

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
(м. Київ)

Факультет Інформаційних технологій та електроніки
(повне найменування факультету)

Кафедра Електронних апаратів
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

спеціальності 171 – Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

на тему Дослідження особливостей використання багаторівневих перетворювачів в фотоелектричних системах

Виконав: студент групи Ел-22дм

Подрез Ю.С.
(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Керівник Паєранд Ю.Е.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри Паєранд Ю.Е.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Самойлова Ж.Г.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Київ - 2023

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 97 сторінок, 54 рисунки, 5 таблиць, 22 посилання.

Тема кваліфікаційної роботи: дослідження особливостей використання багаторівневих перетворювачів в фотоелектричних системах.

Об'єкт дослідження: DC-AC перетворювач струму.

Мета роботи: дослідження і проектування DC-AC перетворювача для фотоелектричних систем.

В процесі роботи проведені аналітичний огляд, виконані дослідження DC-AC перетворювачів і його компонентів, проведено моделювання запропонованої топології з використанням додаткових компонентів для зменшення загальних гармонічних спотворень (THD) за допомогою програми PSIM.

В результаті роботи підтверджена концепція запропонованого DC-AC перетворювача та показана його ефективність.

Робота виконана за період навчання в магістратурі з 01 вересня 2022 року по 31 грудня 2023 року на кафедрі «Електронні апарати» (завідувач кафедри, професор, канд. техн. наук Ю.Е. Паеранд).

DC-AC ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ІНВЕРТОР, ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПАНЕЛІ, ШІМ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД DC-AC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	9
1.1 Загальні відомості про типи перетворювачів.....	9
1.2 Мережеві системи відновлюваних джерел енергії.....	12
1.3 Топології багаторівневих перетворювачів.....	14
1.3.1 Концепція багаторівневих перетворювачів.....	14
1.3.2 Принципи роботи та управління багаторівневими перетворювачами	17
1.3.3 Особливості багаторівневих структур.....	18
1.4 Структури багаторівневих електронних перетворювачів / інверторів.....	19
1.4.1 Каскадні H-мости	19
1.4.2 Багаторівневий інвертор з фіксуєчими діодами	23
1.4.3 Багаторівневі перетворювачі з плаваючим конденсатором.....	25
1.5 Модифіковані топології багаторівневих перетворювачів.....	28
1.5.1 Узагальнена багаторівнева топологія.....	28
1.5.2 Гібридний багаторівневий перетворювач зі змішаним рівнем.....	29
1.5.3 Плавне перемикування багаторівневого перетворювача.....	31
1.5.4 Топологія багаторівневого перетворювача Back-to-Back	32
1.6 Стратегії ШІМ модуляції багаторівневого перетворювача.....	34
РОЗДІЛ 2. ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ	37
2.1 Технічні характеристики фотоелектричних модулів	39
2.2 Моделювання фотоелектричних комірок.....	42
2.2.1 Коефіцієнт якості кремнію.....	46
2.2.2 Моделювання послідовного опору.....	47
2.2.3 Інтенсивність випромінювання	48
2.2.4 Температура	50
2.3 Відстеження точки максимальної потужності (MPPT)	50
2.3.1 Метод збурень та спостережень (P&O).....	51
2.3.2 Метод інкрементної провідності (INC).....	53

2.3.3	Метод підйому на гору (НС).....	56
2.4	Перетворювачі що відстежують МРРТ.....	57
2.4.1	Перетворювач МРРТ з квазі-Z-джерелом.....	59
2.4.2	Підвищувальний перетворювач МРРТ.....	61
2.4.3	Понижуючий перетворювач МРРТ з методом збурення та спостереження.....	62
РОЗДІЛ 3. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ.....		65
3.1	Конфігурації систем відновлюваної енергетики.....	66
3.2	Інвертори для автономних систем відновлювальної енергетики.....	69
3.2.1	Надійність	69
3.2.2	Стійкість до перенапруги.....	70
3.2.3	Характеристика ефективності	71
3.3	Управління потоком потужності.....	72
3.3.1	Управління активною потужністю.....	72
3.3.2	Управління реактивною потужністю.....	74
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....		75
4.1	Інструмент моделювання.....	76
4.2	Технологія CSPWM.....	76
4.3	Топологія з кількома трансформаторами.....	83
4.4	Трифазні багаторівневі перетворювачі.....	87
ВИСНОВКИ		91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ		95

ВСТУП

Мережеві інверторні конструкції набувають все більшого значення у зв'язку зі збільшенням попиту на відновлювані джерела енергії. Як правило, звичайний дворівневий інвертор використовується для роботи від мережі. Проте, звичайний інвертор має високий ступінь гармонійних спотворень, які впливають на продуктивність електрообладнання. Зменшення спотворень вимагає додаткової фільтрації, щоб відповідати стандартам Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), для підключення розподільної генерації. Крім того, більш висока напруга постійного струму вимагає збільшення габаритів ланки постійного струму і допоміжних конденсаторів, які є дуже громіздкі при вищій напрузі, а також мають вищу швидкість зміни напруги по відношенню до часу (dV/dt), що призводить до перехідної перенапруги, яка може пошкодити обладнання наприклад, розподільчі пристрої через перевищення їх швидкості та насичення феромагнітних сердечників трансформаторів і двигунів, підключених до мережі. Звичайний дворівневий інвертор використовує відносно високу частоту комутації і велику послідовну індуктивність, підключену до вихідного ланцюга перетворювача для забезпечення необхідного коефіцієнта загальних гармонічних спотворень.

Для вирішення зростаючих викликів, пов'язаних з традиційним дворівневим інвертором, були введені багаторівневі інвертори як вдосконалене рішення для інверторів, пов'язаних з системою живлення. Багаторівневі інвертори складаються з кількох каскадних схем, і кожна схема розроблена для обробки частини загального вихідного сигналу (напруги). Концепція проектування схеми багаторівневого інвертора призводить до використання електронних компонентів з низькою частотою перемикачів і низькою номінальною напругою порівняно з традиційним дворівневим інвертором. Схемотехніка багаторівневого перетворювача дозволяє використовувати компоненти з MOSFET-перемикачів з низькими втратами потужності; отже, ефективність інверторної системи покращується.

Використана методика передбачає вдосконалення багаторівневого перетворювача через два кроки:

1. Обмеження рівня початкового сигналу для генерування нового модифікованого сигналу модуляції і, відповідно, нового сигналу широтно-імпульсної модуляції.

2. Використання послідовних трансформаторів на виході каскадних повно прохідних мостів багаторівневого інвертора.

Застосування трансформатора в кожній фазі каскадних інверторів з вторинною обмоткою, підключеною разом послідовно, зменшить високу dV/dt і внаслідок цього значно знизить вплив гармонік. Таке рішення змінює модуляційний сигнал для отримання кращих значень коефіцієнта загальних гармонічних спотворень і, отже, зменшує вимоги до фільтрації. Запропонована техніка синтезує напругу на виході з низькими гармонічними спотвореннями. У роботі також міститься аналіз і моделювання системи перетворення сонячної енергії; був симульований алгоритм відстеження максимальної точки потужності, яка забезпечує збільшення продуктивності сонячних панелей.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Загальні відомості про типи інверторів

Метою інверторів потужності є ефективне перетворення постійного струму (DC) на змінний струм (AC) - форму електрики, яку використовують сучасні споживачі. У інверторах є багато застосувань, де низьковольтні джерела DC, такі як батареї, сонячні панелі та паливні елементи, повинні бути перетворені на форму AC для живлення навантаження. Процес перетворення низьковольтної енергії DC в традиційному дворівневому конверторі виконується в два етапи: етап підсилення і етап перетворення. Перший етап підвищує низьку напругу DC до вищої напруги (до бажаного піку AC) за допомогою DC -підсилювача, в той час як другий етап інвертує підсилене джерело DC у AC форму за допомогою модуляції ширини імпульсів. Ці два етапи можуть періодично перемикатися. Якість DC-AC інверторів можна визначити за відтворюваними формами на виході. Перша форма - це модифікована синусоїда, а друга форма - це чиста синусоїда. Модифікована синусоїда створюється системою відкритого циклу інверсії, яка включає велику кількість гармонійних струмів та DC-струмів, і є ближчою до прямокутної хвилі, ніж синусоїда, до такого ступеня, що середньоквадратична та середня напруги є однаковими. Модифіковані синусоїдні інвертори є дешевшими за чисто синусоїдні інвертори. Тому вони є привабливими альтернативами на ринку. З іншого боку, чисто синусоїдні інвертори розроблені з використанням системи управління з замкнутим циклом, що робить їх складними та дорогими. Зазвичай вони надають фільтрований вихід чистої синусоїди без гармонік. Ці конвертори мають стабільний та контрольований вихід. Це може бути використано для роботи з дуже чутливими і критичними навантаженнями, з якими модифікована синусоїда не може працювати. Ця форма змінного струму зменшує високий рівень шуму у флуоресцентних лампах і може працювати з індуктивними навантаженнями, такими як машини, завдяки відсутності гармонійних спотворень [1].

Існує два типи інверторів: звичайний дворівневий інвертор і багаторівневий інвертор. Простіше кажучи, багаторівневий інвертор складається з декількох ступенів дворівневих інверторів з різними кутами розгорнення, щоб зберегти синусоїдальну форму синусоїдальної форми. На рис. 1 показано форму сигналу звичайного та багаторівневого перетворювачів, якщо джерело постійного струму 250 В. У роботі взято за основу багаторівневі перетворювачі для покращення технічних характеристик перетворювального пристрою. Багаторівневий перетворювач є одним з найновіших і ефективніших інверторів, який забезпечує відповідну і керовану форму змінного струму енергії з будь-якої постійної напруги на вході. Багаторівнева інверсія привертає значну увагу дослідників протягом останнього десятиліття для багатьох діапазонів потужності застосувань. Запропоновано і досліджено декілька схемотехнічних рішень для застосування в електроенергетиці та електроприладах. Ці перетворювачі (інвертори) використовуються у пристроях з високою напругою і високою потужністю, оскільки вони досить гнучкі і дозволяють синтезувати форму вихідного сигналу з меншою кількістю гармонік струму і досягти більш високої напруги при обмеженому максимальному рівні [2].

