаний безпосередньо з лінійною мережею, здійснює модифікацію синусоїдальної форми напруги та струму, подібно до характеристик, які піддаються змінам, таких як частота. Гармонійні спотворення напруги можуть впливати на роботу статичних перетворювачів. Тоді необхідно використовувати фільтри гармонік. Енергосистема може зазнавати втрат і може виходити з ладу обладнання. Ці наслідки є безперервними і їх не можна ігнорувати. Апаратне забезпечення пізніших інверторів, що працює на ШІМ-модуляції, надзвичайно сильно генерує гармоніки.

1.6 Фільтрація гармонік

За останні 20 років напівпровідникова техніка зазнала неймовірного прогресу, що сприяло розвитку деяких систем керування, які використовують високовольтні системи постійного струму. У будь-якому випадку, режим роботи цих пристроїв створює проблеми, вони продовжують накопичуватися, незважаючи на те, що ці системи вдосконалюються і створюються сучасні прилади. Через імпеданс виникають перешкоди між лінійними напругами розподільчої системи. Нейтральна лінія, яка не призначена для транспортування величезної кількості енергії, може зіткнутися з дисбалансом напруги та надмірними струмами через наявність силових електронних пристроїв.

Рівень гармонік обмежується шляхом модернізації вихідної форми сигналу інвертора відповідно до цього, зменшуючи розмір фільтра. В основному, пасивні та активні фільтри пом'якшують гармонічні спотворення в більшості систем. Проводяться різноманітні дослідження, спрямовані на покращення системи розподілу електроенергії та вимог до мережі з точки зору

ефективності та якості напруги. Використання LCL-фільтрів у привертає все більше уваги завдяки їхній покращеній здатності зменшувати гармоніки, що виникають внаслідок використання якомога нижчої частоти перемикавання. Крім того, електромагнітні перешкоди обмежуються стандартами IEEE-1547 і 519. Зазвичай фільтр використовується для мережевих інверторів, але вихід цього інвертора – це регульована напруга, таким чином, дуже важливо пом'якшити гармоніки перед підключенням до мережі, що є обов'язковою умовою для роботи в електромережі. LCL-фільтр зазвичай використовується через його покращену здатність зменшувати гармоніки, споживання енергії є незначним, а електромагнітний імпеданс – обмеженим. Наразі тривають різні дослідження з вивчення конструкції LCL-фільтра.

1.7 Вимоги до вихідного фільтру

Метою використання фільтру є забезпечення мережі струмом належної якості. Вибір інвертора, який буде використовуватися, залежить від ефективності фільтра.

Отож, фільтр повинен мати максимальну індуктивність, щоб забезпечити належну роботу інвертора, коли він підключений до електромережі. Крім того, мережева фотоелектрична система створює несучу ШІМ та гармоніки напруги. Ця напруга може призвести до протікання струму в мережу. Це усе впливатиме на чутливих споживачів. Для того, щоб відповідати цим умовам, фільтр містить базову котушку індуктивності.

Для того, щоб задовольнити вимоги мережі, тобто зменшити гармоніки, необхідний додатковий вхід високої потужності. Більше того, енергетична реакція системи може бути гіршою. Але навіть більш зменшена індуктивність може відповідати критеріям, і при цьому все одно слід дотримуватися рекомендацій стандартів. Переважним підходом є використання гармонік падіння потенціалу діапазону. Точний кінцевий результат можна отримати, використовуючи якомога менші котушки індуктивності. Для перемикавання

силового перетворювача на частоті 100 Гц це рішення абсолютно застосовне, оскільки воно генерує ШІМ-гармоніки, які мають дуже низьку частоту.

Основна проблема полягає в небезпеці, яку створюють деякі з цих кількох конкретних гармонік. Згодом виникла потреба зменшити або усунути ці гармоніки.

1.8 LC-фільтр

Вихідна напруга та напруга мережі синхронізовані між собою, і ШІМ-інвертор подає пульсації струму в мережу. Вихідний струм інвертора генерує високу частоту комутації, яка є небажаною. Для її усунення використовується вихідний фільтр. Вибір відповідної котушки індуктивності для фільтра залежить від пульсацій струму. Струм пульсацій здебільшого становить від 10% до 15% від номінального струму. На рисунку 1.7 нижче показано LC-фільтр (другого порядку) з ослабленням -40 дБ/декаду.

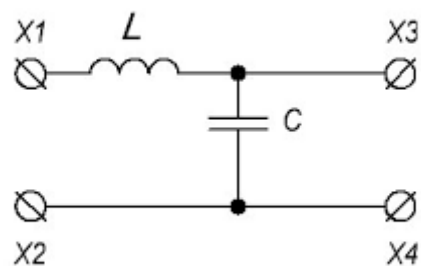


Рисунок 1.7 - LC-фільтр

Конструкція конденсатора залежить від реактивної потужності, що споживається конденсатором на основній частоті.

Усунення частоти перемикання здійснюється за допомогою шунтуючого елемента, тим більше, що зменшення загасання комутаційних компонентів інвертора здійснюється за допомогою L-фільтра, вибір шунтуючого елемента має вирішальне значення, оскільки він дозволяє генерувати низький реактивний

опір на частоті перемикання. Але єдина вимога полягає в тому, що компонент повинен мати великий амплітудний імпеданс. Запропонованим шунтовим елементом є конденсатор.

LCL-фільтр (третього порядку)

Серед відомих переваг для застосувань з високою потужністю є представлення LCL-фільтра, представленого на рисунку 1.8. Він забезпечує краще зниження гармонік комутації інвертора порівняно з іншими конфігураціями фільтрів. Процедура керування зростаючим струмом дозволила зберегти стабільність системи. Через гармоніки напруги мережі відбувається генерація перешкод, що призводить до виникнення резонансу. Досить складно задовольнити вимоги стандарту IEEE 519 з низькою індуктивністю на стороні інвертора.

Отже LCL-фільтр дає можливість реалізувати мінімізовані рівні гармонійних спотворень з нижчими частотами перемикання та меншою загальною накопиченою енергією.

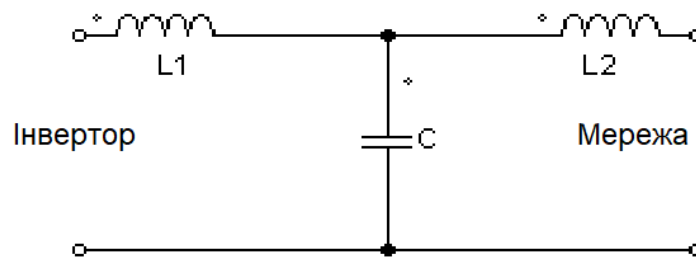


Рисунок 1.8 – LCL-фільтр

1.9 Висновки до розділу

1. Розглянуто фотоелектричну систему в цілому, якість електроенергії та топологію фільтрів. Підключена до мережі фотоелектрична система є основною частиною цієї системи.

2. Висвітлено вплив гармонік на мережу, а також загальні типи фільтрів, що використовуються для пом'якшення їх впливу.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис системи

На рисунку 2.1 представлена трифазна фотоелектрична система, підключена до мережі. Фотоелектрична система потужністю 210 кВт є основним джерелом живлення, а потім використовується підвищувальний перетворювач, який підвищує напругу до 600 В. Після цього трифазний MOSFET-інвертор перетворює постійний струм в змінний. LCL-фільтр знаходиться між мережею та інвертором для того, щоб зменшити загальні гармонійні спотворення, які є найбільш ймовірними.

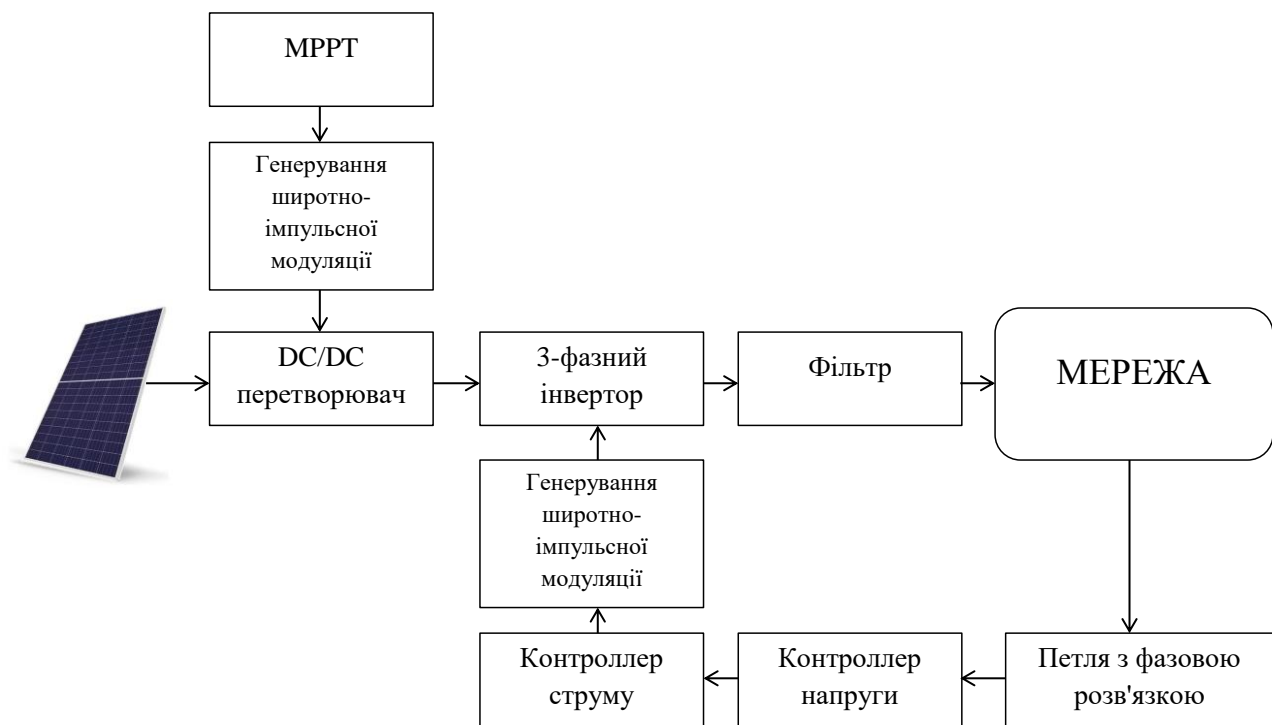


Рисунок 2.1 – Блок-схема трифазної фотоелектричної системи, підключеної до мережі

2.2 Проектування LCL-фільтра

2.2.1 Процес проектування

Процес проектування включає в себе декілька етапів, а саме: визначення параметрів, математичне моделювання, фактори та критерії проектування.

Простий L-фільтр першого порядку не тільки громіздкий, але й не відповідає вимогам щодо гасіння гармонік. Серед факторів, які необхідно враховувати, - пульсації вихідного струму, гармоніки струму від mosfet-інвертора, послідовне падіння напруги, бажаний коефіцієнт потужності, резонансна частота, стабільність керування.

Для проектування необхідного LCL-фільтра враховуються наступні параметри системи, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1- Номінальні параметри системи

f_g	частота мережі
f_{sw}	несуча частота ШІМ
ω_{res}	резонансна частота
P_n	номінальна активна потужність
E_n	середньоквадратична напруга між лініями
V_{DC}	напруга ланки постійного струму
L_1	катушка індуктивності з боку інвертора
L_2	катушка індуктивності з боку мережі
C	конденсатор
R_d	демпферний опір
V_g	напруга мережі

Наступні критерії є надзвичайно важливими при проектуванні LCL - фільтра:

- А. Високе загасання
- В. Покращена продуктивність
- С. Економічна ефективність

У більшості трифазних інверторів три фази ідентичні і відокремлені одна від одної. Це призводить до утворення трьох роз'єднаних систем, кожна з яких подібна до однофазного інвертора. У конструкції інвертора з LCL -фільтром кожна фаза матиме три основні компоненти: дві індуктивності та ємність, а також послідовні опори. Кожна з цих катушок індуктивності намотана на

ізолюваних осердях. Наведені в таблиці 2.2 значення використовуються в подальших розрахунках.

Таблиця 2.2 – Параметри, що використовуються для розрахунку фільтра

Параметри	Номенклатура	Значення
Напруга від лінії до лінії	V_{LL}	380 В
Напруга на ланці постійного струму	V_{DC}	600 В
Резонансна частота	f_w	30000 Гц
Номінальна потужність	P_n	210000 кВт
Індуктивність	L_i	Генрі

$$Z_b = \frac{V_{LL}^2}{P_n} = \frac{380^2}{210} = 687.61 \text{ Ом} \quad (2.1)$$

$$Z_b = \frac{1}{Z_b \cdot \omega_n} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 687.61} \quad (2.2)$$

$$C_b = 462 \mu F \quad (2.3)$$

Котушка індуктивності з боку інвертора в основному мінімізує струм пульсацій MOSFET інвертора.

$$\begin{aligned} X_{LPU} &= \frac{L\omega_n}{Z_b} = \frac{Z_b \cdot X_{LPU}}{\omega_n} = \\ &= \frac{0.05 \cdot 686}{2\pi \times 50} = 10.91 \text{ мГ} \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\Delta I_{L_{\max}} = \frac{V_{DC}}{8f_w L_i} = \frac{600}{8 \cdot 30 \cdot 109.1} \quad (2.5)$$

$$\Delta I_{L_{\max}} = 2.29 \text{ А}$$

$$L_{Total} = \frac{X_{L_Total} \cdot Z_b}{\omega_n} = \frac{686.6 \cdot 0.09}{2\pi 50} = 19.67 mH \quad (2.6)$$

Отже,

$$L_g = L_{Total} - L_i \quad (2.7)$$

$$L_g = 19.67 - 10.91 = 8.67 mH$$

$$C_f = \beta \cdot C_b = 0.05 \cdot 462 = 23.1 \mu F \quad (2.8)$$

Резонансну частоту фільтра можна розрахувати наступним чином

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{19.97}{8.67 \cdot 10^{-3} \cdot 10.91 \cdot 10^{-3} \cdot 23.1 \cdot 10^{-6}}} \quad (2.9)$$

$$f_{res} = 2055 \text{Гц}$$

$$\omega_{res} = 2\pi \cdot 2055 = 12911,9 \text{ рад/с}$$

Вимога близько 5% виконується ідеально. Значення демпфуючого резистора розраховується наступним чином:

$$R_f = \frac{1}{3 \cdot 2\pi \cdot 2055 \cdot 23,1 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_f = 1,12 \text{ Ом}$$

У таблиці 2.3 наведено параметри LCL-фільтра, знайдені після розрахунків.

Таблиця 2.3 – Параметри LCL фільтра

Параметр		Значення
Котушка індуктивності з боку мережі	L_g	8,67 мГн
Котушка індуктивності з боку інвертора	L_i	10,91 мГн
Ємність фільтра	C_f	23,1 мкФ
Демпферний резистор	R_f	1,12 Ом
Резонансна частота	ω_{res}	12911,9 рад/сек

2.2.2 Проектування та розрахунок трифазного MOSFET інвертора

Розроблена модель є двонаправленим інвертором. При необхідній вихідній напрузі та повторюваності трифазний інвертор ефективно перетворює постійний струм в змінний. Це помітно при використанні різних конфігурацій інвертора і схем керування, кожна з яких має свої переваги і недоліки.

В основному для цього плану використовується топологія трифазного інвертора з шістьма перемикачами. Конфігурація складається з трьох рівних гілок, на кожній гілці розташовано по два перемикачі з елементами, що складаються з напівпровідника та діода, з'єднаних між собою попарно.

Конструкція є простою, широко використовуваною, з добре перевіреною топологією, із включеними додатковими особливостями інвертора. Особливість інвертора полягає в тому, що він є ідеальним, відрегульованим, триступеневим джерелом напруги, пов'язаним з матрицею. Таке представлення моделі інвертора базується на тому, що напруга в мережі є чистою синусоїдою.

ШІМ обмежує струм інвертора у відповідній кількості, щоб створити вихідну напругу без фільтрації. Баланс ширини синусоїдального імпульсу (SPWM) використовується для створення сигналів інвертора з ідеальною амплітудою і повторюваністю шляхом протиставлення триступеневої синусоїдальної форми хвилі. Повторюваність MOSFET обумовлена повторюваністю тривимірного сигналу, що надходить у вигляді імпульсів, які керують вхідним сигналом. Рівняння представляють форму хвилі напруги наступні:

$$Va_{ref} = A \sin 2\pi ft + \theta \quad (2.10)$$

$$Vb_{ref} = A \sin 2\pi ft + \theta - 120^\circ \quad (2.11)$$

$$V_{c_{ref}} = A \sin 2\pi ft + \theta + 120^\circ \quad (2.12)$$

де A – амплітуда,
 f – частота,
 θ – фазовий зсув.

У таблиці 2.4 описано схему перемикання широтно-імпульсної модуляції від першого до шостого перемикача (рис.2.2)

Таблиця 2.4 – Схема перемикання ШІМ

Перемикач	Застосовувана синусоїда	$V_S > V_T$	$V_S < V_T$
S_1	V_a	ON	OFF
S_2		OFF	ON
S_3	V_b	ON	OFF
S_4		OFF	ON
S_5	V_c	ON	OFF
S_6		OFF	ON

При одночасному перемиканні може виникнути коротке замикання на джерелі постійного струму, що може пошкодити перемикачі або інвертор в цілому. У будь-якому випадку, перемикання виконується динамічно; суміш двох кутових перемикачів дає нефільтровану вихідну напругу.

Трифазний MOSFET-інвертор, підключений до джерела постійного струму, яким є фотоелектрична система, зображено на рис. 2.2.

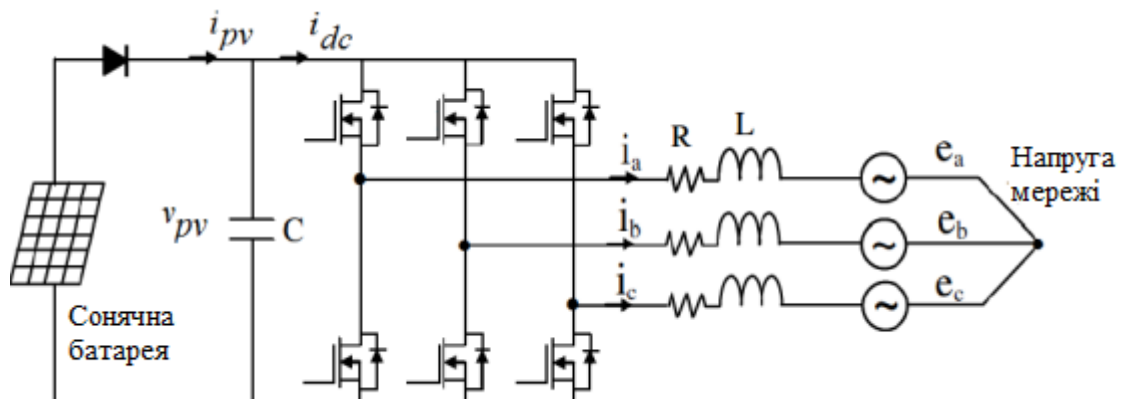


Рисунок 2.2 – Трифазний MOSFET-інвертор

Наступні рівняння виражають струм кожної фази, а також напругу.

$$i_a = -\frac{R}{L}i_a - \frac{1}{L}e_a + \frac{v_{pv}}{3L} 2S_a - S_b - S_c \quad (2.13)$$

$$i_b = -\frac{R}{L}i_b - \frac{1}{L}e_b + \frac{v_{pv}}{3L} S_a + 2S_b - S_c \quad (2.14)$$

$$i_c = -\frac{R}{L}i_c - \frac{1}{L}e_c + \frac{v_{pv}}{3L} S_a - S_b + 2S_c \quad (2.15)$$

$$i_{dc} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c \quad (2.16)$$

$$\rightarrow v_{dc} = \frac{1}{c} i_{dc} - \frac{1}{c} i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c \quad (2.17)$$

2.2.3 Синхронізація мережі з використанням методу PLL (петля фазової синхронізації)

Його можна порівняти з інструментом, який дозволяє одному сигналу слідувати за іншим. Коло регулювання струму залежить від ПІ-регулятора (відповідного обов'язкового регулятора), а PLL відповідає за надання йому сигналів. PLL розрізняє фазу, повторюваність і напругу мережі. Ця схема PLL складається з розпізнавання фази і кругового контуру. Виконання розпізнавання фази може бути досягнуто шляхом використання зміни abc на dq в триступеневій структурі. З іншого боку, елементи структури контролюються за допомогою зворотнього контуру.

На рисунку 2.3 показано конфігурацію контуру керування PLL.

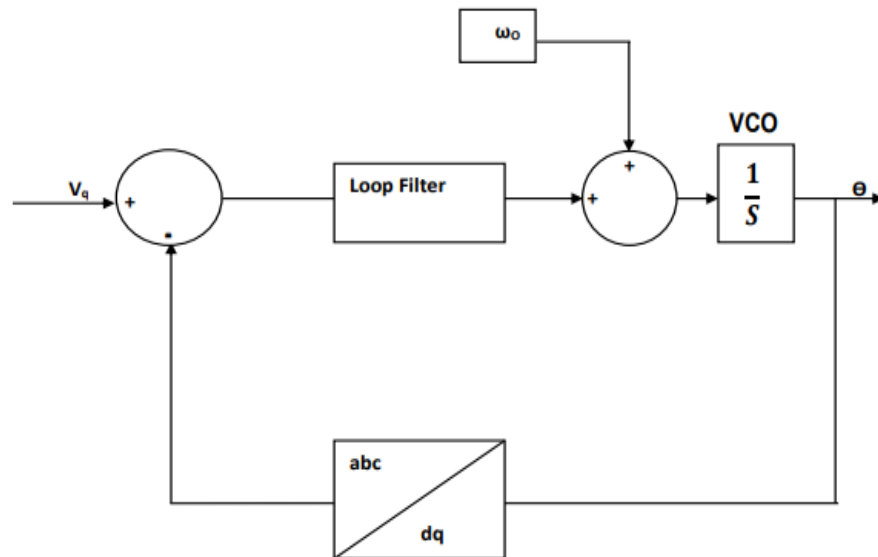


Рисунок 2.3 – Контур керування PLL [15]

2.2.4 Проектування синхронного опорного ФНЧ

Передавальна функція замкненої системи dq PLL представлена наступним чином:

$$H_c s = \frac{\theta_o s}{\theta_i s} \quad (2.18)$$

$$H_c s = \frac{K_f s}{s + K_f s} \quad (2.19)$$

$$H_e s = \frac{\sigma s}{\theta_i s} \quad (2.20)$$

$$H_e s = \frac{s}{s + K_f s} \quad (2.21)$$

$$K_f s = K_p \left(\frac{1 + sT}{sT} \right) \quad (2.22)$$

$$H_c s = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.23)$$

де

$$\omega_n = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.24)$$

де

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{\zeta}}$$

$$\zeta = \frac{K_p}{2\omega_n} \quad (2.25)$$

2.3 Керування фотоелектричною мережею з прив'язкою до мережі

2.3.1 Відстеження точки максимальної потужності

Для правильної роботи фотоелектричної системи з прив'язкою до мережі необхідно контролювати як максимальну вихідну потужність фотоелектричних модулів, так і струм і напругу в джерелі напруги інвертора.

Евристичний пошук за допомогою методу збурень і спостережень (P&O) виявляється більш прямим і простим, ніж інші методи.

Відстеження точки максимальної потужності – це метод, який в основному порівнює напругу та потужність. І змушує систему реагувати відповідно.

Удосконалення розрахунку P&O полягає в коливанні опорної напруги вхідного струму перетворювача. У довгостроковій перспективі оцінюється міра інтенсивності, передана з панелі. У випадку, якщо вона є більшою за попередньо оцінену, опорна напруга поступово збільшується в аналогічній мірі, а якщо ні, то зменшується. З метою виявлення правильного MPPT використовуються для підвищення отриманої енергії. На рисунку 2.4 показано випадок алгоритму P&O.

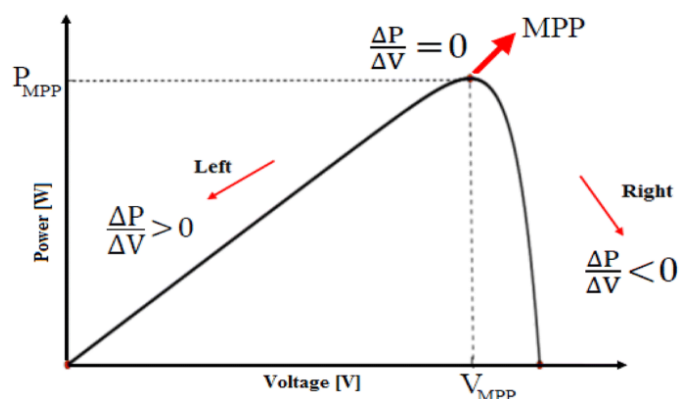


Рисунок 2.4 – Алгоритм P&O

2.3.2 Технологія керування в інверторах

Модуляція дозволяє отримати вихідну напругу, який змінюється з мінімальними втратами. У роботі [16] автори показують, що ретельний вибір стратегії ШІМ може значно покращити спектр гармонік на виході інвертора шляхом переміщення гармонічних складових до більш високих частот.