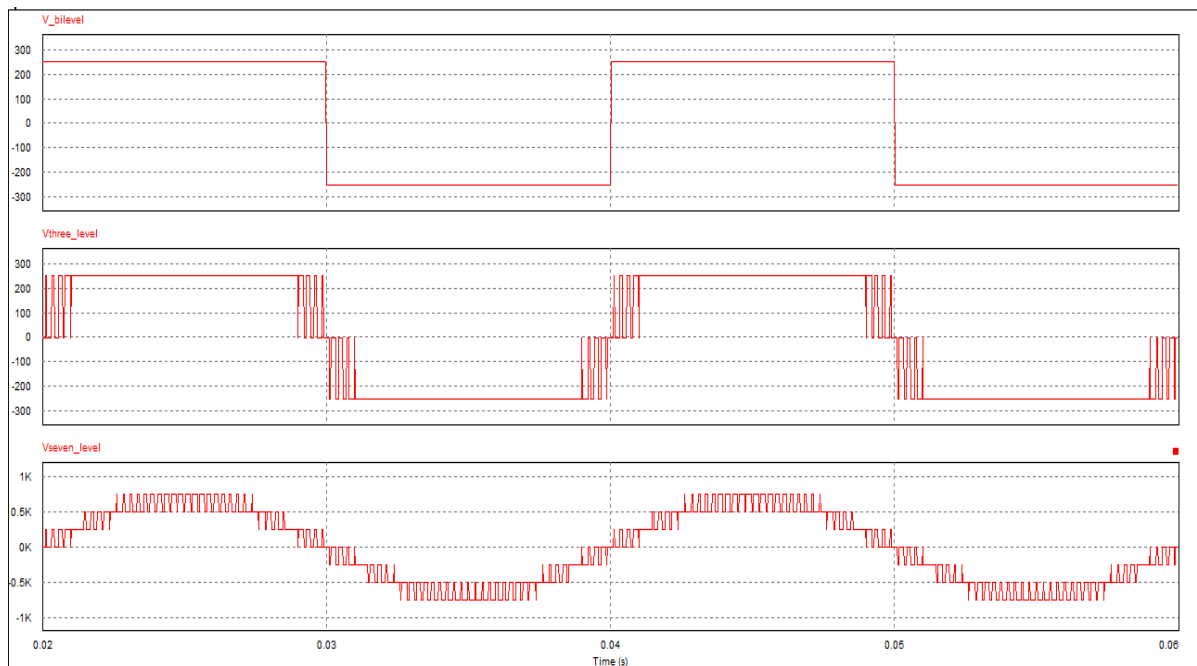


Рисунок 1. - 2-рівневі, 3-рівневі та 7-рівневі форми сигналу

Багаторівневі перетворювачі (інвертори) підходять для деяких промислових застосувань, які потребують системи підвищеної потужності для живлення двигунів середньої напруги. З технічної точки зору, підключення одного силового напівпровідникового перемикача безпосередньо до мережі середньої напруги є складним завданням. Тому багаторівнева структура перетворювача може бути запропонована як альтернатива в системах високої та середньої напруги. Вона дозволяє досягти високих номінальних потужностей від постачальників відновлюваної енергії з низьким вмістом відновлюваних джерел. Відновлювані джерела енергії, такі як вітер, фотоелектричні та паливні елементи, можуть бути зібрані багаторівневим перетворювачем і передані лініями постійного струму високої напруги для застосування у високовольтних системах [3]. Багаторівневі перетворювачі/інвертори використовуються в системах середньої та великої потужності, таких як гнучкі системи передачі змінного струму, потужні електроприводи та тягові електромобілі. Багаторівневі інвертори забезпечують гнучкість у досягненні вищої напруги при більшій потужності, ніж звичайні дворівневі інвертори напруги. Вони мають багато переваг, таких як менший рівень вихідної напруги і dV/dt , краща електромагнітна сумісність, менше гармонік і компонентів постійного струму і, нарешті, менші втрати на комутацію.

Існує три загальновідомі типи багаторівневих перетворювачів: перетворювачі з діодною фіксацією, з плаваючими конденсаторами і каскадні H-мостові перетворювачі. Звичайна каскадна топологія є найбільш важливою і використовуваною топологією. Вона вимагає меншої кількості силових електронних компонентів для створення вихідних рівнів і може використовувати джерела низької та/або високої напруги. Каскадний багаторівневий перетворювач містить ряд повномостових схем, з'єднаних каскадом або послідовно, зі спільним або окремими джерелами постійного струму для кожної з них. У симетричних каскадних багаторівневих перетворювачах джерела постійного струму повинні бути однаковими. У цих топологіях джерела постійної напруги різних елементів нерівнозначні. Асиметричні каскадні багаторівневі топології дозволяють збільшити величину рівнів сигналу на виході при тій же кількості силових електронних ключів.

Однак цей перетворювач потребує великої кількості односпрямованих перемикачів. Перемикачі та комутаційні схеми є найбільш важливою частиною багаторівневих перетворювачів, які визначають вартість, швидкість, надійність, ефективність та складність процесу перетворення [4].

1.2 Мережеві системи відновлюваних джерел енергії

На сьогоднішній день джерела енергії вимагають відносно високих витрат на встановлення. Однак вони є єдиним практичним вибором і застосовуються в умовах, коли витрати на розширення інженерних комунікацій перевищують вартість їх впровадження. У деяких випадках для виконання цієї умови достатньо кількох кілометрів. Такі умови існують у великих і розвинених державах, таких як Сполучені Штати, Китай, Україна та Європейський Союз. Слід зазначити, що близько двох мільярдів людей проживають в районах, де немає підключення до електричної мережі.

І ця цифра дивовижним чином зростає з кожним днем. Тому за останні два десятиліття потреба в мережевому постачанні відновлюваної енергії стала більш критичною. Незалежно від розвіданих ресурсів відновлюваної енергії, розміру їхньої генерації та місця розташування, слід зазначити, що відновлювана енергія, яка генерує постійний струм, повинна бути перетворена і підключена до електричної системи змінного струму. Фотоелектричні системи та системи на паливних елементах є найпопулярнішими генераторами постійного струму. Тому поява високоефективних перетворювачів забезпечує відносно доступну і дешеву конструкцію. Зрозуміло, що пристрій, який може перетворювати постійну напругу в змінну, є ключовим елементом і найбільш важливою частиною мережевих систем відновлюваної енергетики (англ. Grid-Based Renewable Energy Systems) GBRES. Еволюційні багаторівневі перетворювачі постійної напруги в змінну зазнали стрімкого розвитку та покращення характеристик з 1981 року, коли академічний дослідник А. Набае запропонував перший прототип багаторівневого перетворювача на конференції IEEE [5]. З того часу багато авторів запропонували різні топології

багаторівневих перетворювачів, які використовуються для широкого спектру енергетичних систем.

Мережеві інверторні системи набувають все більшого значення у зв'язку зі збільшенням попиту на відновлювані джерела енергії. Зазвичай для роботи від мережі використовується дворівневий ШІМ-інвертор. Однак, дворівневий інвертор схильний до проблем гармонійних спотворень. Він дуже вразливий до будь-яких електромагнітних перешкод, таких як радіопередачі, для усунення яких потрібна додаткова фільтрація. Також потрібні складні та високовольтні конденсатори ланки постійного струму, оскільки інвертор живиться від одного джерела і не може бути розділений на багато рівнів. Крім того, гармонійні струми і висока напруга (напруга) змінюються з часом (dV/dt), викликаючи нагрівання осердя ротора в машинах і осердя трансформаторів через вихрові струми. Тому в дворівневому інверторі або частота перемикачів повинна бути високою, або потрібна більша індуктивність вихідного фільтра, щоб задовольнити необхідний загальний коефіцієнт гармонійних спотворень (ТНД). Стандарт IEEE 519 був вперше введений в 1981 році для забезпечення керівництва щодо якості електроенергії (спотворень) силової електроніки. Стандарт IEEE 1547 був вперше розроблений у 1999 році, а пізніше затверджений у 2003 році для забезпечення керівництва щодо з'єднання розподілених ресурсів з електроенергетичними системами [6]. З того часу цей стандарт неодноразово переглядався, і в ньому вказано максимальний рівень ТНД, дозволений для з'єднання. Щоб впоратися з проблемами, пов'язаними з дворівневим інвертором, для інверторів, що підключаються до мережі, впроваджуються багаторівневі перетворювачі. Ця робота включає три основні етапи:

По-перше, це включає побудову кращих систем взаємодії між мережею та джерелами енергії постійного струму, які відповідають вимогам систем розподілу, таким як висока потужність, 3-фазне з'єднання, регулювання напруги та статична компенсація нестабільності напруги (VAR).

По-друге, запропоновано схеми для покращення характеристик багаторівневих перетворювачів. Запропонована методика передбачає додавання трансформаторів на кожному рівні каскадних інверторів для зменшення високого dV/dt і подальшого

усунення гармонік струму. Також запропоновано метод модуляції для отримання форми сигналу з меншим загальним коефіцієнтом гармонік. Запропонована багаторівнева методика синтезує вихідну напругу змінного струму з низьким рівнем гармонічних спотвореннями, низькими вимогами до фільтрів та втратами енергії.

Нарешті, аналіз продуктивності запропонованих багаторівневих перетворювачів успішно проведено за допомогою програмних продуктів MATLAB Simulink і PSIM.

1.3 Топології багаторівневих перетворювачів

1.3.1 Концепція багаторівневих перетворювачів

Концепція багаторівневих перетворювачів з'явилася нещодавно. Набає та ін. започаткували перші кроки в багаторівневих структурах перетворення, запровадивши трирівневу топологію перетворювача із затискачем нейтральної точки. Вони виявили, що отримана форма сигналу демонструє кращі спектральні характеристики порівняно зі звичайною дворівневою напругою. Бхагват і Стефанович підтвердили, що формування сигналу з більшою кількістю рівнів покращує спектральну структуру вихідного сигналу [7]. Тому базову топологію з фіксацією нейтральної точки було розширено до більшої кількості рівнів сигналу, використовуючи ту саму концепцію фіксації дискретних рівнів за допомогою діодів. Для опису трирівневої форми сигналу було введено термін "багаторівневий". Згодом були запропоновані і використані численні топології багаторівневих інверторів. Практичний принцип багаторівневих перетворювачів полягає в тому, щоб досягти високої амплітуди сигналу змінного струму від менших джерел DC за допомогою серії силових електронних перемикачів. Перетворення енергії перетворення енергії відбувається за допомогою певної основної частоти. Елементами джерел постійного струму є лінії постійного струму високої напруги (HVDC), заряджені конденсатори, відновлювані джерела енергії та акумулятори. Досягнення високої ступінчастості напруги змінного струму на виході вимагає підключення силових електронних перемикачів з

певною контрольованою послідовністю для використання цих декількох джерел постійного струму. Вибір силових електронних перемикачів визначається шляхом оцінки компромісу певних обмежень, оскільки різні типи комутаційних елементів мають різні межі потужності, частоти перемикання та напруги. Вони описані на рис.2.

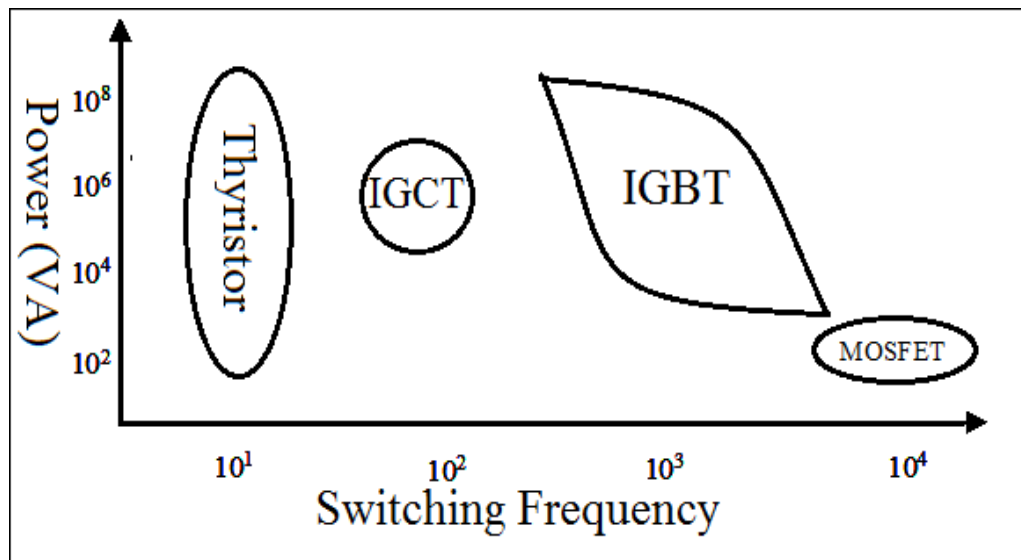


Рисунок 2. - Характеристики потужності та частоти силових електронних перемикачів

Багаторівневі форми сигналу можуть бути досягнуті за допомогою серії одиночних повно-мостових перетворювачів відомих як Н-мостові перетворювачі, як показано на рис. 3. Схема Н-мостової комірки просто побудована на чотирьох основних перемикачах і чотирьох вільно обертаючихся шунтуючих діодах. Кожна Н-мостова комірка виробляє трирівневу форму сигналу. Н-мостова комірка є базовою підсхемою для побудови перетворювача з більш ніж 3 рівнями, що досягається послідовним з'єднанням багатьох комірок. Отримана структура називається каскадним повним Н-мостом. Механізм роботи і послідовність перемикання буде описано далі в цьому розділі.

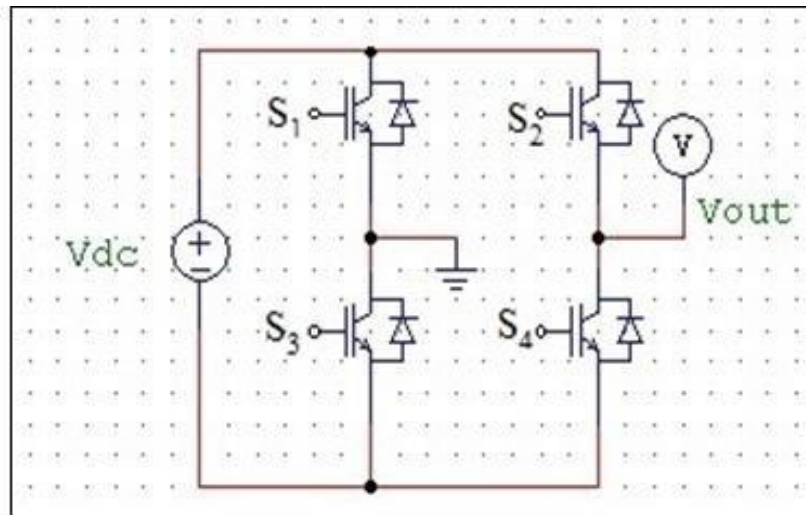


Рисунок 3. - Повномостовий тривірневий перетворювач в PSIM

На додаток до підвищення якості спектра сигналу, багаторівневі перетворювачі суттєво зменшують напругу на навантаженні. Такі багаторівневі інвертори широко відомі як інвертори з фіксуєчими діодами. Однак багаторівневі перетворювачі неминує мають деякі недоліки. Найбільш помітним недоліком є потреба у більшій кількості силових електронних перемикачів, ніж у звичайних інверторів. Незважаючи на те, що в багаторівневому перетворювачі можна використовувати перемикачі з меншою потужністю, кожен перемикач вимагає допоміжного ланцюга перемикачів приводу затвора. Це призводить до подорожчання і ускладнення системи перетворення. У випадку перетворювачів з фіксуєчими діодами важливо використовувати кілька діодів послідовно на каскадах вищого рівня. Напруга замикачів діодів збільшується відповідно до послідовності рівнів; отже, перетворювач з більшою кількістю рівнів може бути громіздким. Щоб подолати цю проблему, компанія Meupard розробила і протестувала нову багаторівневу топологію інвертора. У цій топології фіксуєчі діоди були замінені на плаваючі конденсатори. Плаваючі конденсатори визначають напругу на перемикачах. Інвертори з притискними конденсаторами також відомі як інвертори з плаваючими конденсаторами [8].

1.3.2 Принципи роботи та керування багаторівневими перетворювачами

Схеми керування перемиканням затворів у багаторівневих перетворювачах, як правило, використовують дворівневу широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) на основі несучої. Різні методи дворівневих інверторів на основі несучої були розширені багатьма дослідниками. Найбільш популярна і практична методика використовує багато трикутних сигналів-носіїв і один опорний сигнал модуляції. На рис. 4 зображено простий метод на основі несучої, який використовується у звичайному дворівневому інверторі та багаторівневому перетворювачі.

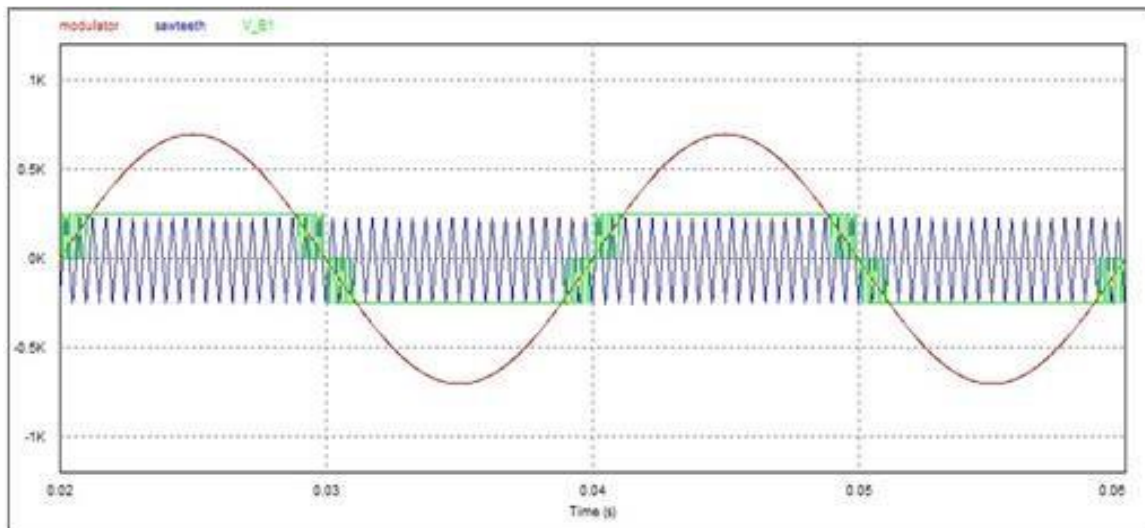


Рисунок 4. - Метод ШІМ на основі несучої при частоті перемикання 1 кГц

Якщо джерело постійного струму на Н-мостовий перетворювач на рис. 3 становить 250 вольт, форма вихідного сигналу буде такою, як показано на рис. 5.

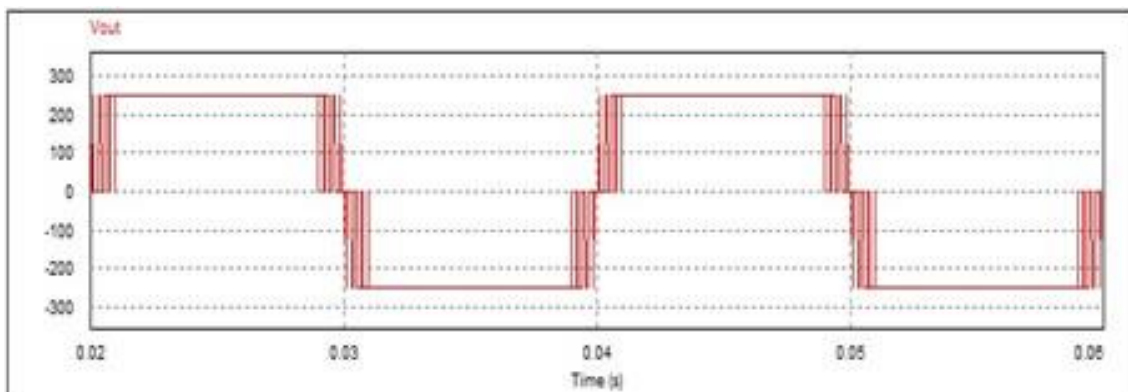


Рисунок 5. - Форма вихідної багаторівневої напруги з кількістю Н-мостів = 1

Кількість рівнів вихідного сигналу каскадної структури повного Н-моста задається $2s+1$, а крок напруги для кожного рівня задається V_{dc} , де (s) - кількість каскадів Н-моста. На рис. 5 показано результуючий вихід, якщо ($s = 1$) і напруга на рівні V_{dc} дорівнює 250. По суті, трирівневий інвертор є найпростішим інвертором, що використовує каскадну структуру з одним джерелом постійного струму. В одній комірковій структурі послідовність перемикачів така, як показано в таблиці (1). Цей підхід був протестований і використовується в додатках для підключення до електромереж.

Таблиця 1: Послідовність перемикачів інвертора трьох рівнів напруги

Перемикачі увімкнені	Рівень напруги
S1,S2	V_{dc}
S3,S4	$-V_{dc}$
Немає перемикача	0

1.3.3 Особливості багаторівневих структур

Багаторівневі перетворювачі мають очевидні переваги над звичайними перетворювачами, які потребують вищої частоти перемикачів в широтно-імпульсній модуляції (ШІМ). Крім того, ступінчаста форма сигналу має кращу якість і привабливіші характеристики, ніж дворівнева форма сигналу. По-перше, вона не тільки містить дуже низькі спотворення, але й може мінімізувати напругу (dV/dt). Отже, труднощі з електромагнітною сумісністю можуть бути зведені до мінімуму. Багаторівневі перетворювачі виробляють меншу напругу спільного режиму. Тому напруга на клеммах двигуна, підключеного до багаторівневого моторного приводу, може бути зведена до мінімуму. Крім того, напруга спільного режиму може бути додатково знижена за допомогою запропонованих вдосконалених стратегій модуляції, які будуть пояснені пізніше. По-третє, багаторівневі інвертори можуть формувати змінний струм з низьким вмістом гармонік. По-четверте, частота

перемикання: багаторівневі інвертори можуть керуватися як основною, так і високою частотою перемикання в підсхемі перемикання ШІМ. Варто зазначити, що більш низька частота перемикання по суті призводить до менших втрат на перемикання і кращої ефективності, ніж висока частота перемикання, але з електромагнітними перешкодами. За останні роки було запропоновано багато топологій багаторівневих структур. Сучасні дослідження відкрили нові топології та інтелектуальні схеми модуляції. У літературі описано три різні основні багаторівневі структури перетворювачів: каскадні Н-мостові інвертори з декількома джерелами постійного струму, з діодним замиканням (з замиканням на нейтралі) та з плаваючими конденсаторами (з замиканням на конденсаторі). Крім того, для багаторівневих перетворювачів було розроблено багато схем модуляції і парадигм керування для зменшення гармонійних струмів і спотворень, включаючи синусоїдальну широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ), селективне усунення гармонік (SHE-PWM) і просторово-векторну модуляцію (SVM). Нарешті, багаторівневий перетворювач має численні промислові застосування в середньовольтних системах, гнучких системах передачі змінного струму, моторних приводах, сполученні розподільних систем з генераторами постійного струму, корекції коефіцієнта потужності і системах тягового приводу.

1.4 Структури багаторівневих електронних перетворювачів / інверторів

1.4.1 Каскадні Н-мости

Структура однофазного каскадного інвертора з 7-рівневою формою сигналу показана на рис. 6. Три незалежні джерела постійного струму ($V_{dc}=250$) підключені до трьох однофазних повномостових (Н-мостових) елементів. Кожен з Н-мостових елементів генерує три різні вихідні рівні напруги: $+V_{dc}$, 0 і $-V_{dc}$. Для синтезу вихідної напруги змінного струму (V_{out}) з джерел постійного струму необхідна послідовність

перемикання для керування чотирма перемикачами (S1, S2, S3 і S4) кожної комірки. Комутаційний ланцюг керується ШІМ за допомогою компаратора трикутних хвиль. Для отримання $V_{out} = +250$, перемикачі S1 і S4 повинні бути увімкнені, в той час як $V_{out} = -250$ можна отримати, якщо увімкнути перемикачі S2 і S3. Будь-яка інша послідовність перемикання, наприклад, увімкнення (S1 і S2) або (S3 і S4), дає вихідну напругу $V_{out} = 0$. Три виходи форми сигналу кожного з цих трьох рівнів повного мостового інвертора з'єднані послідовно для синтезу загальної вихідної напруги $V_{out} = V_{o1} + V_{o2} + V_{o3}$, яка має $(2 * (\text{кількість комірок}) + 1) = 7$ рівнів напруги, а саме (0, 250, 500, 750, -250, -500, -750), тобто кількість рівнів вихідної напруги (m) в каскадному інверторі визначається як $m = 2s + 1$, де s - кількість джерел постійного струму або елементів Н-моста. Наприклад, осцилограма фазної напруги для 7-рівневого каскадного Н-мостового інвертора з 3 джерелами постійного струму і 3 повними мостами показана на рис. 6, а осцилограми напруги інвертора - на рис. 7.