Різні методи ШІМ-модуляції

Є декілька методів, заснованих на широтно-імпульсній модуляції (ШІМ), що часто використовуються в сучасній електротехніці як частина управління твердотільними джерелами живлення. Недоліком ШІМ є те, що рівні пульсацій напруги та струму залежать від робочого циклу, частоти комутації та властивостей навантаження. Існує можливість згладжувати та усереднювати вихідну напругу ШІМ для обмеження цих ефектів шляхом використання відповідної високої частоти комутації та додаткового пасивного фільтра. Реалізація систем керування потужністю ШІМ може бути спрощена за допомогою напівпровідникових перемикачів. Як у включеному, так і у вимкненому стані перемикач розсіює лише незначну потужність.

Керування з боку інвертора

Використання силових електронних перетворювачів значно покращило можливість витягувати максимальну потужність з фотоелектричних панелей, а також формувати потужність, що подається на навантаження, таким чином, щоб досягти високої якості електроенергії та відповідати вимогам для роботи від мережі. Існує кілька схем силових електронних перетворювачів, що використовуються для керування вихідною потужністю фотоелектричної системи. Тип електричного генератора визначає силову електронну схему, що застосовується, навантаження, що живиться від фотоелектричної системи, і топологію управління, що використовується в системі. Інвертор є найважливішим блоком у фотоелектричних системах для підключення до мережі змінного струму.

Технологія модуляції

Стабільність і повторюваність робочих характеристик інвертора є важливими як для надійної роботи фотоелектричної системи, так і для визначення параметрів у моделі продуктивності. Якість вихідної напруги інвертора залежить від кількості (n -ї) гармонік і величини кожної гармоніки, яка існує у вихідній напрузі. Якість вихідної напруги інвертора можна виміряти за кількома параметрами; найважливішими з них є величина окремих (n -х) гармонік (HF n) та загальний коефіцієнт гармонік (THD). Технологія ШІМ є основною, що використовується в цій розробці. Його принцип роботи полягає у швидкому вмиканні та вимиканні перемикача між джерелом живлення та навантаженням (ШІМ), частота якого називається несучою частотою. ШІМ здебільшого асоціюється з робочим циклом (δ), який представляє собою відсоткове відношення часу увімкнення (t_{on}) до часу повного періоду (T_{sw}).

Метод керування струмом інвертора

Регулювання струму є важливою проблемою в силових електронних схемах, особливо в інверторах постійного струму, де метою є генерування синусоїдального змінного струму, величину і частоту якого можна регулювати. Основною функцією регулятора струму є покращення стабільності напруги та забезпечення відсутності циркуляції струму між перетворювачами. Крім того, вихідна напруга повинна мати прийнятні перехідні характеристики без поганої динамічної характеристики, небажаного перерегулювання або проскакування. З іншого боку, загальний коефіцієнт гармонійних спотворень повинен бути якомога нижчим і не перевищувати стандартних порогових значень.

Контроль з боку мережі

Дана робота спрямована на те щоб збільшити кількість невеликих джерел живлення з відновлюваних джерел енергії в житлових будинках як частини електромережі. У цьому випадку до електромережі буде підключено велику кількість малих децентралізованих джерел живлення, що, можливо, збільшить складність систем управління електропостачанням. Якщо існуюча мережа підключена лише до великої централізованої електростанції, напруга в загальній точці з'єднання не може бути суттєво змінена невеликим

децентралізованим джерелом живлення. У роботі [17] автор зазначає, що інвертор не повинен протидіяти або намагатися регулювати напругу в точці загального з'єднання (в якій вимірюється напруга мережі). Якість електроенергії інвертора буде визначатися якістю його вихідного струму. Дійсно, більшість електромереж є трифазними системами. Тому розподілені ресурси підключаються до мережі через ізолюючий трифазний трансформатор.

Контролер на стороні інвертора використовує параметри мережі, які можна виміряти в загальній точці з'єднання інвертора з мережею без великих комунікацій. Тому можна ефективно використовувати малі відновлювані джерела енергії. У цьому методі керування вихідною потужністю інвертора шляхом контролю величини напруги та фазового зсуву залежить від локально виміряного миттєвого значення цих величин. У цьому методі параметри мережі використовуються як еталонні в загальних точках з'єднання для всіх розподілених генераторів.

Вибір несучої частоти

Для зменшення розмірів фільтра, а також для мінімізації впливу гармонік, частота перемикання ШІМ повинна бути якомога вищою. Але під час переходів між увімкненим і вимкненим станами силових напівпровідникових перемикачів струм і напруга на них відмінні від нуля, і значна потужність розсіюється в перемикачах. Удосконалений перемикаючий пристрій повинен забезпечувати швидше наростання (спад) під час увімкнення та вимкнення, щоб уникнути перекриття перемикання. Для ідеальних перемикаючих елементів час наростання і спаду повинен бути симетричним і невеликим, що є компромісом між втратами на перемикання і електромагнітними перешкодами. Коливання напруги на виході моста від одного екстремуму амплітуди напруги до іншого в основному спричинені ШІМ. У будь-якому згладжуючому фільтрі ШІМ амплітуда комутаційних пульсацій вихідної напруги зменшується на певний відсоток. У сучасному інженерному світі пристрої перемикання потужності, призначені для інверторів малої та середньої потужності, можуть працювати на відносно високих частотах у діапазоні десятків кГц.

Децентралізоване електропостачання

Більшість електростанцій будуються у великих масштабах через низку економічних, безпекових, логістичних, екологічних, географічних та геологічних факторів. Такі централізовані системи мають багато недоліків, зокрема:

- Високий рівень залежності від невідновлюваних видів палива.
- Вплив на навколишнє середовище.
- Втрати при передачі та розподілі.
- Вища вартість електростанції, трансформаторів, мережі передачі та розподілу.

За останні два десятиліття рівень життя значно підвищився. Це пояснюється значними змінами, що відбулися в структурі енергоспоживання будівель, частково завдяки широкому використанню холодильних установок та електричного опалення в побутових приладах. Звідси випливає, що станції розподіленої генерації є ще одним підходом в рамках енергосистеми для забезпечення подальшого постачання електроенергії до комунальних підприємств. Розподілена генерація виявляється можливим рішенням для задоволення зростаючого попиту на електроенергію. Будівництво ліній електропередач зменшується як за розміром, так і за кількістю.

2.4 Трифазне підключеного інвертора

Загалом, можна використовувати два існуючі способи, а саме: регулювання напруги та регулювання струму. Нестабільність постійного струму, безумовно, не є суттєвою проблемою при проектуванні мережевого інвертора, оскільки вона може бути подолана за допомогою швидкого регулювання величини струму, що подається в мережу. Таким чином, інвертор не перебуває під загрозою перевантаження через існуючу систему регулювання. Регулятор інвертора, має ряд інших переваг, таких як стійкість до змішування в

межах інвертора і змінного струму, виняткова динаміка виконання і висока точність регулювання.

2.4.1 Теоретична модель регулятора струму

Принцип роботи регулятора струму базується на використанні синхронного керування системою – dq-керування [15]:

$$L \frac{di_{gd}}{dt} = v_{id} - Ri_{gd} + \omega Li_{gq} - v_{gd} \quad (2.26)$$

$$L \frac{di_{gq}}{dt} = v_{iq} - Ri_{gq} + \omega Li_{gd} - v_{gq} \quad (2.27)$$

Це основні рівняння системи dq. Отже, рамка dq, що обертається з кутовою швидкістю, може бути представлена у вигляді матриці як:

$$\begin{bmatrix} v_{id} \\ v_{iq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} v_{id} \\ v_{iq} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} + L\omega \begin{bmatrix} -i_{gq} \\ i_{gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{gd} \\ v_{gq} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Наступні рівняння можуть бути отримані з [15]

$$L \frac{di_{gd}}{dt} + Ri_{gd} = u_{idq} \quad (2.29)$$

$$v_{id} = u_{id} + v_{gd} - \omega Li_{gq} \quad (2.30)$$

$$v_{iq} = u_{iq} + v_{gq} - \omega Li_{gd} \quad (2.31)$$

Система відліку dq забезпечує контроль потужності. Основна мета полягає в тому, щоб генерувати або отримувати синусоїдальні струми.

Компоненти зазвичай використовуються для керування активною потужністю з одного боку та обміном реактивної потужності з іншого. Активну I_{dref} та реактивну потужність I_{qref} , що подається в мережу, можна визначити наступним чином:

$$P_{dq} = \frac{3}{2} v_d i_d + v_q i_q \quad (2.32)$$

$$Q_{dq} = \frac{3}{2} -v_d i_q + v_q i_d \quad (2.33)$$

де v_d, v_q, i_d та i_q представляють відповідно пряму та квадратурну складові струмів напруги мережі.

Таким чином, рівняння і можуть бути виражені як:

$$P_{dq} = \frac{3}{2} v_d i_d \quad (2.34)$$

$$Q_{dq} = \frac{3}{2} v_d i_q \quad (2.35)$$

Тоді, струм можна обчислити наступним чином:

$$i_d = \frac{2}{3} \cdot \frac{P}{v_d} \quad (2.36)$$

$$i_q = -\frac{2}{3} \cdot \frac{Q}{v_q} \quad (2.37)$$

Відповідно до наведеної на рис.2.5 послідовності керування величиною струму на основі даних з мережі регулятор струму формує сигнали керування постійного струму постійного струму, які подаються на S_1, S_2, S_3 і S_4 – затвор MOSFET. C_1 і C_2 – компаратори ПІ-регулятора. MOSFET може вмикатися і вимикатися 120 разів за секунду. Компаратори порівнюють синусоїду з вхідним сигналом. Перший порівнює нормальну синусоїду, а другий – інвертовану синусоїду. Така конфігурація допомагає зменшити згладжену напругу і обмежує похибку.

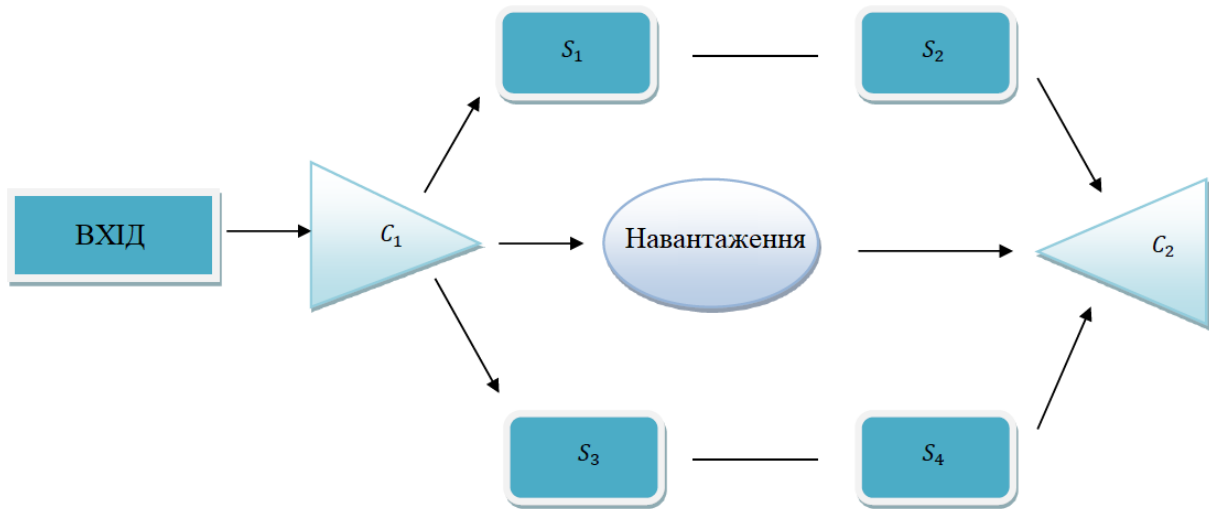


Рисунок 2.5 – Регулятор струму

2.4.2 Розробка схеми керування на основі ПІ-регулятора

Запропонований ПІ-регулятор представлено на рис. 2.6. Він був використаний для моделювання в цій роботі .

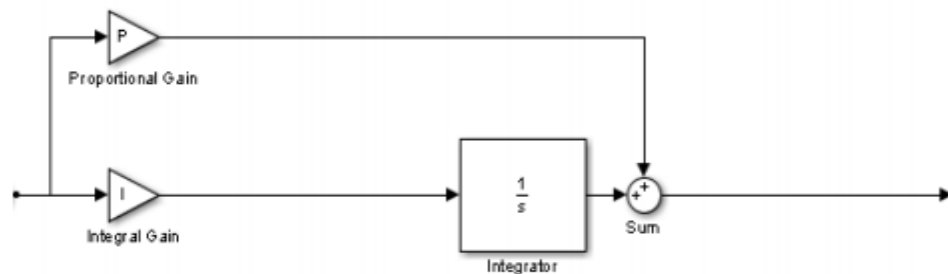


Рисунок 2.6 – Модель ПІ-регулятора

ПІ-регулятор застосовується для того, щоб забезпечити належний контроль напруги.

K_p та K_i є пропорційним та інтегральним коефіцієнтами підсилення і визначаються відповідно як:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2.38)$$

де $G_D(s)$ – представляє часову затримку обчислень.

$$G_D s = \frac{1}{1 + T_e s} \quad (2.40)$$

де T_e - часова затримка керування $T_e = \frac{L}{R}$.