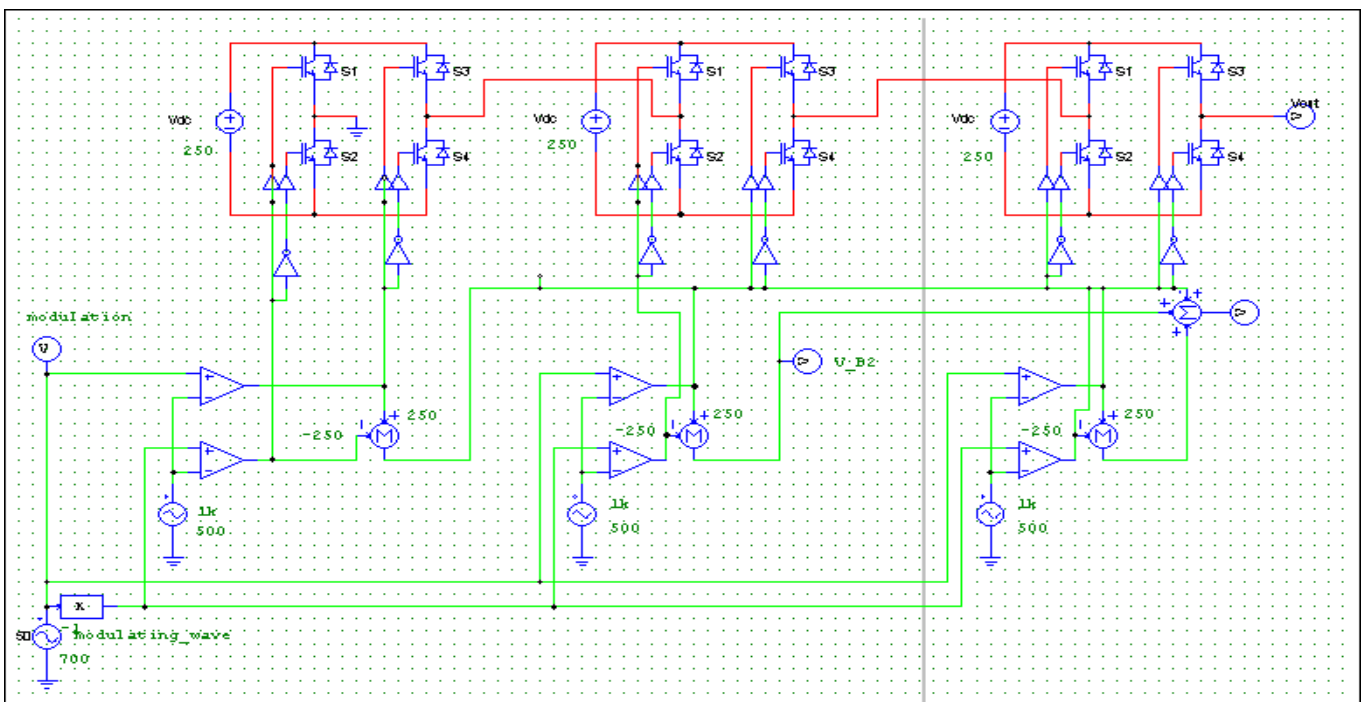


Рисунок 6. - Однофазна структура 7-рівневого каскадного перетворювача

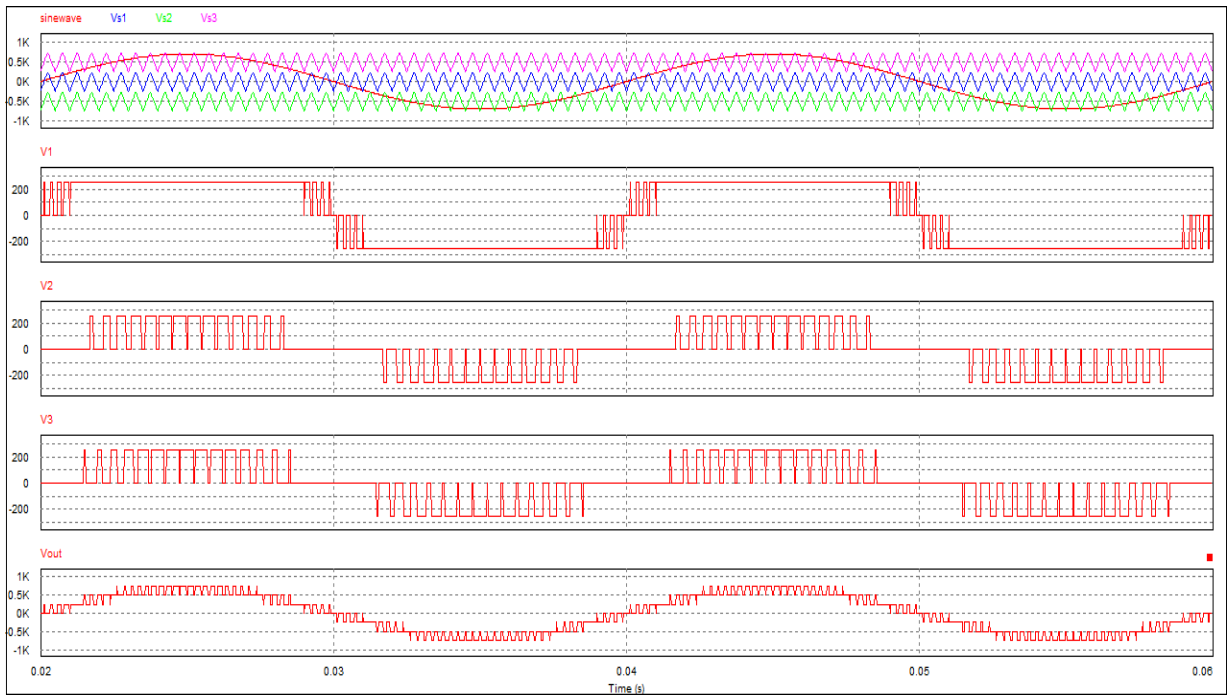


Рисунок 7. - Хвилі рівнів та загальна форма вихідного сигналу 7 рівнів

Багаторівневі каскадні перетворювачі застосовуються в багатьох сферах, наприклад, як статичний вольт-амперний генератор компенсації реактивної потужності (VAr), яким можна керувати для корекції коефіцієнта потужності в розподільчих системах. Його здатність працювати як випрямляч та інвертор дозволяє проектувальникам реалізовувати перетворювачі типу "back-to-back". Він може випрямляти змінний струм, а потім знову інвертувати вихідний постійний струм в змінний з кутом зсуву фаз. Перетворювач може бути безпосередньо включений послідовно в лінії електромережі для створення статичного вольтододаткового пристрою з метою регулювання напруги в системі передачі електроенергії та/або корекції коефіцієнта потужності в системі розподілу електроенергії. У випадку трифазних каскадних інверторів, вони можуть бути з'єднані як у формі "шини", так і в формі "дельти". Пенг розробив прототип каскадного багаторівневого перетворювача для генерації статичної напруги [9]. Прототип підключений паралельно до електромережі, яка може споживати реактивний струм від реального постачальника струму. Цей перетворювач, під керуванням замкнутого контуру, може або регулювати напругу зсуву мережі, або підвищувати коефіцієнт ПС, що подається від реальної генерації. Багаторівневий каскад може бути ефективним інтерфейсом

між утилітою та відновлюваними джерелами енергії постійного струму, а також для додатків на основі акумуляторних батарей. Каскадні інвертори ідеально підходять для підключення розподільчих генераторів або малих генераторів Smart Grid, оскільки вони можуть використовувати окремі невеликі джерела ПС (фотоелектричні або паливні елементи), а потім об'єднувати вихідну змінну напругу. Крім того, багаторівневі перетворювачі можуть жити системою струмом з низьким рівнем гармонік і низькими вимогами до фільтрації, що позитивно впливає на якість електроенергії.

Ще одним унікальним застосуванням каскадних перетворювачів є їх використання в головному тяговому приводі електромобілів, де багато ультраконденсаторів та/або потужних акумуляторів постійного струму використовуються як джерело постійного струму для живлення двигуна. Крім того, каскадний перетворювач може бути випрямлячем або зарядним пристроєм для батарей або конденсаторів електромобіля, коли транспортний засіб підключено до зарядної мережі змінного струму. Крім того, каскадний перетворювач може служити випрямлячем в системах рекуперативного гальмування звичайних автомобілів.

Отже, конвертери мають як переваги, так і недоліки. До переваг можна віднести наступні: Кількість рівнів вихідного сигналу більш ніж удвічі перевищує кількість джерел ПС ($m=2s+1$). Серія H-мостів полегшує проектування і монтаж, оскільки виробник може виготовити комірки, і ці комірки можна каскадувати, щоб отримати потрібну кількість вихідних міток. Таким чином, пакування та виробничі етапи будуть оброблятися економічно і швидко.

Незважаючи на ці переваги, багаторівневі каскадні перетворювачі не можна використовувати в лініях постійного струму високої напруги (HVDC), які складаються з одного джерела постійного струму. Конструкція перетворювача розрахована на живлення окремими джерелами ПС для кожного з H-образних мостів. Таким чином, ці структури перетворювачів використовуються в тих випадках, коли вже є кілька окремих джерел ПС.

1.4.2 Багаторівневий інвертор з фіксуєчими діодами

Набає, Такахаші та Акагі запропонували перетворювач нейтральної точки в 1981 році [10]. Перетворювач в основному є трирівневим перетворювачем з фіксуєчими діодами. Різні автори запропонували багато парадигм перетворювачів з фіксуєчими діодами з експериментальними результатами чотирьох, п'яти та шестирівневих вихідних форм сигналу. Конструкція перетворювача з фіксуєчими діодами використовується в багатьох додатках, таких як статичні генератори компенсації VAR, керування змінною швидкістю моторних приводів, а також для інтерфейсу з'єднань системи високої напруги постійного струму (HVDC) з утилітою. Чотирирівневий перетворювач з фіксуєчими діодами показано на рис. 8. Рівні (150, 450, -150 і -450). Загальна напруга постійного струму повинна бути розділена чотирма конденсаторами на чотири номінали (150, 300, -150 і -300). Напруга на кожному конденсаторі позначена цими рівнями напруги, які є напругою на кожному перемикаючому пристрої через притискні діоди. На рис. 9 показано 4-рівневу сходову форму вихідної напруги.

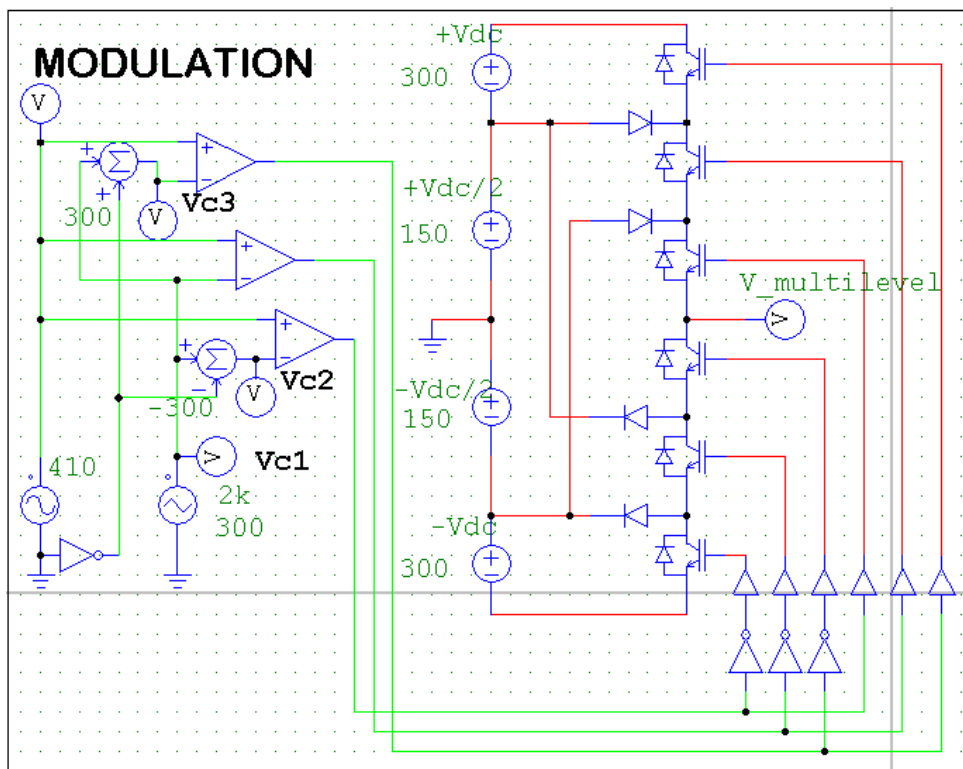


Рисунок 8. - 4-рівнева структура перетворювача з фіксуєчими діодами

Перетворювач на діодах має M -рівневу форму вихідної напруги. Кількість рівнів вихідної напруги (M) для побудованої структури - це кількість конденсаторів, які розділяють напругу від джерела на декілька рівнів. Кожен активний перемикаючий пристрій повинен блокувати лише один рівень напруги. Фіксуючі діоди вимагають різних номіналів зворотної напруги залежно від того, який рівень напруги блокується.

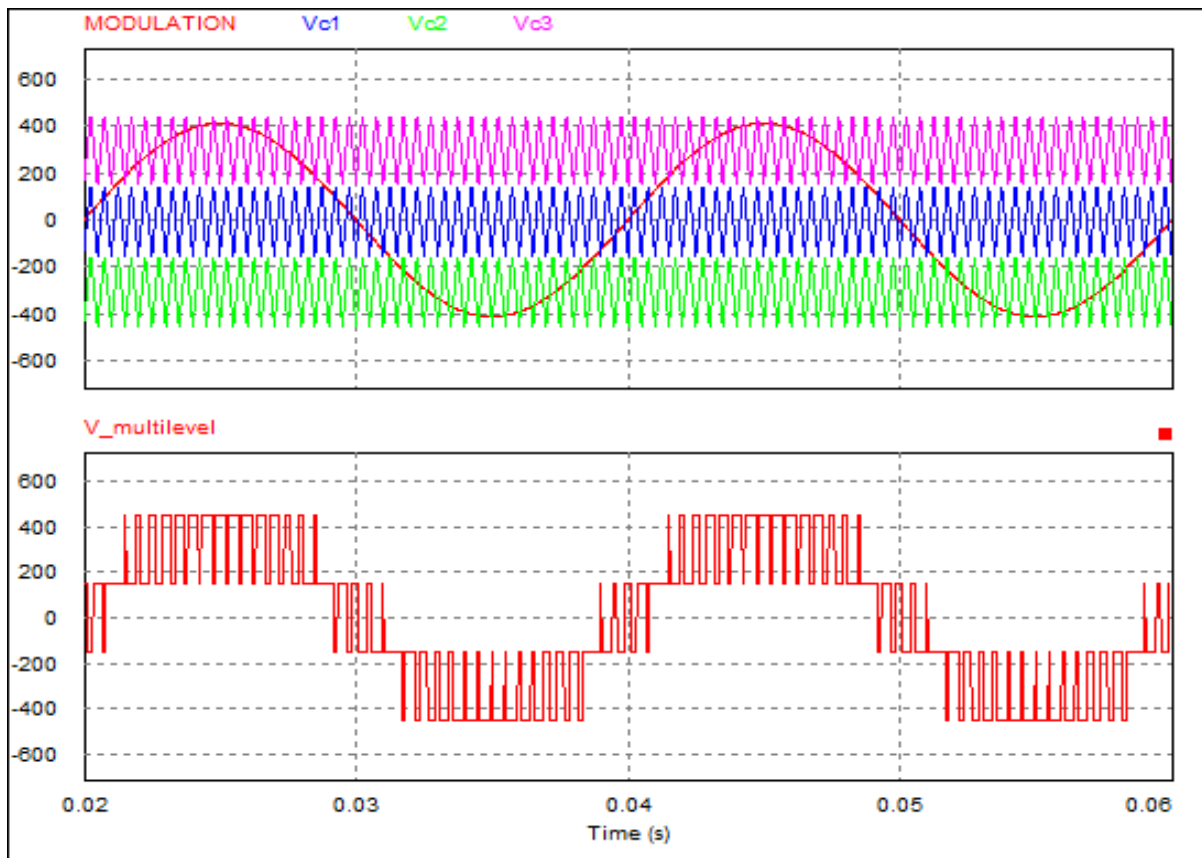


Рисунок 9. - Форма сигналу напруги для 4-рівневого перетворювача з фіксуючими діодами

При трифазному інвертуванні загальна шина постійного струму може живити три фази перетворювач. Інтерфейс між високовольтними лініями електропередачі постійного струму (HVDC) і високовольтними лініями електропередачі змінного струму (HVAC) є основним застосуванням багаторівневого перетворювача з фіксуючими діодами. Існує також багато інших застосувань, наприклад, в електромобілях з регульованою швидкістю обертання двигунів середньої напруги (від 2,4 до 13,8 кВ).

Таким чином, перетворювачі з фіксуєчими діодами можуть бути побудовані для отримання трифазного виходу з декількома рівнями напруги лише з однієї загальної шини постійного струму. Тому вимоги до ємності перетворювача низькі. Таким чином, топологія "back-to-back" є дуже практичною для таких застосувань, як високовольтне з'єднання "back-to-back" і регульоване керування швидкістю. Набір розділових конденсаторів напруги може бути попередньо заряджений до розрахункових номіналів окремо або групою. Цей перетворювач має дуже високий коефіцієнт корисної дії, коли основна частота перемикання висока. Однак вихідна напруга діодних перетворювачів не є постійною, оскільки контроль і моніторинг розряду і перезаряду проміжного конденсатора за рівнем ПС є дуже складним. Тому реальний потік потужності важко контролювати. На відміну від каскадного перетворювача, перетворювачі з фіксуєчими діодами повинні бути зібрані в одну схему. Кількість необхідних фіксуєчих діодів все більше залежить від кількості вихідних рівнів, що може зробити перетворювачі з великою кількістю рівнів громіздкішими, складнішими і з відносно високим падінням напруги.

1.4.3 Багаторівневі перетворювачі з плаваючим конденсатором

У 1992 році було запропоновано перетворювач на основі плаваючого конденсатора (FLC - flying capacitor converter) [11]. Це нова розроблена структура, похідна від перетворювача з фіксуєчими діодами. Різниця полягає в тому, що цей перетворювач має конденсатори замість використання фіксуєчих діодів. Топологія структури "плаваючого конденсатора" показана на рис. 10. Ця топологія має паралельну структуру конденсаторів постійного струму для живлення рівнів. Таким чином, амплітуда напруги на кожному конденсаторі відрізняється від амплітуди напруги на інших конденсаторах. Іншими словами, різниця напруг між двома сусідніми конденсаторами визначає кроки рівня напруги у вихідній багаторівневій формі сигналу.

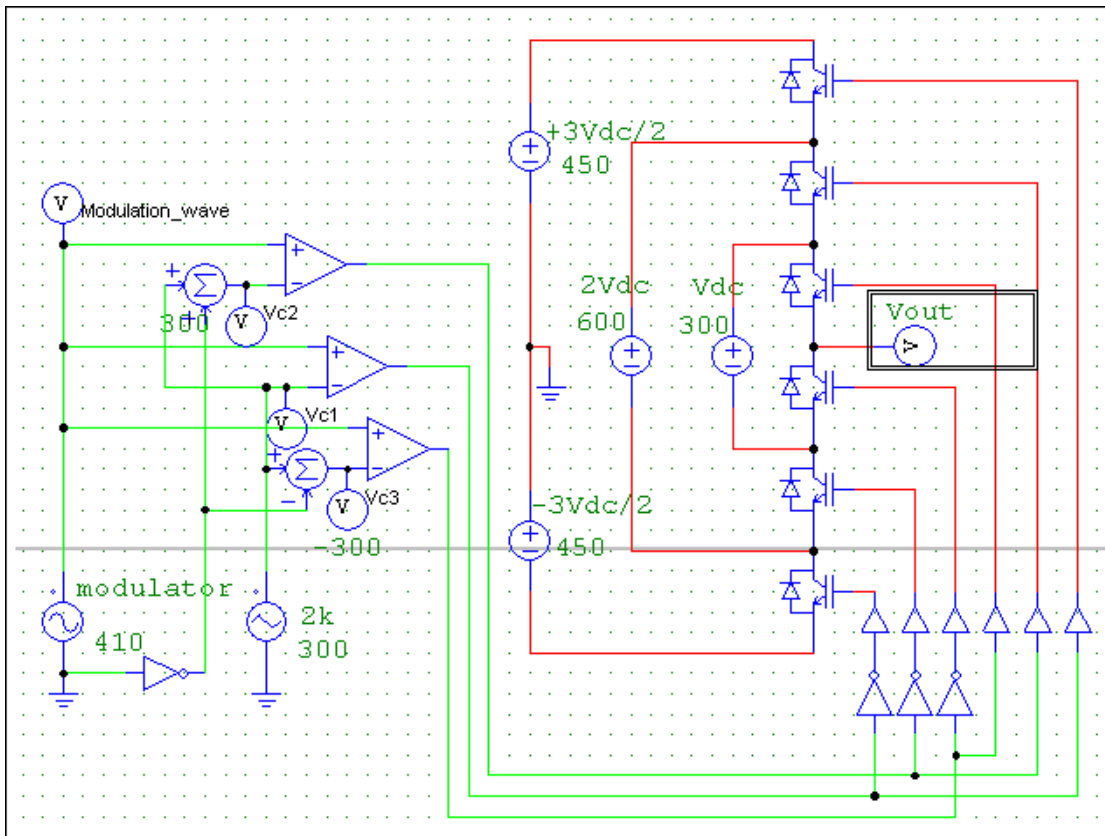


Рисунок 10. - Багаторівневий перетворювач з плаваючим конденсатором

Надлишковість внутрішніх рівнів напруги вважається основною перевагою перетворювача з плаваючим конденсатором. Таким чином, дві або більше правильних послідовностей перемикачів можуть дати однакову форму вихідного сигналу. Крім того, для послідовної послідовності перемикачів не обов'язково, щоб усі перемикачі були у провідному (увімкненому) положенні. З іншого боку, перетворювач з фіксуєчими діодами вимагає цього. Крім того, перетворювачі з плаваючим конденсатором мають фазову надмірність, тоді як перетворювачі з фіксуєчими діодами мають лише міжлінійну надмірність. Надлишковість конденсаторного перетворювача дозволяє вибрати зарядку або розрядку певних конденсаторів і може бути інтегрована з системою управління комутаційною схемою для балансування напруг на різних рівнях вихідної форми сигналу. На рис. 11 показано форму вихідного сигналу чотирирівневого багаторівневого перетворювача з плаваючим конденсатором, описаного вище.

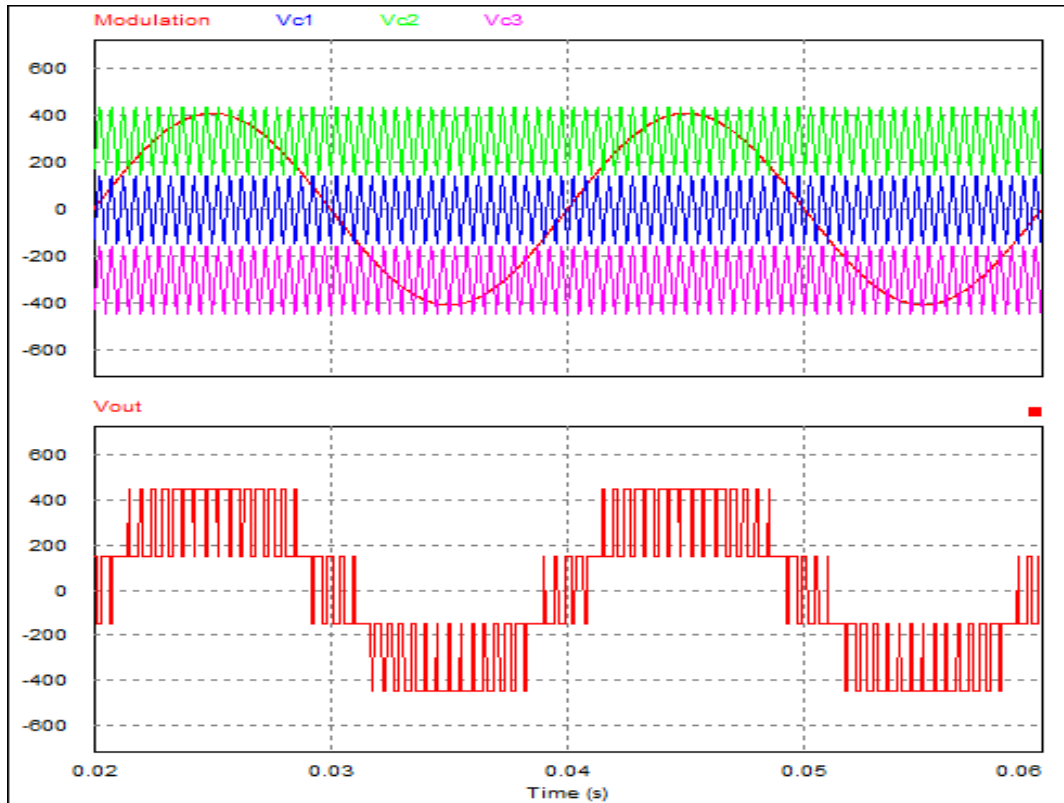


Рисунок 11. - 4-рівнева форма вихідного сигналу багаторівневого перетворювача з плаваючим конденсатором

Конденсаторні перетворювачі M -рівня потребують $(M-1) \times (M-2)/2$ допоміжних конденсаторів на додаток до основних $(M-1)$ конденсаторів на стороні постійного струму. Однак номінальна напруга кожного конденсатора ідентична номінальній напрузі основних перемикачів. Генерація статичної компенсації V_{Ar} є основним застосуванням багаторівневих конденсаторних перетворювачів.