На рис. 2.7 показано структуру команд, що використовується у системі.

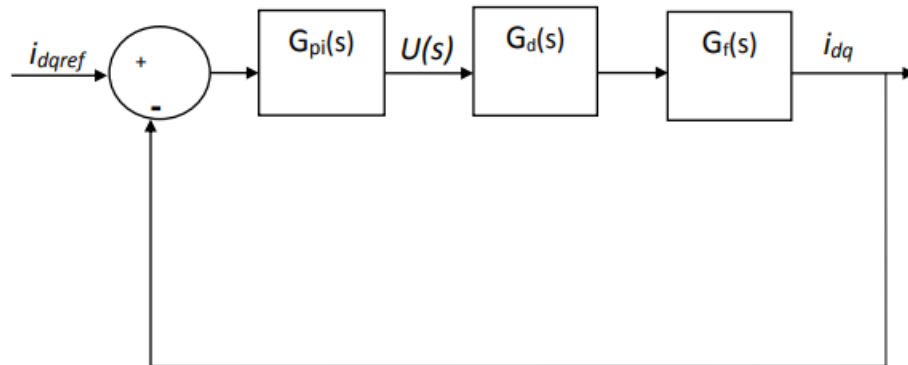


Рисунок 2.7 - Опорна схема dq

$$G_f s = \frac{v s}{i s} = \frac{1}{R + Ls} \quad (2.41)$$

$$G_f s = \frac{1}{R + Ls} \quad (2.42)$$

де $L = L_i + L_g$ і $R = R_i + R_g$ $G_f s = \frac{241.5}{24.15 + s} \quad (2.43)$

$$G_{OC} s = G_{PI} s \cdot G_d s \cdot G_f s \quad (2.44)$$

$$G_f s = \frac{K_p s + K_i}{s} \cdot \frac{1}{1 + sT_e} \cdot \frac{1}{R + Ls} \quad (2.45)$$

$$G_f s = \frac{K_p s + K_i}{s} \cdot \frac{1}{1 + sT_e} \cdot \frac{1/L}{R/L + Ls} \quad (2.46)$$

$$G_f s = \frac{K_p}{L} \cdot \frac{s + K_i/K_p}{s} \cdot \frac{1}{1 + sT_e} \cdot \frac{1}{R/L + Ls} \quad (2.47)$$

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R}{L} \quad (2.48)$$

Після підстановки отримаємо:

$$G_{OC} s = \frac{K_p}{L} \cdot \frac{s + R/L}{s} \cdot \frac{1}{1 + sT_e} \cdot \frac{1}{R/L + s} \quad (2.49)$$

$$G_{OC} s = \frac{K_p}{L} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1 + sT_e} \quad (2.50)$$

$$G_{OC} s = \frac{K_p}{Ls^2T_e + s} = \frac{K_p/L}{s + s^2T_e} \quad (2.51)$$

$$\text{Нехай } k = \frac{K_p}{L} \quad (2.52)$$

Тоді

$$G_{OC} s = \frac{k}{s^2T_e + s} \quad (2.53)$$

Тоді регулювання струму в замкненому контурі має вигляд

$$G_{CC} s = \frac{G_{OC} s}{1 + G_{OC} s} \quad (2.54)$$

$$G_{CC} s = \frac{\frac{k}{s^2T_e + s}}{1 + \frac{k}{s^2T_e + s}} \quad (2.55)$$

$$G_{CC} s = \frac{k}{s^2T_e + s} \cdot \frac{s^2T_e + s}{s^2T_e + s + k} \quad (2.56)$$

$$G_{CC} s = \frac{k}{s^2T_e + s + k} \quad (2.57)$$

$$G_{CC} s = \frac{k/T_e}{s^2 + s/T_e + k/T_e} \quad (2.58)$$

Другий порядок функції керування струмом замкненого контуру в загальному вигляді представлений наступним чином:

$$G_{CC} s = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\rho\omega_n^2s + \omega_n^2} \quad (2.59)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{T_e} \quad (2.60)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{T_e}} \quad (2.61)$$

$$2\rho\omega_n = 1/T_e \quad (2.62)$$

$$\omega_n = 1/2\rho T_e \quad (2.63)$$

$$\sqrt{\frac{k}{T_e}} = 1/2\rho T_e \quad (2.64)$$

Визначивши ρ як $1/\sqrt{2}$ і підставивши $k = \frac{K_p}{L}$ назад у рівняння

$$\sqrt{\frac{\frac{K_p}{L}}{T_e}} = \frac{1}{2 \cdot 1/\sqrt{2} T_e} \quad (2.65)$$

$$K_p = \frac{L}{2T_e} = \frac{19.67}{2 \cdot 0.01} = 9.83 \quad (2.66)$$

$$K_i = \frac{R \cdot K_p}{L} = \frac{80 \cdot 9.83}{19.67}$$

$$K_p = 40$$

Значення, знайдене вище, допоможе нам спроектувати систему керування, використовуючи теорію DQ в Simulink.

2.5 Висновки до розділу

1. Розглянуто процедуру проектування та методику керування фотоелектричною установкою потужністю 210 кВт, підключеною до мережі.
2. Проведено аналіз і розрахунки LCL-фільтра
3. Встановлено, що мережевий інвертор має переривчастий характер роботи, тому існує потреба в використанні належної системи керування.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Імітаційна модель трифазної мережевої сонячної електростанції

У цьому розділі представлено та обговорено результати моделювання запропонованої системи. Основна увага приділяється LCL-фільтру. На основі отриманих результатів представлено підхід до вирішення проблеми, як можна зменшити гармоніки між мережею та інвертором. Загальна структура системи представлена на рис. 3.1.

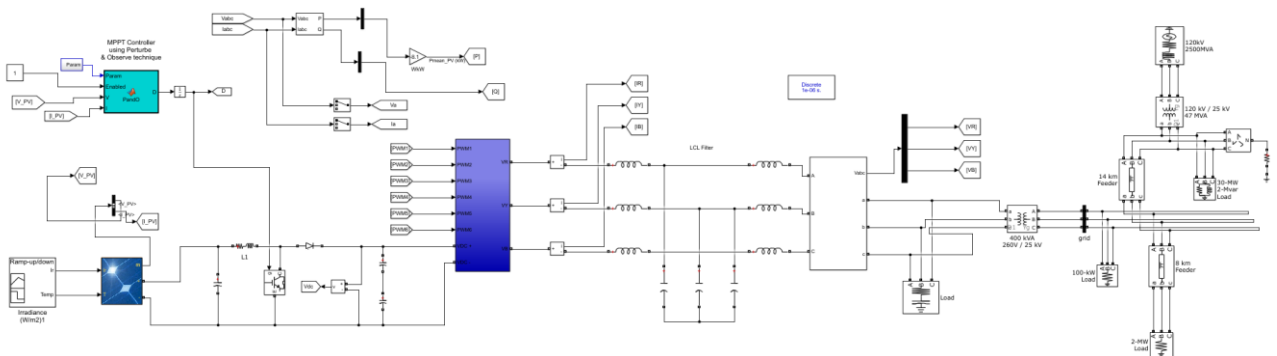


Рисунок 3.1 - Трифазна мережева сонячна електростанція потужністю 210 кВт

На рис. 3.2 представлено внутрішній блок та алгоритм, що використовується для MPPT

```
function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

% MPPT controller based on the Perturb & Observe algorithm.

% D output = Duty cycle of the boost converter (value between 0 and 1)
%
% Enabled input = 1 to enable the MPPT controller
% V input = PV array terminal voltage (V)
% I input = PV array current (A)
%
% Param input:
Dinit = Param(1); %Initial value for D output
Dmax = Param(2); %Maximum value for D
Dmin = Param(3); %Minimum value for D
deltaD = Param(4); %Increment value used to increase/decrease the duty cycle D
% ( increasing D = decreasing Vref )
%

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
```

```

end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
end

```

Рисунок 3.2 - Алгоритм МРРТ

Для моделювання було обрано електростанцію потужністю 210 кВт. З рівнянь (2.1)-(2.8) були визначені компоненти цього фільтра (індуктивність і ємність). У таблиці 3.1 наведено параметри, що використовуються для роботи системи.

Таблиця 3.1 - Параметри, використані для моделювання системи

Параметр	Значення	
Фотоелектрична потужність	240 кВт	
Індуктивність інвертора	0,4 мГн	
Індуктивність мережі	0,4 мГн	
Ємність	15,35 мФ	
Напруга кола постійного струму	600 В	
Мережа	Напруга між фазами	415 В
	Частота	50 Гц
	Кут зсуву фаз	0
Навантаження	Активна потужність	200 кВт
	Номінальна частота	50 Гц
	Реактивна потужність	100 ВАр

У роботі [14] автор проаналізував конструкцію фотоелектричної системи. На основі цього аналізу стало можливим відтворити ту ж саму методологію для цього випадку. У таблиці 3.2 показані технічні характеристики

фотоелектричного модуля, який використовувався у фотоелектричній системі потужністю 210 кВт.

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики фотоелектричного модуля

Parameters	Значення
Потужність (P)	250 Вт
Напруга холостого ходу (V_{oc})	37,8 В
Напруга (V)	31,5 В
Струм короткого замикання (I_{sc})	8,7 А
Струм (I)	7,94 А

На рисунку 3.3 показано вихідну напругу фотоелектричного перетворювача при фіксованій температурі та освітленості, що свідчить про наявність коливань. Напруга має ті ж самі пульсації. В результаті отримано на виході 600 В.

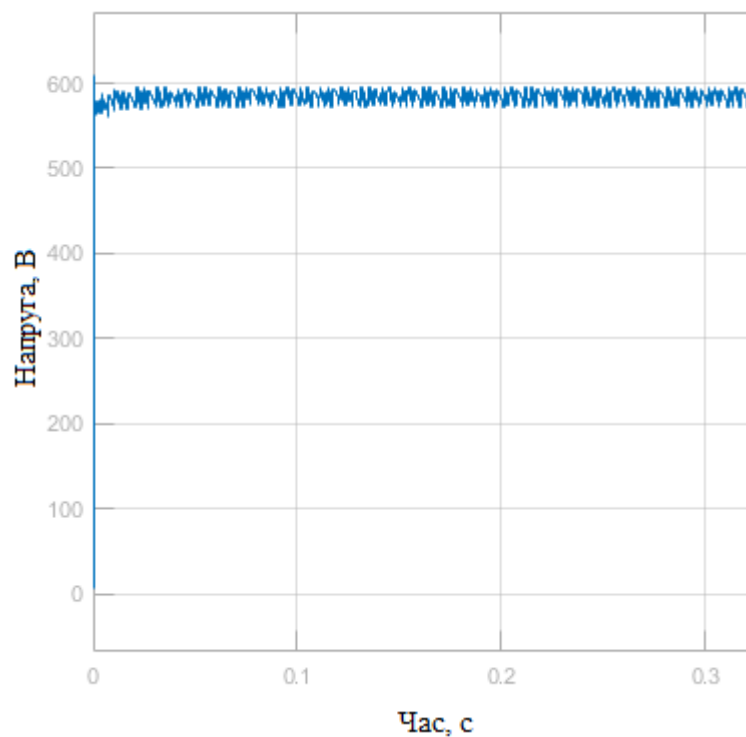


Рисунок 3.3 - Вихідна напруга фотоелектричного перетворювача

Зміни освітленості сонячних панелей від 1 до 10 секунд представлені на рис. 3.4. На рисунку 3.5 показано, як змінюється потужність в залежності від

температури та опромінення. Потужність зростала і досягла свого піку при 25 градусах зі зміною освітленості. З 1 секунди до 4 випромінювання було на рівні 1000 Вт/м² при постійній температурі 25 градусів, потім випромінювання зменшилося до 600 Вт/м² і тієї ж температури, що знизило потужність до 120 кВт. Нарешті, випромінювання повернулося до 1000 Вт/м² при температурі 25 градусів, і потужність зросла до 210 кВт, що є бажаною точкою максимальної потужності.

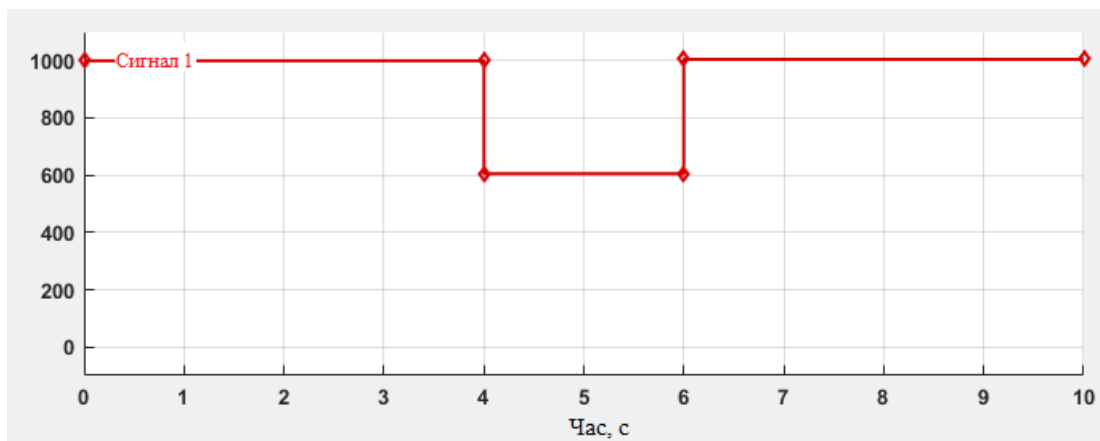


Рисунок 3.4 – Зміна величини опромінення

З рисунку 3.4 можна відстежити потужність, що генерується фотоелектричною системою. Потужність дорівнює 210 кВт, як і передбачалося, і лише з 4 до 6 години, коли рівень опромінення був досить низьким, потужність зменшилася до 1,5 кВт.

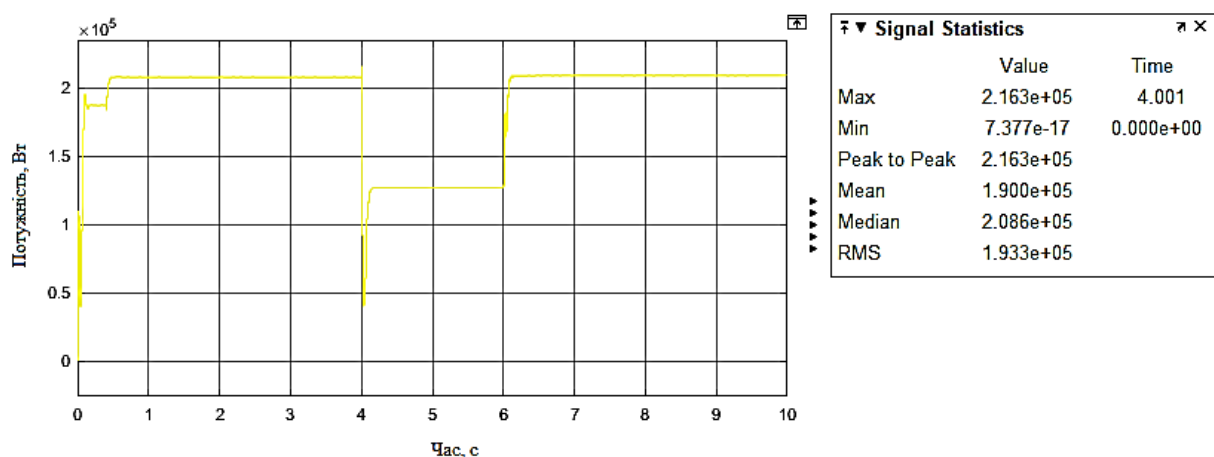


Рисунок 3.5 - Вихідна потужність фотоелектричної установки

3.2 Вихідний струм і напруга інвертора

На основі таблиці 2.3 (попередній розділ) були визначені різні послідовності роботи інвертора. За допомогою рівнянь (2.10, 2.11 і 2.12), які були розглянуті в попередньому розділі, була розроблена симуляційна модель трифазного MOSFET-інвертора, як показано на рисунку 3.6 нижче.

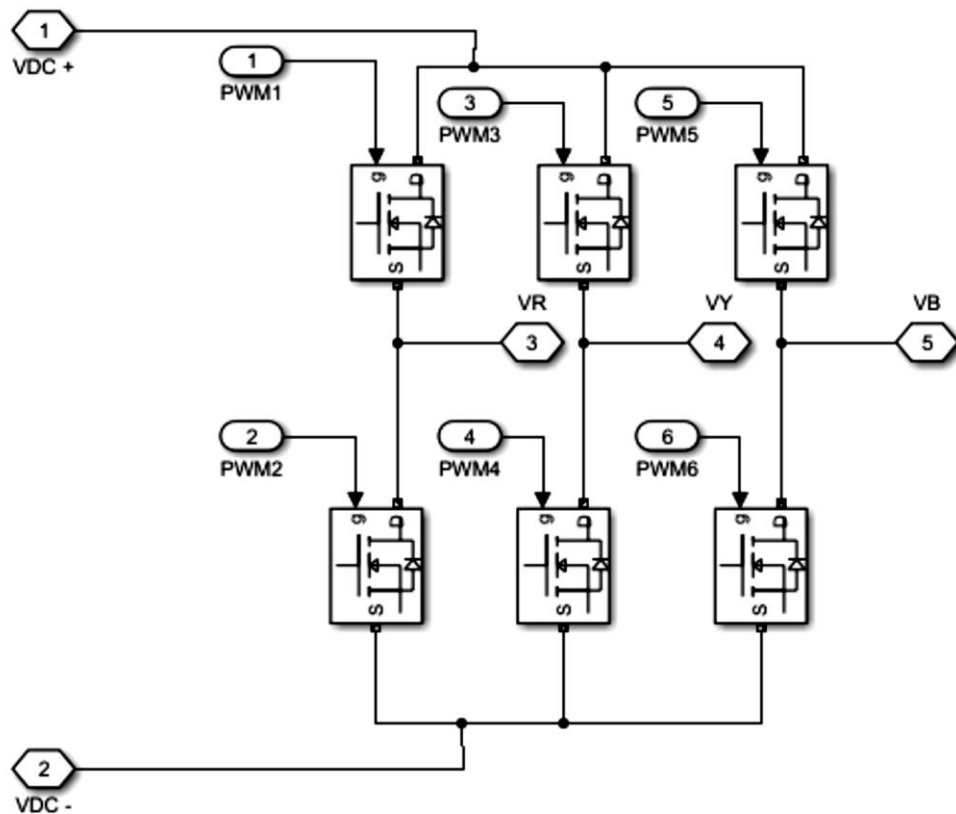


Рисунок 3.6 - Блок трифазного MOSFET-інвертора

З рисунку 3.7 видно, що за допомогою широтно-імпульсної модуляції стало можливим перетворення енергії з постійного струму в змінний. Можна помітити невеликі пульсації, які підтверджують наявність гармонік. Вихідна напруга інвертора змінюється в діапазоні від -600В до 600В. А струм змінюється від -150А до 150А.

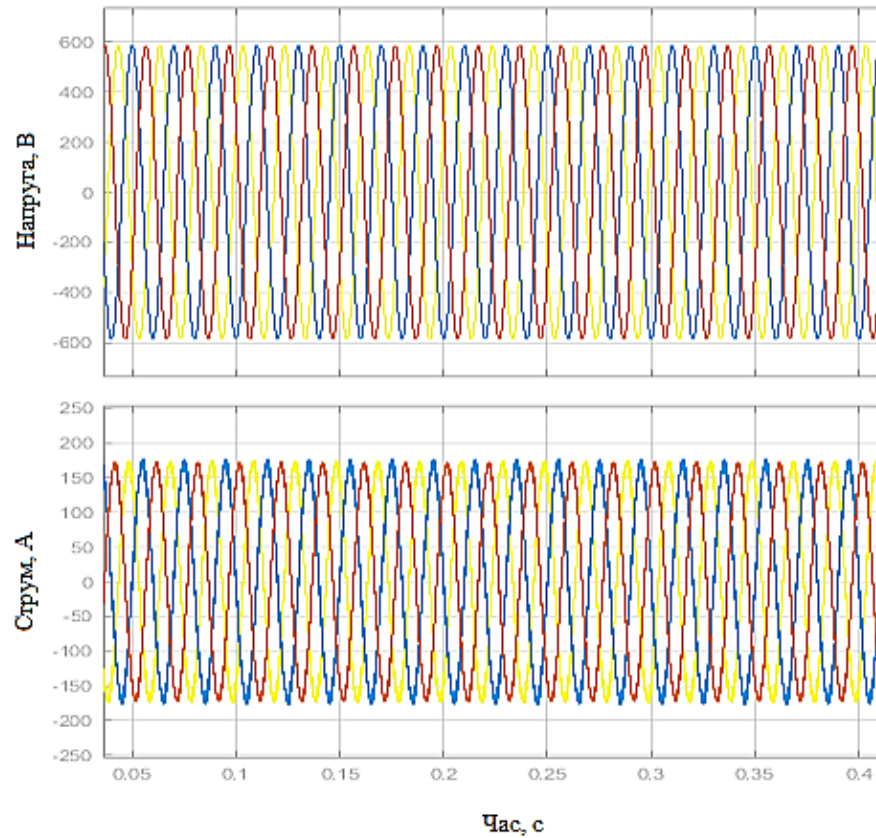


Рисунок 3.7 - Вихід трифазного MOSFET інвертора

На рисунку 3.8 показано аналіз системи за допомогою швидкого Фур'є. Було отримано загальний коефіцієнт гармонічних спотворень 20,36%, що є діапазоном гармонічних спотворень для таких типів систем. Завдання полягає в тому, щоб зменшити його до менш ніж 5%, щоб він відповідав вимогам.

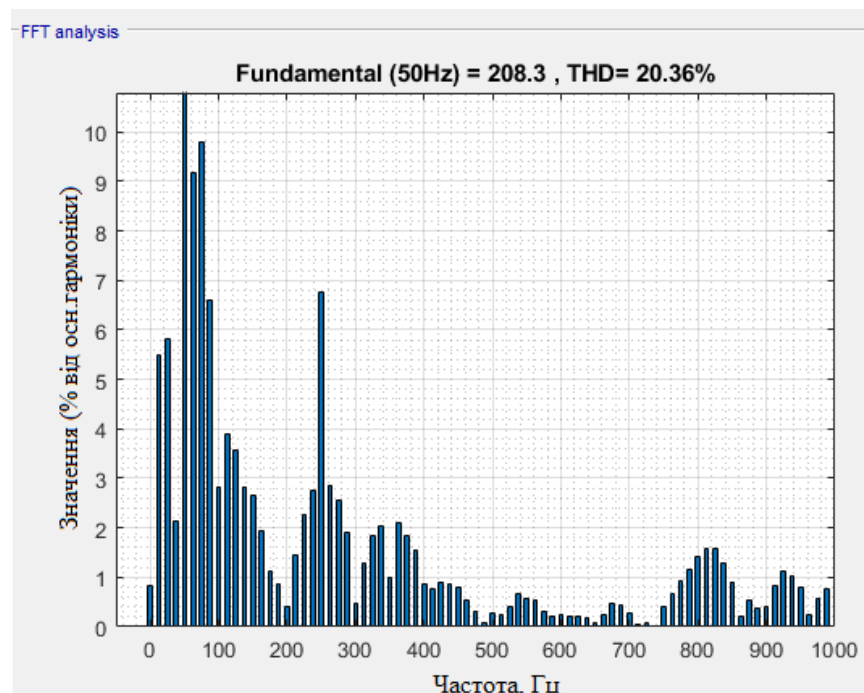


Рисунок 3.8 - Швидкий аналіз Фур'є

3.3 Напруга і струм після фільтра

Після застосування LCL-фільтра напруга та струм мають менші пульсації, як показано на рис. 3.9, що свідчить про відсутність гармонік.

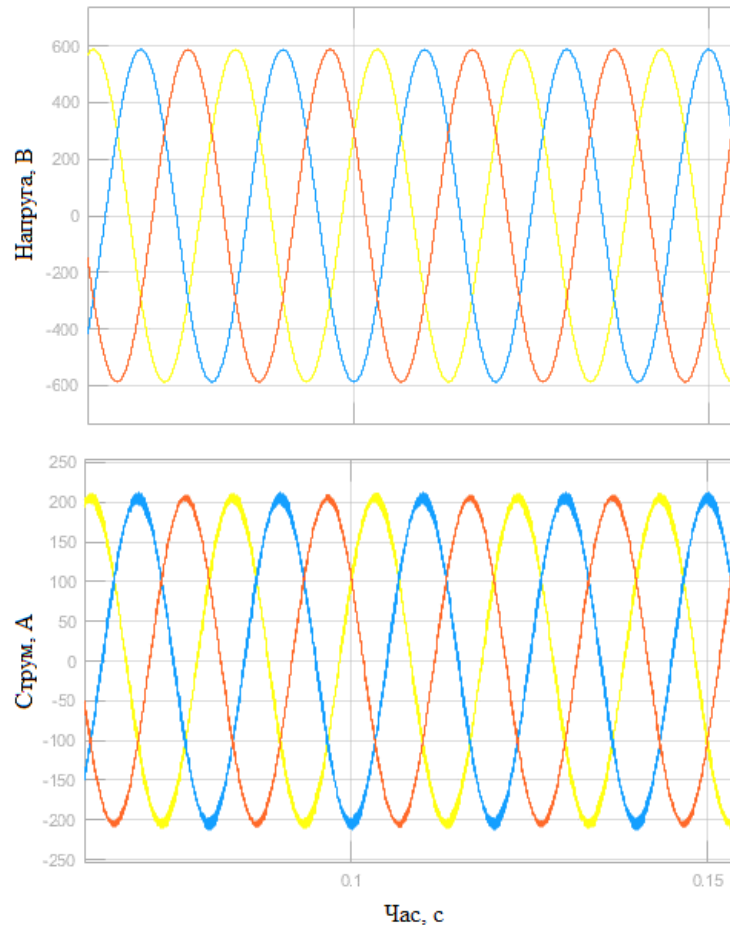


Рисунок 3.9 - Напруга та струм з LCL фільтром

3.4 Напруга та струм мережі

Фазна напруга і лінійний струм на стороні мережі представлені на рис. 3.10. Струм відстає від напруги на 90 градусів через природу котушки індуктивності і те, як вона протидіє зміні потоку самого струму.