Переваги багаторівневих перетворювачів з плаваючими конденсаторами можна підсумувати наступним чином: Вони мають різні фазні надлишки, які допомагають збалансувати рівні напруги, що забезпечуються повітряними конденсаторами постійного струму. Вони також можуть бути спроектовані для контролю потоку реальної та реактивної потужності по всій енергосистемі. Крім того, цей перетворювач може впоратися з короткочасними відключеннями електроенергії та глибоким падінням напруги, оскільки він має велику кількість конденсаторів.

Основними недоліками багаторівневих конденсаторних перетворювачів є необхідність використання високовольтних конденсаторів які спроможні працювати на високих частотах і більш складні принципи керування, та габарити.

1.5 Модифіковані топології багаторівневих перетворювачів

Окрім трьох базових багаторівневих топологій перетворювачів, які ми розглянули вище, було запропоновано багато інших топологій багаторівневих перетворювачів. Ці топології є гібридними та модифікованими структурами, які комбінуються з двома або більше з цих базових багаторівневих топологій. Як правило, ці комбінації багаторівневих топологій перетворювачів пропонуються і розробляються для вирішення конкретних енергетичних завдань. Для більш глибокого розуміння, деякі з них будуть коротко описані та ідентифіковані нижче.

1.5.1 Узагальнена багаторівнева топологія

Узагальнена топологія перетворювача, показана на рис. 12, є повністю модифікованою багаторівневою топологією, яка охоплює принцип оригінальних базових багаторівневих перетворювачів. Базові структури багаторівневих перетворювачів, такі як багаторівневі перетворювачі на діодах і конденсаторах, можуть бути отримані з узагальненої топології перетворювача. Ця топологія була запропонована Пенгом [12].

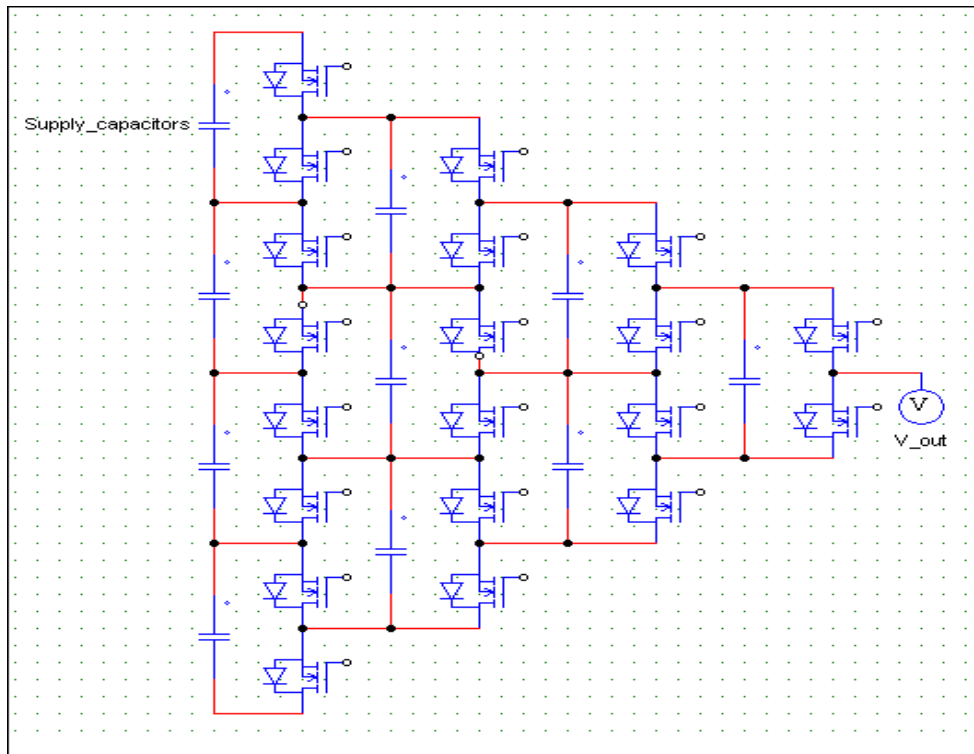


Рисунок 12. - Узагальнена топологія багаторівневого перетворювача

Ця багаторівнева топологія перетворювача може збалансувати кожен рівень напруги без будь-якої допомоги від допоміжних ланцюгів. Крім того, він може підтримувати баланс незалежно від характеристик навантаження, умов перетворення активної або реактивної потужності. Просто напруга на комутаційних пристроях, діодах або конденсаторах - це напруга постійного струму. Крім того, будь-який перетворювач з будь-якою кількістю рівнів, навіть звичайну дворівневу форму сигналу, можна практично отримати, використовуючи узагальнену топологію. Напруга кожного конденсатора ланки постійного струму дорівнює $1/(M-1)$, де M - кількість вихідних рівнів.

1.5.2 Гібридний багаторівневий перетворювач зі змішаним рівнем

Для мінімізації кількості окремих джерел DC (конденсаторів) багаторівневих перетворювачів у високовольтних (потужних) застосуваннях в якості комірки каскадного перетворювача можна використовувати діодні або конденсаторні перетворювачі з великою кількістю рівнів замість повномостового перетворювача.

Приклад показано на рис. 13. Дев'ятирівневий каскадний перетворювач складається з трирівневих з фіксуєчими діодами перетворювачів в якості елементарної комірки. Оригінальний каскадний багаторівневий Н-мостовий перетворювач вимагає чотирьох окремих джерел постійного струму для однієї фази і дванадцяти для трифазного перетворювача. Якщо п'ятирівневий перетворювач замінює повністю мостову комірку, рівні напруги подвоюються з кожної комірки. Таким чином, для досягнення тих самих дев'яти рівнів напруги для кожної фази, для одного фазного перетворювача потрібно лише два роздільних джерела постійного струму. Цей термін "гібридний перетворювач зі змішаним рівнем" використовується тому, що каскадний перетворювач містить багаторівневі комірки як основний будівельний блок. Основна перевага і призначення цієї топології полягає в тому, що вона вимагає меншої кількості джерел, розділених за ПС. Однак недоліком цієї структури є більша складність керування через її гібридну природу.

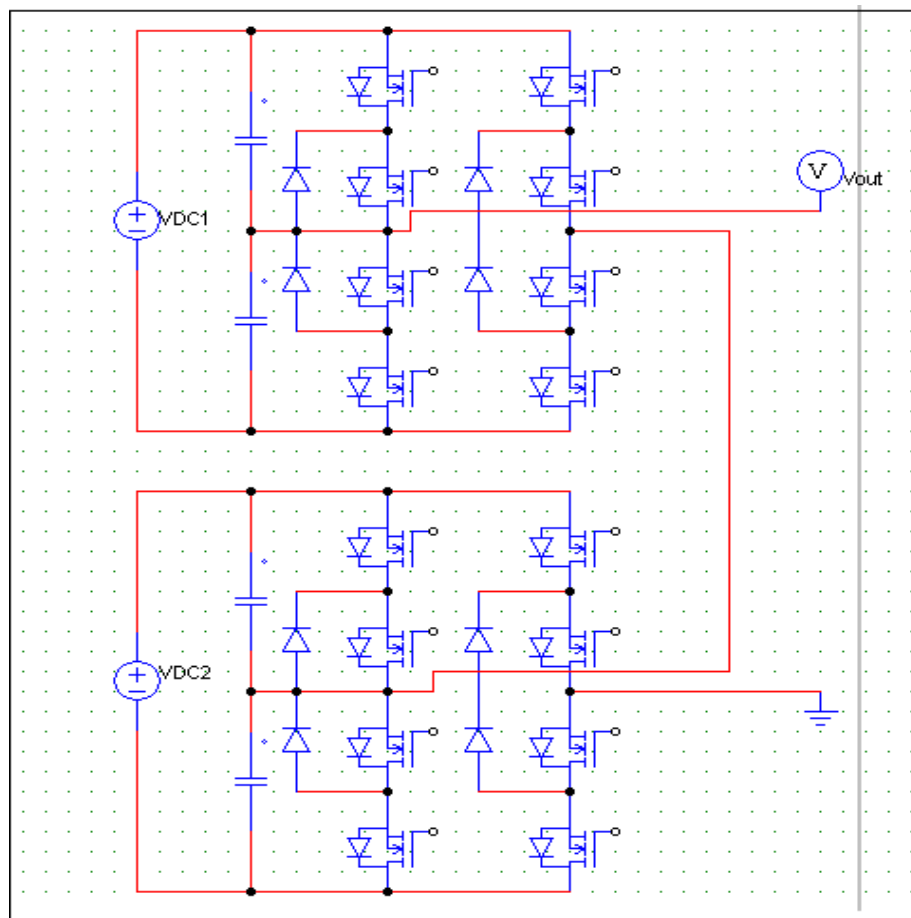


Рисунок 13. - Узагальнена топологія багаторівневого перетворювача

1.5.3 Плавне перемикання багаторівневого перетворювача

Для багатьох багаторівневих перетворювачів запропоновано і розроблено різні методи, такі як м'яке перемикання, щоб мінімізувати втрати на перемикання і, отже, підвищити ефективність перетворювача. У випадку каскадного багаторівневого перетворювача, за винятком першої комірки Н-моста (яка є тривірневим перетворювачем), решта комірок вважаються дворівневими перетворювачами. Таким чином, їхнє м'яке перемикання реалізується так, як якщо б це був звичайний дворівневий перетворювач, тобто перемикання має дві послідовності. У випадку перетворювачів з фіксацією нейтралі, будь то конденсаторний або діодний перетворювач, їх підсхеми м'якого перемикання можуть бути запропоновані і спроектовані з різними комбінаціями схем, оскільки вони мають багато надлишковості (багато можливих послідовностей перемикання, що призводять до однієї і тієї ж форми вихідного сигналу). Однією з найпопулярніших схем м'якого перемикання є перемикання нульової напруги. Вона включає в себе допоміжний резонансний комутований полюс (ARCP) і пов'язану індуктивність з переходом нульової напруги (ZVT). На рис. 14 показано комбінацію схем.