На рисунку 3.11 зображено швидкий аналіз Фур'є, який дозволяє нам спостерігати за загальним коефіцієнтом гармонійних спотворень. THD знизився з 25 до 2,39% з введенням LCL-фільтра, що демонструє його ефективність, коли це необхідно.

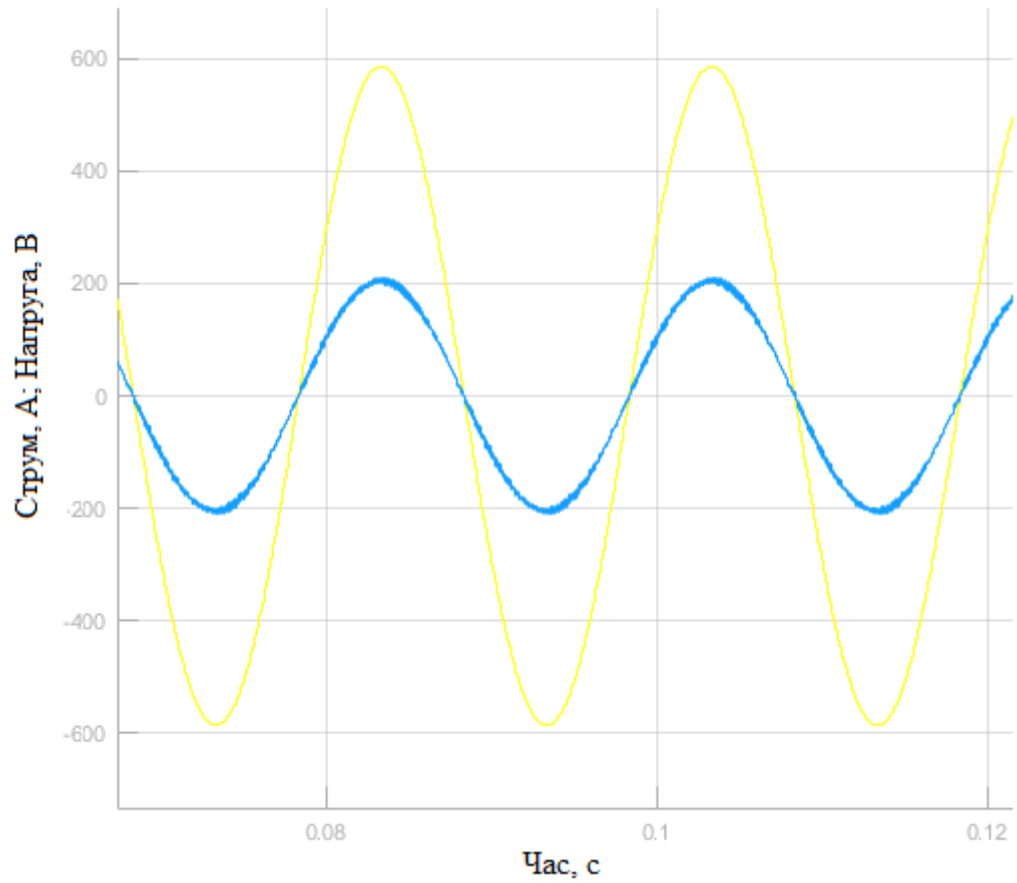


Рисунок 3.10 - Напряга і струм у мережі

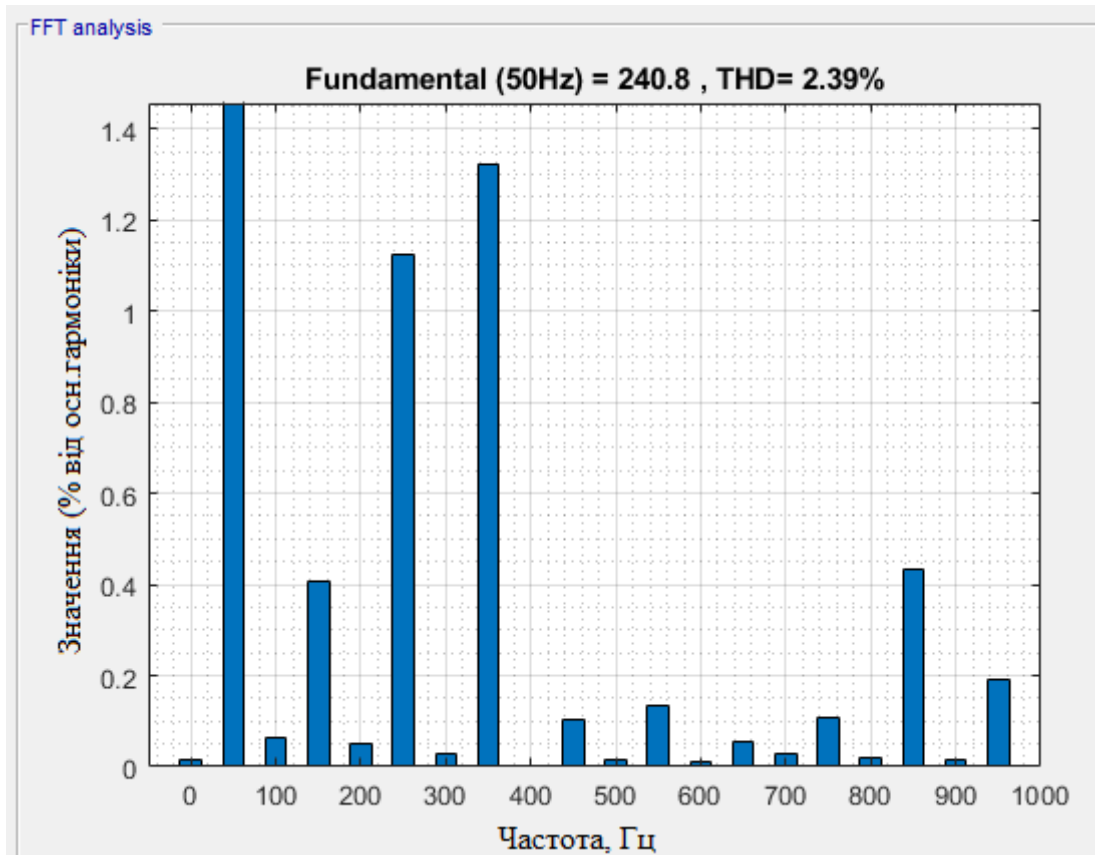


Рисунок 3.11 - Швидкий аналіз Фур'є після фільтра

3.5 Активна потужність, що подається в мережу

Потік активної потужності, що надходить в мережу, показано на рис. 3.12. Потужність становить близько 210 кВт, що відповідає розрахункам.

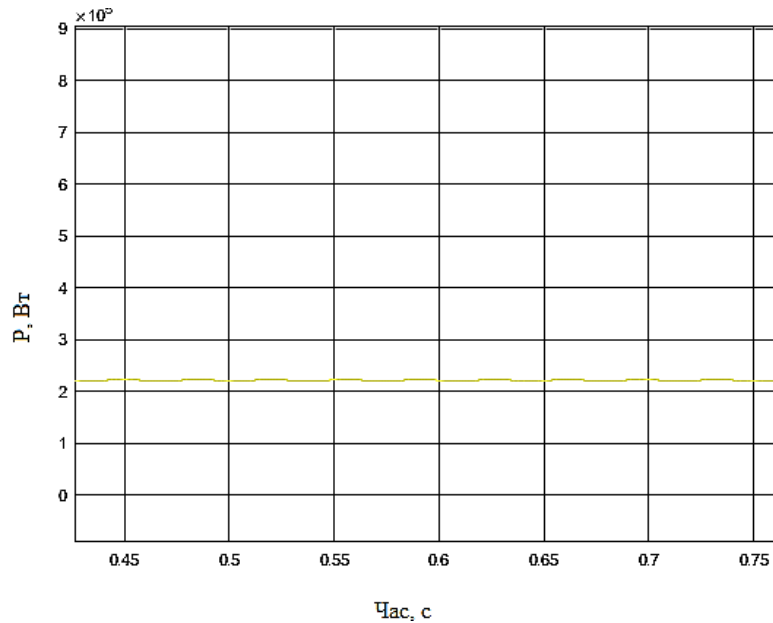


Рисунок 3.12 - Активна потужність

На рис. 3.13 представлені d і q компоненти модулюючих сигналів. Їх було отримано з рівнянь, що впливають зі алгоритму керування.

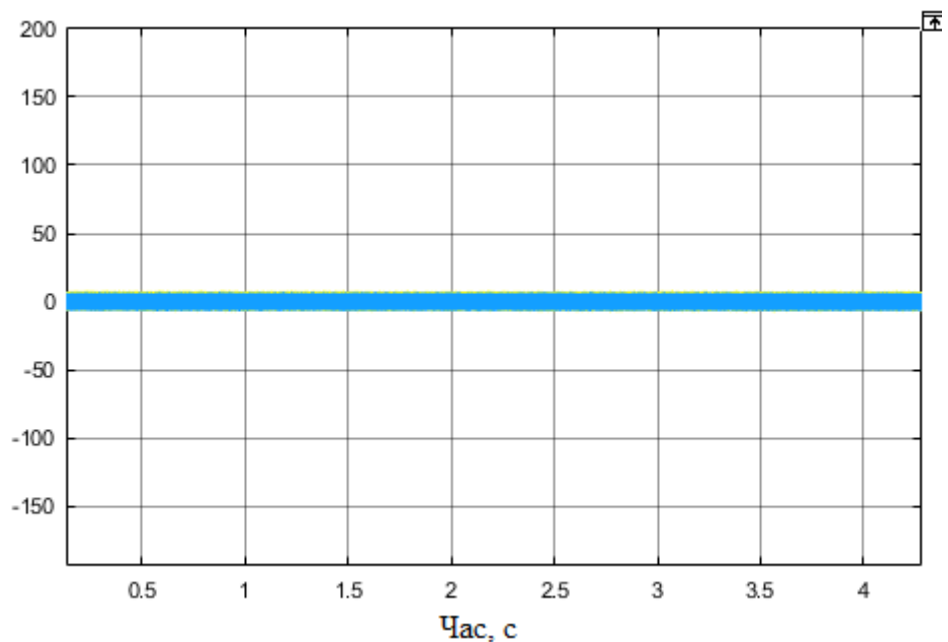


Рисунок 3.13 - D і Q модулюючі сигнали

3.6 Реактивна потужність

На рис. 3.14 показано реактивну потужність, що вводиться в мережу. Як і передбачалося, передача реактивної потужності в мережу не планувалася.

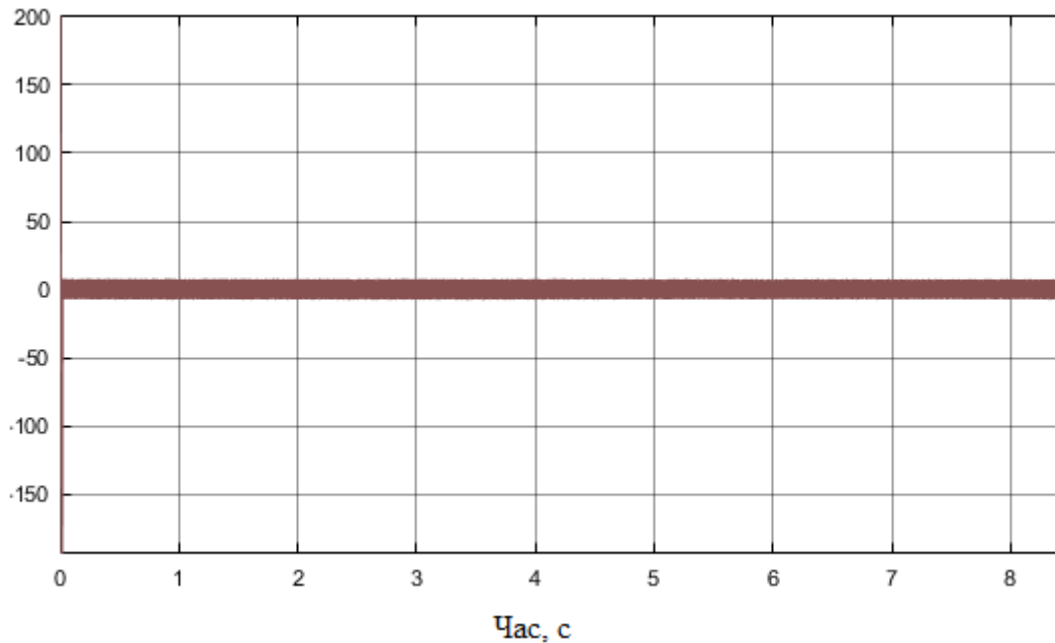


Рисунок 3.14 - Вихідна реактивна потужність

3.7 Продуктивність системи при ступінчастій зміні активної та реактивної потужності

Для цього випадку на рис. 3.5 навмисно були внесені зміни. Наступна зміна відбувається, коли активна потужність збільшується з 210 кВт до 380 кВт за 0,8 с, а реактивна потужність також збільшується в цей час, як показано на рисунках 3.15 та 3.16. Оскільки деяка реактивна потужність тепер передається в мережу.