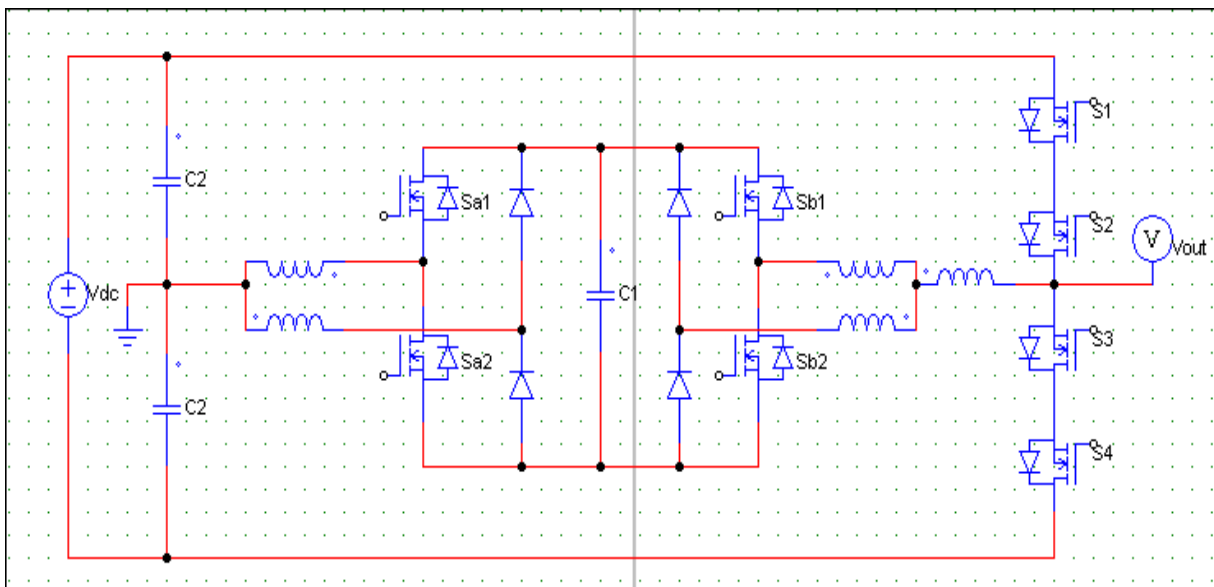


Рисунок 14. - Перемикання нульової напруги за допомогою схеми перетворювача з плаваючими конденсаторами

1.5.4 Топологія багаторівневого перетворювача Back-to-Back

Ця комбінація являє собою два багаторівневі перетворювачі (здебільшого перетворювачі з фіксуючими діодами), з'єднані за схемою "back-to-back" (зустрічно-зворотній перетворювач). Комбінація повинна бути підключена до електричної системи в послідовно-паралельній схемі, як показано на рис. 15, для регулювання, контролю та стабілізації напруги в розподільчій системі. Крім того, одночасно можна контролювати струм, який споживається від мережі, а потім і потужність, що подається на навантаження. У системі розподілу електроенергії цей фільтр активної потужності відомий як універсальний кондиціонер живлення (UPC). Однак, в системі ліній електропостачань така ж схема відома як універсальний регулятор потоку потужності (UPFC). Спочатку топологія "back-to-back" була запропонована Лаєм і Пенгом [13]. Вона поєднується з двома діодними перетворювачами. В основному, вона необхідна для з'єднання високої напруги постійного струму для взаємодії з асинхронною системою змінного струму. Крім того, він необхідний як випрямляч/інвертор для приводу з регульованою швидкістю для двигунів високої або середньої напруги. З багатьох причин для побудови універсального стабілізатора напруги перевагу було віддано діодному перетворювачу, оскільки підсхеми всіх рівнів (по три на кожному перетворювачі) можуть житися від однієї загальної ланки постійного струму. З іншого боку, в каскадному перетворювачі кожна комірка вимагає окремого джерела постійного струму, що не є ефективним або практично можливим при з'єднанні за схемою "back-to-back". Крім того, багаторівневий перетворювач з плаваючим конденсатором може житися від загальної ланки постійного струму. Тим не менш, кожна ступінь вимагає багато додаткових допоміжних конденсаторів і складності підзарядки. Ці додаткові конденсатори можуть суттєво здорожувати і збільшувати габарити системи.

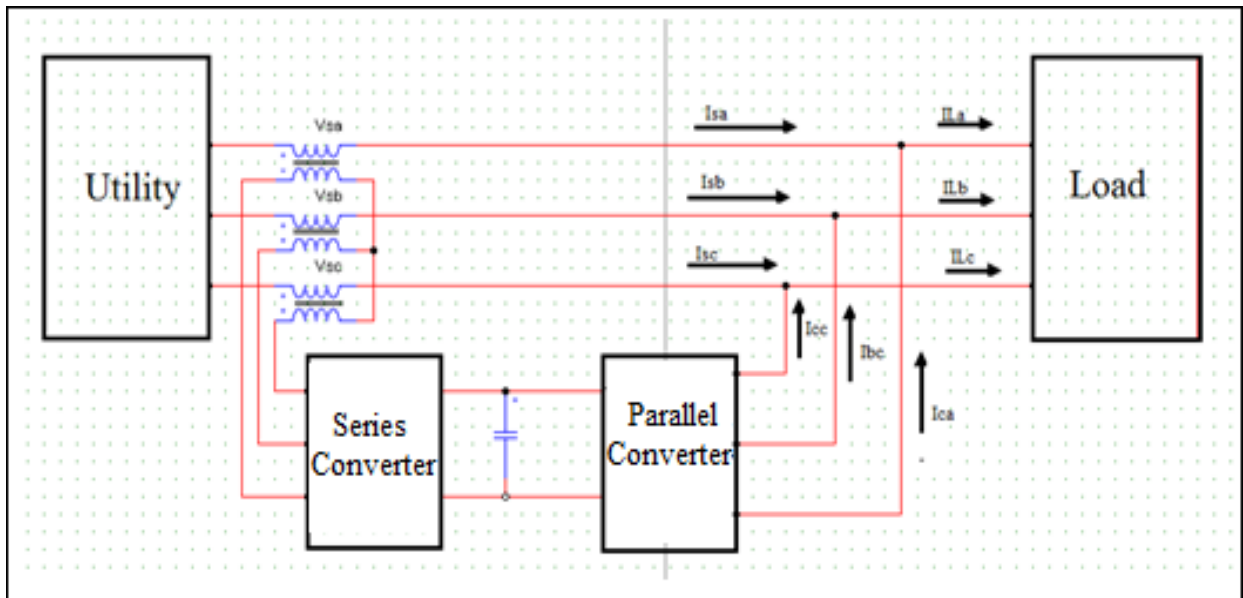


Рисунок 15. - Послідовно-паралельне з'єднання двох перетворювачів back-to-back в мережі

Робота перетворювачів з фіксуючими діодами в якості джерела безперебійного живлення (ДБЖ) вимагає як компенсації гармонійних струмів та/або роботи в області низьких амплітуд індексу модуляції.

У схемі "back-to-back" перший перетворювач послідовно з'єднаний з мережею трьома окремими однофазними трансформаторами. Первинні обмотки трансформаторів вмикаються послідовно з кожною лінією трифазної мережі. Вторинні обмотки трансформаторів підключені без заземлення. Інший інвертор з'єднується з мережею паралельним з'єднанням через фільтруючу котушку індуктивності. З'єднання двох інверторів у схемі "back-to-back" дозволяє незалежно компенсувати напругу джерела та струми навантаження. Тому для одночасного регулювання напруги навантаження і струму джерела необхідне з'єднання "back-to-back", що неможливо за допомогою лише одного перетворювача. Напруга, яка подається в лінію електропередачі послідовним перетворювачем, компенсує будь-які відхилення напруги від джерела, щоб забезпечити навантаження регульованою напругою і без спотворень. З іншого боку, паралельний перетворювач інжектуює струм в лінію електропередачі, і інжектований струм компенсує гармонійні струми та/або

реактивний струм навантаження. Струм, що споживається від мережі, не містить гармонійних складових і знаходиться у фазі з напругою джерела.

1.6 Стратегії ШІМ модуляції багаторівневого перетворювача

Стратегії широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) використовуються у звичайному дворівневому інверторі, який модифіковано для використання у багаторівневих перетворювачах. Пропозиції щодо методів ШІМ-модуляції багаторівневого перетворювача можна назвати і розпізнати відповідно до сигналу модуляції і частоти, яка використовується в підсхемі перемикування, як показано на рис. 16. Існує три основні багаторівневі методи ШІМ, які обговорювалися в літературі цього розділу:

1. Багаторівнева ШІМ на основі несучої
2. Селективне усунення гармонік (SHE)
3. Багаторівнева просторово-векторна ШІМ (SV-PWM).

Ці методи є модифікованими стратегіями від оригінальної традиційної дворівневої стратегії ШІМ. Однак, було запропоновано і розроблено багато інших багаторівневих методів ШІМ, але вони не використовуються ні дослідниками, ні виробниками, оскільки вони або непрактичні, або не є справжніми. Таким чином, тільки ці три популярні і практичні методи будуть розглянуті в цьому розділі. Методика, запропонована в цій роботі, буде розглянута в наступному розділі.

Багато авторів модифікували різні дворівневі методи ШІМ на основі багаторівневої несучої для керування порядком перемикування та активними пристроями в багаторівневому перетворювачі. У цій роботі було використано кілька трикутних сигналів-носіїв (залежно від кількості вихідних рівнів) і один опорний сигнал модуляції на фазу. Цей метод вважається найпростішим, найпопулярнішим і найефективнішим серед популярних методів. Існує три типові методи несучих, які використовуються у звичайному конвертері і застосовуються в багаторівневому конвертері. Це такі несучі:

1. Просторово-векторна модуляція (SVM).

2. ШІМ з інжекцією третьої гармоніки (ТНРWM).
3. Синусоїдальна ШІМ (SPWM).

ШІМ - це звичайна модуляція, і це найпопулярніший метод для звичайних промислових застосувань. ШІМ використовується для кращого використання ланки постійного струму при більш високих індексах модуляції або частотах перемикання. Коефіцієнт використання ланки постійного струму - це просто відношення вихідної основної напруги до напруги ланки постійного струму. Таким чином, до опорного синусоїдального сигналу додається третя гармоніка з амплітудою 25% від основної. Форми вихідних сигналів для кожного методу показано на рис. 16. Опорний сигнал має деякий запас, коли амплітуда індексу модуляції дорівнює одиниці. З наведеного нижче рис. 16 видно, що за постійним струмом ТНРWM використовується краще, ніж SPWM. Існує багато інших практичних багаторівневих ШІМ на основі несучої, таких як ШІМ з оптимальною частотою перемикання (SFO-ШІМ) та ШІМ з субгармонійними коливаннями (SH-ШІМ). Крім того, ці стратегії на основі несучої мають різні особливості.