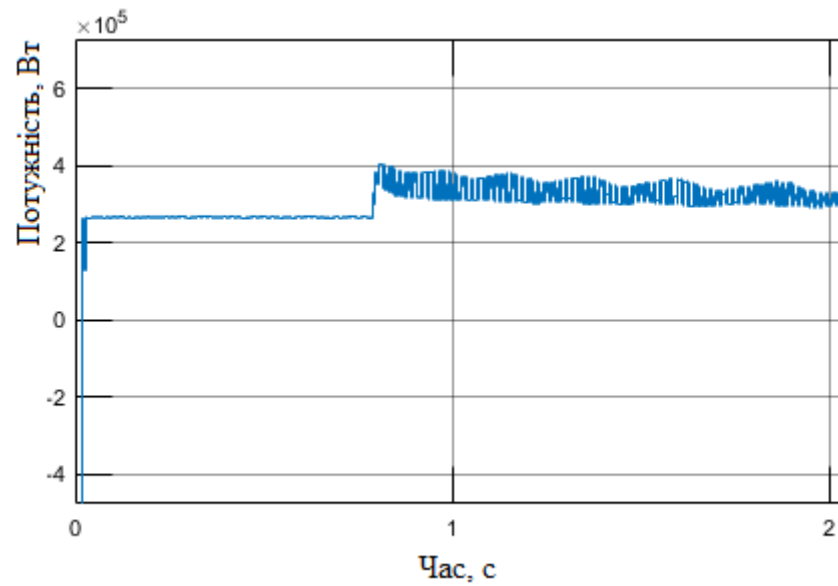


Рисунок 3.15 - Активна потужність

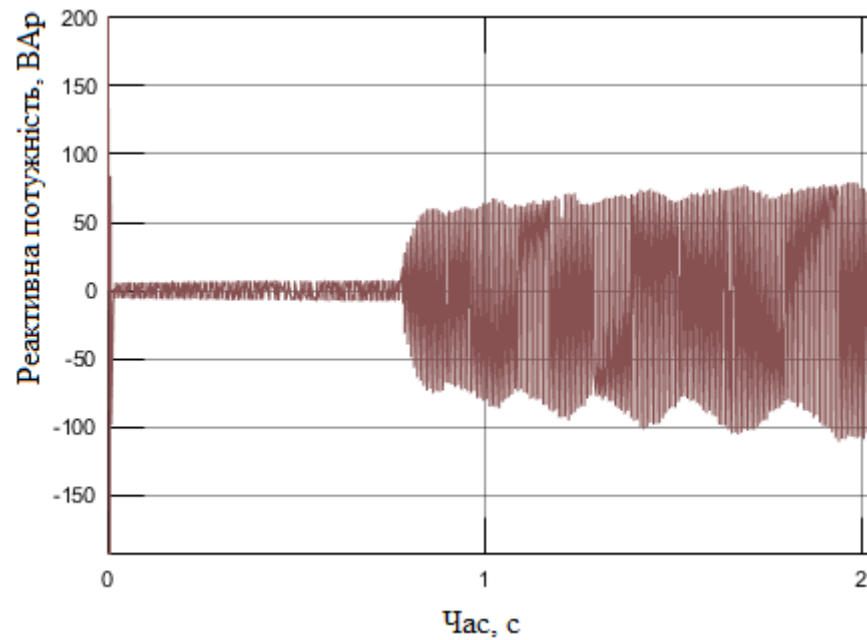


Рисунок 3.16 - Реактивна потужність

3.8 Реактивна потужність після ступінчастої зміни I_q

Змінимо на -200 на регуляторі струму на рис.3.1, щоб побачити, чи загальний рівень гармонійних спотворень все ще низький. На рисунку 3.17 показано напругу, керовану за допомогою теорії dq, і обидва регулятори, встановлені на 0.

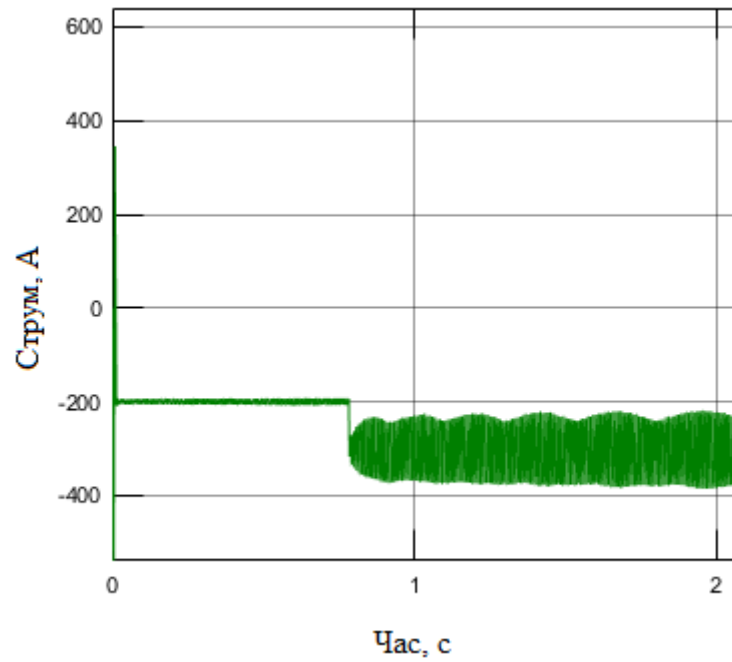


Рисунок 3.17 - Покрокова зміна опорної напруги з реактивною потужністю

На рисунку 3.18 показано напругу після ступінчастої зміни опорного сигналу. Сигнали модуляції dq відображають нульове значення, яке представляє похибку.

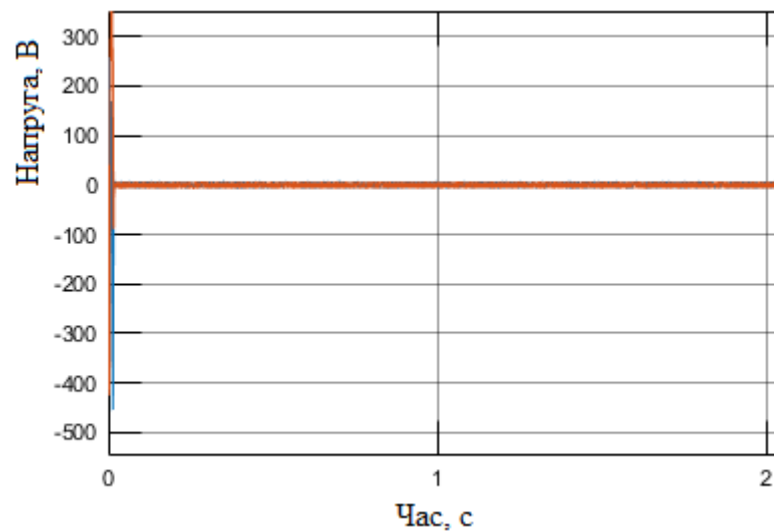


Рисунок 3.18 - Напруга після ступінчастої зміни сигналу

Реакція як струму, так і напруги після встановлення опорних точок. Перехід відбувається за 0,8 с; у цей час струм збільшився з 600 А, але напруга залишилася постійною, як показано на рис.3.19.

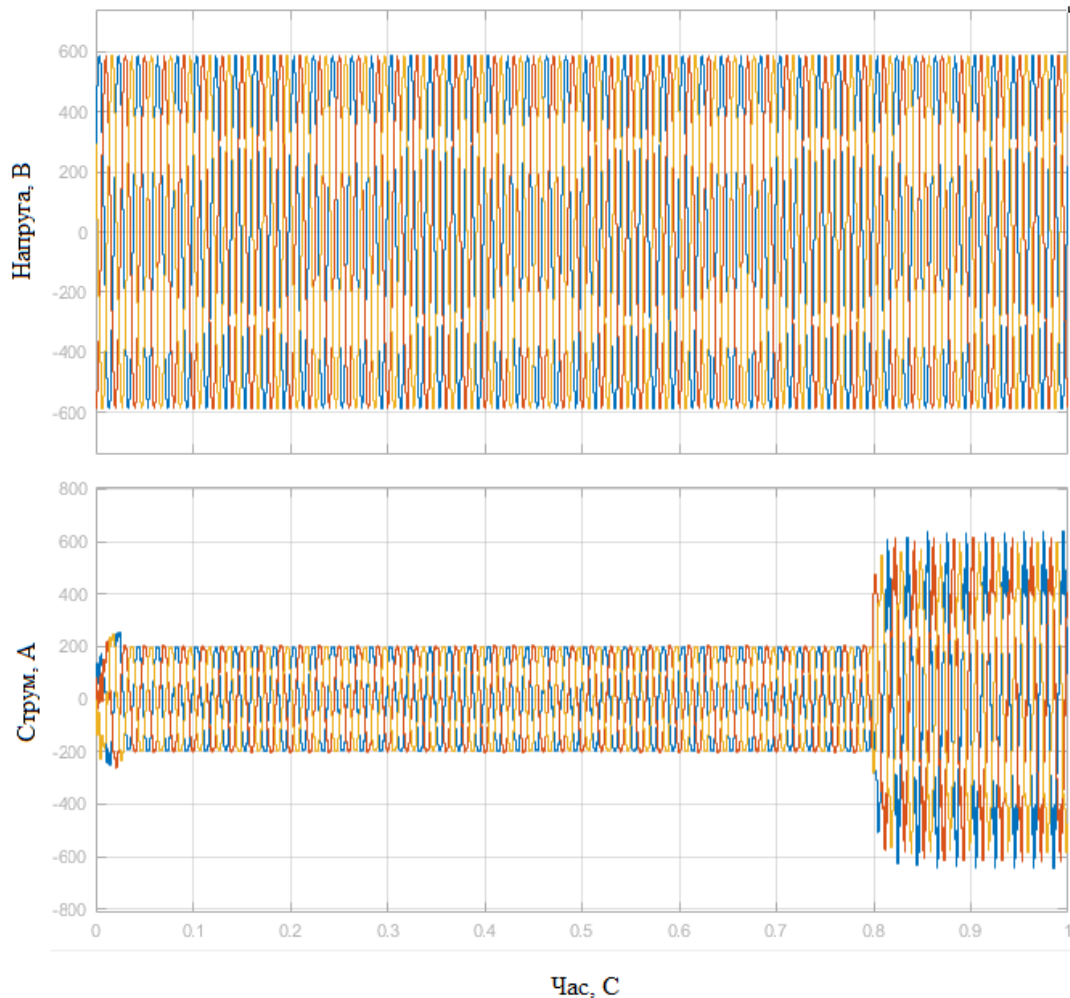


Рисунок 3.19 - Струм і напруга після ступінчастої зміни опорних точок

Швидкий Фур'є-аналіз після фільтра все ще дає подібний результат, як і попередній, THD утримується нижче 5%, до 2,5%, що демонструє, що LCL-фільтр може працювати в різних умовах навантаження та мережі, як показано на рис.3.20.

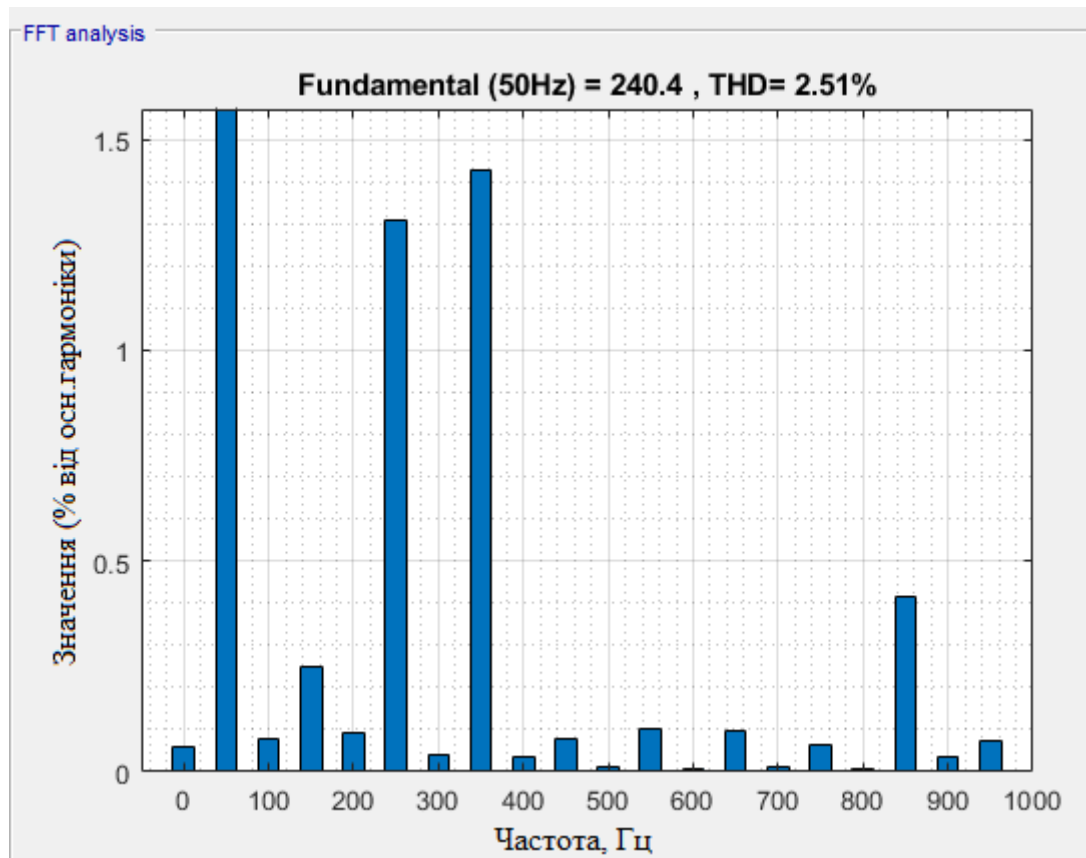


Рисунок 3.20 - Загальний коефіцієнт гармонік після зміни кроку

3.9 Висновки до розділу

1. У моделюванні було використано два основні сценарії. Перший сценарій розглядає вихідну потужність 210 кВт і напругу 600 В. Рівень гармонік виявився досить високим і потребував фільтрації. Після встановлення LCL-фільтра рівень гармонік значно знизився з 25 % до 2,39 %.

2. У другому сценарії вводиться ступінчаста зміна вихідної напруги, активна потужність збільшується до 300 кВт, а реактивна потужність десь до 50 кВАр. Проте спроектований фільтр чудово пом'якшив гармоніки з кінцевим рівнем 2,51%.

3. Все це демонструє, наскільки стійким і надійним є розроблений фільтр і його здатність бути ефективним, незважаючи на зміну будь-яких умов. Його ефективність була доведена значним зменшенням гармонік, що відповідає стандартам.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В

Перша медична допомога — це комплекс заходів, спрямованих на відновлення або збереження здоров'я потерпілих, здійснюваних немедичними працівниками (взаємодопомога) або самим потерпілим (самодопомога) [18,19]. Найважливіше положення надання першої допомоги — її терміновість. Чим швидше вона надана, тим більше сподівань на сприятливий наслідок.

Послідовність надання першої допомоги:

- усунути вплив на організм ушкоджуючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілих, оцінити стан потерпілого;
- визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне дихання, провести зовнішній масаж серця);
- підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;
- викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин або провода напругою до 1000 В слід скористатись канатом, палицею, дошкою або; будь-яким сухим предметом, що не проводить електричного струму.

Якщо електричний струм проходить в землю через потерпілого і він судорожно стискає один провід, то простіше перервати струм, відокремивши потерпілого від землі (підсунувши під нього суху дошку, або відтягнувши за ноги від землі вірьовкою, або відтягнувши за одяг), дотримуючись при цьому запобіжних заходів. Можна також перерубати дроти сокирою з сухою ручкою

або перекусити їх інструментом з ізольованими ручками. Перерубувати або перекушувати проводи слід пофазово, тобто кожний провід окремо, при цьому рекомендується стояти на сухих дошках, на дерев'яній драбині.

Заходи долікарської допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму. Після звільнення потерпілого від дії електричного струму необхідно оцінити його стан. У всіх випадках ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Якщо потерпілий при свідомості та стійке дихання і є пульсом, але до цього втрачав свідомість, його слід покласти на підстилку з одягу, розстебнути одяг, котрий затруднює дихання, забезпечити приплив свіжого повітря, розтерти і зігріти тіло та забезпечити повний спокій, дати понюхати нашатирний спирт, сполоснути обличчя холодною водою. Якщо потерпілий, котрий знаходиться без свідомості, прийде до тями, слід дати йому випити 15—20 краплин настоянки валеріани і гарячого чаю.

Ні в якому разі не можна дозволяти потерпілому рухатися, а тим більше продовжувати роботу, оскільки відсутність важких симптомів після ураження не виключає можливості подальшого погіршення стану. Лише лікар може робити висновок про стан здоров'я потерпілого. Якщо потерпілий дихає рідко і судорожно, але у нього не намацується пульсу необхідно відразу зробити йому штучне дихання.

За відсутності дихання та пульсу у потерпілого внаслідок різкого погіршення кровообігу мозку розширюються зіниці, зростає синюшність шкіри та слизових оболонок. У таких випадках допомога повинна бути спрямована на відновлення життєвих функцій шляхом проведення штучного дихання та зовнішнього (непрямого) масажу серця.

Потерпілого слід переносити в інше місце лише в тих випадках, коли йому та особі, що надає допомогу, продовжує загрожувати небезпека або коли надання допомоги на місці не можливе. Для того, щоб не втрачати час, не слід роздягати потерпілого. Не обов'язково, щоб при проведенні штучного дихання

потерпілий знаходився в горизонтальному положенні. Якщо потерпілий знаходиться на висоті, необхідно перед спуском на землю зробити штучне дихання безпосередньо в люльці, на щоглі і на опорі.

Опустивши потерпілого на землю, необхідно відразу розпочати проведення штучного дихання та масажу серця і робити це до появи самостійного дихання і відновлення діяльності серця або передачі потерпілого медичному персоналу.

4.2 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [18,19].

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;
- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;

- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві [18].

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт - понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю,

характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.3 Зонування територій за ступенем небезпеки

З метою диференційованого підходу до планування запобіжних заходів здійснюється зонування територій країни, регіонів, міст і населених пунктів за територіями природного і техногенного ризиків [18,19].

Територія міста з урахуванням переважного функціонального призначення поділяється на селітебну, виробничу і ландшафтно-рекреаційну.

Селітебна територія має таке призначення: розміщення житлового фонду, громадських будівель і споруд (в т.ч. науково-дослідних комплексів), а також окремих комунальних і промислових об'єктів, які не вимагають утворення санітарно-захисних зон; будівництво шляхів міського сполучення, вулиць, площ, парків, бульварів та інших місць загального користування.

Виробничу територію призначено для розміщення промислових підприємств і пов'язаних з ними об'єктів, комплексів наукових установ з дослідними виробництвами, комунально-складських об'єктів, споруд зовнішнього та приміського транспорту.

Ландшафтно-рекреаційна територія включає міські ліси, лісопарки, лісозахисні зони, водойми, сільськогосподарські угіддя, які разом з парками і скверами селітебної території формують систему відкритого простору. Крім того, на територіях виділяються небезпечні зони.

Зона можливого небезпечного землетрусу – територія, в межах якої інтенсивність сейсмічного впливу становить сім і більше балів (визначається за картами сейсмічного районування відповідно до ДБН).

Зона вірогідного затоплення – територія, межі якої можуть бути вкриті водою внаслідок стихійного лиха або руйнування гідротехнічних споруд.

Зона вірогідного катастрофічного затоплення – територія, на якій можлива загибель людей, сільськогосподарських тварин і рослин пошкодження

або знищення матеріальних цінностей (в першу чергу будівель і споруд), а також збитки навколишньому середовищу.

Зона можливих небезпечних геологічних явищ – територія, у межах якої передбачається виникнення небезпечних геологічних явищ, що становлять загрозу життю і здоров'ю людей, завдають збитків економіці.

Зона можливого радіоактивного забруднення - територія або акваторія, на якій є можливим забруднення поверхні ґрунту, будівель і споруд, атмосфери, води. продуктів харчування радіоактивними речовинами, яке може викликати перевищення нижнього критичного значення доз опромінення населення.

Зона можливого хімічного зараження – територія. В межах якої внаслідок пошкодження або руйнування ємностей з хімічно небезпечними речовинами можливий викид в довкілля цих речовин в концентраціях або кількостях, які становлять загрозу для людей , тварин і рослин впродовж певного періоду.

Зона можливих руйнувань – територія міст. Інших населених пунктів і ОГ, на якій можливе виникнення надмірного тиску у фронті повітряної ударної хвилі, який складає 30 кПа і більше, а також сейсмічний вплив, що спричиняє руйнування будівель, споруд, комунікацій.

Зона можливого утворення завалів – частина зони можливих руйнувань, яка включає ділянки розташування будівель і споруд з прилеглою до них місцевістю, де слід очікувати обвалення будівельних конструкцій та утворення завалів.

Позаміська зона – територія, розташована за межами зон можливих руйнувань, можливого радіоактивного та хімічного забруднення, вірогідного кас трофічного затоплення, і може бути використана для евакуації населення.

Можливе часткове або повне накладання двох і більше зон можливої безпеки. На такі території запобіжні заходи проводяться від усіх видів небезпек відповідно до накладених зон.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд відновлюваних джерел енергії.
2. Представлено первинну конструкцію LCL-фільтра разом з іншими основними компонентами, необхідними для роботи всієї системи, такими як фотоелектрична система, трифазний MOSFET і контролер струму та напруги. Вся система була змодельована в MATLAB/Simulink.
3. Розглянуто фотоелектричну систему в цілому та схему фільтра. Висвітлено вплив гармонік на мережу, а також загальні типи фільтрів, що використовуються для пом'якшення їх впливу.
4. Наведено математичний опис (модель) і всі пов'язані з ним рівняння LCL-фільтра.
5. Розглянуто процедуру проектування та методику управління фотоелектричними модулями потужністю 210 кВт, підключеними до мережі. Аналіз і розрахунки LCL-фільтра були основними в даній роботі. Під час розрахунків використані наступні параметри: напруга, частота мережі, номінальна потужність і струм.
6. Проаналізовано вплив LCL-фільтра на мережеву систему. Розроблена раніше модель була реалізована в MATLAB/Simulink. Змодельована фотоелектрична система потужністю 210 кВт з інвертором, який постачає електроенергію в мережу. У першому сценарії система працює з напругою та струмом 600 В, що призводить до пульсацій та присутності високих гармонік. Після встановлення LCL-фільтра як пульсації, так і загальні гармонійні спотворення значно зменшилися. Оскільки напруга і струм мережі були синфазними, це свідчить про те, що система працювала коректно.
7. У другому сценарії було змодельовано ступінчасту зміну потужності, яка зросла з 210 кВт до 300 кВт. Використання запропонованого LCL-фільтра обмежило гармоніки нижче 2%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Коваль В. П. Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках / В. П. Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 204.

2. Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 70.

3. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.

4. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.

5. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10

6. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021

7. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я.

Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.

8. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.

9. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.

10. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

11. Стельмах С.С. Енергоефективність гідроакumuлюючих установок малої потужності // С.С.Стельмах, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 71.

12. Tomar, A., Mittal, A., & Sharma, S. (2018, October). PV-Piezo hybrid grid connected system. In 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES) (pp. 748-753). IEEE.

13. Zeb, K., Islam, S. U., Uddin, W., Ullah, K., Asghar, R., Busarello, T. D. C., & Kim, H. J. (2019, December). DC-link Voltage Regulation of Single-Phase

Grid-Tied PV System using Fuzzy-PI Controller. In 2019 15th International Conference on Emerging Technologies (ICET) (pp. 1-6). IEEE.

14. Mehiri, A., Hamid, A. K., & Almazrouei, S. (2017, December). The effect of shading with different PV array configurations on the grid-connected PV system. In 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 1-6). IEEE.

15. Bhattacharyya, S., Kumar, S., & Singh, B. (2020). Adaptive damped circular current limit control for PV grid-tied system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1197-1204.

16. Rushiraj, G. J., & Kapil, P. N. (2016, March). Analysis of different modulation techniques for multilevel inverters. In 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) (pp. 3017-3024). IEEE.

17. Rekioua, D., Rekioua, T., & Soufi, Y. (2015, November). Control of a grid connected photovoltaic system. In 2015 international conference on renewable energy research and applications (ICRERA) (pp. 1382-1387). IEEE.

18. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.

19. В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, О. В. Мельников. Основи охорони праці. — Вид. 2-е, стереотипне. — Львів: Афіша, 2000. — 348 с.