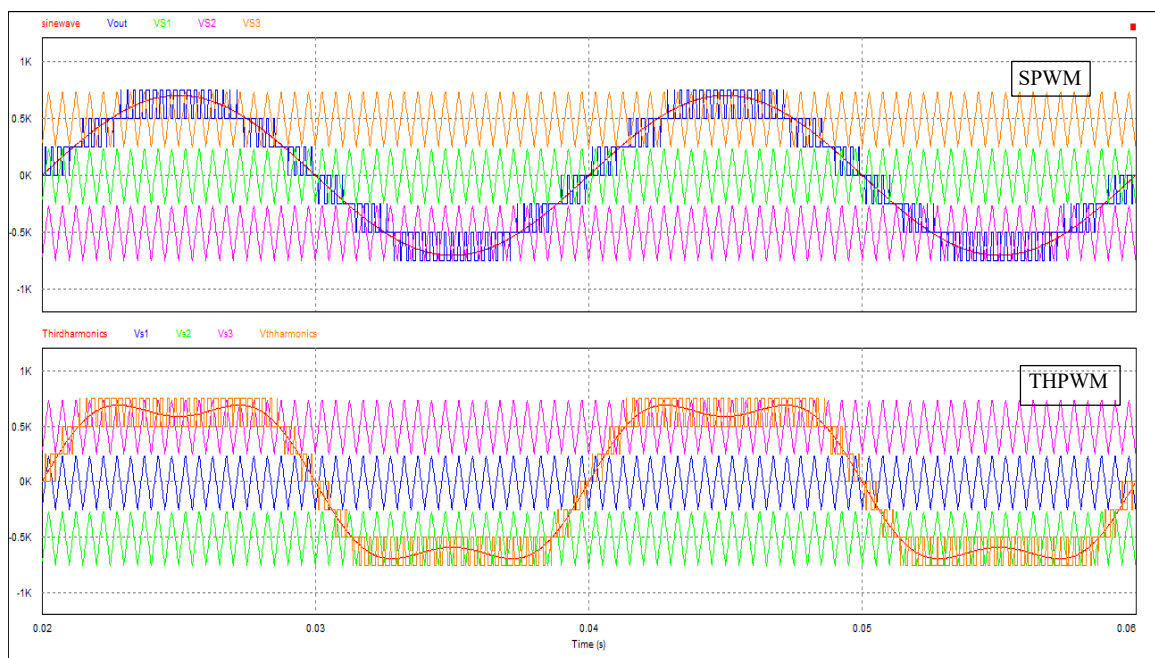


Рисунок 16. - Сигнали модуляції SPWM і ТНРWM для 7-рівневої форми напруги

Субгармонійна ШІМ є широко використовуваним методом. Це розширена ШІМ від дворівневої до багаторівневої. Для М-рівневих перетворювачів (М-1) несучі з

однаковою несучою частотою (F_c) і однаковою амплітудою (A) розташовані таким чином, що смуги, які вони займають, є суміжними. Опорний сигнал має частоту модуляції (F_m) і амплітуду від піку до піку (A). Його нуль повинен знаходитися посередині набору несучих. Опорний сигнал повинен порівнюватися з кожним із сигналів рівня несучої. Якщо опорний рівень більший за трикутник пересічних несучих, то активний перемикаючий пристрій повинен відповідати цій несучій і бути ввімкненим (увімкненим). З іншого боку, якщо опорний сигнал менший за перехресну несучу, то активний перемикаючий пристрій, який відповідає цій несучій, повинен бути розімкнений (вимкнений). У розрахунках багаторівневих перетворювачів індекс амплітуди модуляції (M_a) і частотне співвідношення (M_f) задаються як:

$$M_a = \frac{A}{(M - 1) \cdot A_c}$$

$$M_f = \frac{F_c}{F_m}$$

Де:

- A - амплітуда сигналу між нульовим відліком і піком сигналу;
- M - рівні перетворювача. $(M-1)$ - кількість несучих ШІМ;
- A_c - амплітуда несучої сигналу;
- F_c - несуча частота ШІМ;
- F_m - частота модуляції.

РОЗДІЛ 2

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ

Основне завдання мережевого фотоелектричного багаторівневого інвертора - збирати і подавати енергію від фотоелектричних панелей (ФЕП) в енергомережу з найвищою ефективністю, якістю і кількістю електроенергії. Система повинна бути надійною, незважаючи на вплив навколишнього середовища та\або несправності в самій фотоелектричній системі. Підключені до мережі системи перетворення фотоелектричної енергії привертають все більше уваги протягом останніх чотирьох десятиліть. Багаторівневі інверторні фотоелектричні системи з підключенням до мережі є найбільш ефективними і популярними в індустрії виробництва відновлюваної енергії, а навантаженням може бути окреме ізольоване навантаження, мікро мережа або повномасштабна мережа. Багаторівневий перетворювач набуває своєї важливості завдяки універсальності фотоелектричних систем. Існує багато економічних та екологічних факторів, які роблять фотоелектричні енергетичні системи конкурентоспроможними серед інших класичних джерел енергії, таких як нафта, вугілля та ядерні реактори [14]. Зменшення витрат на встановлення фотоелектричних модулів значно знизилося завдяки прогресу в технології фотоелектричних панелей, силових електронних перемикачів і напівпровідників. Крім того, фотоелектричні системи мають тривалий термін служби і не потребують витрат на паливо та обслуговування, що робить їх економічно привабливими при довгостроковому плануванні. Нещодавно урядові та міжнародні інституції запропонували ряд значних стимулів для фотоелектричних систем. Забруднення навколишнього середовища через викиди парникових газів, спричинені традиційною енергетикою, стає однією з сучасних світових криз. фотоелектричні системи є рішенням для зменшення цього забруднення.

У цьому розділі розглядається однофазна фотоелектрична система, підключена до мережі, з використанням інструменту Matlab для оцінки та аналізу продуктивності кожного елемента системи. Підключені до мережі фотоелектричної станції, незалежно від їх потужності, розміру або генерації, складаються з трьох основних

елементів. Цими елементами є генератор, система відстеження максимальної відстеження точки максимальної потужності (англ. *maximum power point tracking*, MPPT) та перетворення постійного струму (DC) в змінний струм (AC). Існує додатковий опціональний етап - етап зберігання. Етап генерації складається з ФЕП. Це первинне джерело енергії постійного струму. MPPT виконується багатьма топологіями DC\DC перетворювачів. Метою перетворювачів DC\DC є як отримання максимально можливої потужності від панелей масиву, так і передача належної напруги постійного струму до акумуляторних елементів. Перетворювачі MPPT будуть детально розглянуті далі в цій главі. Наступним етапом є накопичувач. У фотоелектричній системі, підключеній до мережі, акумуляторна батарея є додатковим елементом, який працює як резервне джерело, що живить електричне навантаження у випадку збою в мережі та/або відсутності генерації від панелей через низький рівень опромінення або будь-якої помилки в установці. Незалежно від того, чи знаходиться батарея в стані зарядки або розрядки, перетворювач MPPT відстежує точку максимальної потужності і подає постійний струм на батарею або підключений до мережі інвертор в точці максимальної потужності. Потужність можна підтримувати відповідно до потреб протягом певного періоду часу, витягуючи відсутню потужність з акумулятора. Надійна система перетворення від фотоелектричного модуля до навантаження має вирішальне значення для великомасштабних фотоелектричних систем, що підключаються до мережі, оскільки стабільне і стійке енергопостачання користується постійним попитом. Однак вихідна потужність ФЕП коливається залежно від температури та сонячного випромінювання.

У цьому розділі також представлено та проаналізовано продуктивність фотоелектричних масивів за допомогою математичної моделі фотоелектричних елементів. Модель, що використовується в цьому розділі, являє собою симуляцію як вольт-амперних (I-V), так і енергетичних (P-V) характеристичних кривих. Моделювання використовується для вивчення продуктивності при зміні чотирьох параметрів, включаючи якість матеріалів фотоелементів, паразитний опір фотоелементів, робочу температуру і рівень сонячного випромінювання. Ці

параметри відображають продуктивність фотоелектричного масиву. Для розрахунку I-V і P-V характеристик типових сонячних модулів потужністю 54 Вт і 100 Вт. Окрема ФЕП складається з багатьох сонячних елементів. Теорія одного діода стверджує, що кожна комірка вносить близько 0,7 вольт без навантаження, але все ж існує паразитний опір, який викликає деяке падіння напруги в комірці. Ці елементи послідовно з'єднані, щоб підтримувати бажану напругу панелі без навантаження, яка зазвичай становить 21,7 В, але струм панелі дорівнює струму елемента. Отримані результати вольт амперних характеристик були проаналізовані для різних панелей: фотоелектричних модулів Kyocera та Solara. Результати моделювання будуть використані як посилання для пояснення того, як працюють MPPT-перетворювачі і як витягти максимальну потужність з панелей [15].

2.1 Технічні характеристики фотоелектричних модулів

Умови навколишнього середовища навколо панелі визначають вихідні характеристики фотоелектричної системи, які змінюють основні параметри, що визначають продуктивність ФЕП. Для належного аналізу фотоелектричної системи необхідна відповідна імітаційна модель. У технічному паспорті будь-якої панелі, як правило, є п'ять параметрів, які характеризують ФЕП і використовуються при проектуванні ФЕ системи. Ці параметри показані на рис. 17.

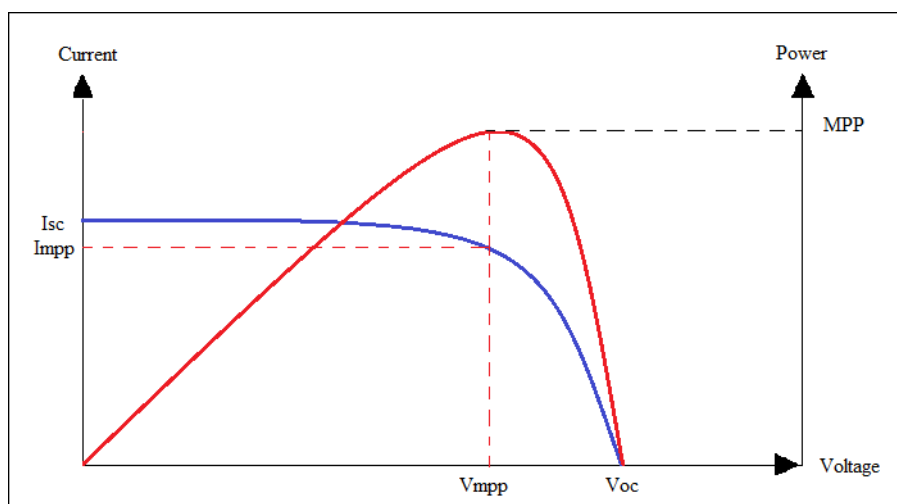


Рисунок 17. - Електричні характеристики ФЕП

Напруга холостого ходу (V_{oc}): Це максимальна напруга, яку забезпечує панель, коли клеми підключені без навантаження (холостий хід). Це значення залежить від кількості послідовно з'єднаних елементів в панелі. У найпоширенішому випадку є 36 елементів, кожен з яких вносить близько 0,7 вольт (напруга зміщення діода), щоб забезпечити необхідну напругу. Таким чином, панелі генерують 21,7 вольт як V_{oc} .

Струм короткого замикання (I_{sc}): Це максимальний струм, що споживається з панелі, коли клема панелі підключена в режимі короткого замикання.

Точка максимальної потужності (MPP або P_{max}): Це точка на характеристичній кривій $P-V$, де фотоелектричні панелі можуть виробляти максимальну потужність, де $MPP = I_{mp} \times V_{mp}$ (напруга при MPP) \times V_{mp} (струм при MPP). Точка максимальної потужності MPP фотоелектричної панелі вимірюється у пікових ватах W_p або ватах W . Відповідно до $P-V$ кривих, панель не може працювати в пікових режимах (I_{sc} і V_{oc}). Робоча напруга V_{mp} визначається за допомогою MPPT-перетворювача, який описано далі в цьому розділі. На практиці значення V_{mp} та I_{mp} на кілька одиниць менші, ніж I_{sc} та V_{oc} .

Коефіцієнт заповнення (FF): Цей фактор визначається як процентне відношення MPP до ($I_{sc} \times V_{oc}$). Цей фактор також вказує на якість ФЕП, оскільки він дає чітке уявлення про характер кривих $I-V$. Зазвичай цей коефіцієнт коливається між 0,7 і 0,8. Чим вище MPP і ближче до $I_{sc} \times V_{oc}$, тим краща якість ФЕП. Отже, чим ближче FF до 100%, тим більшу потужність забезпечує ФЕП.

$$FF = \frac{MPP}{I_{sc} * V_{oc}}$$

Ефективність панелі (E): це відношення максимальної потужності (електричної вихідної потужності ФЕП) до потужності сонячного випромінювання (G), що потрапляє на панель (вхідна фото-потужність). Загалом, ефективність - це показник того, наскільки ефективно відбувається перетворення енергії. Як правило, ефективність фотоелектричного перетворення зазвичай становить від 10% до 12%.

Якість напівпровідникового матеріалу фотоелемента є дуже точним фактором, що вказує на ефективність. Існує багато типів фотоелементів: Тонко плівкові, аморфні, полікристалічні та монокристалічні. Для розрахунку ефективності використовується наступна формула:

$$E = \frac{MPP}{G}, \text{ або } E = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{G}$$

Експлуатаційні характеристики, такі як I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} (IP_{max}) і V_{mpp} (VP_{max}), можна знайти в технічному паспорті ФЕП, які точно і практично розраховані виробником при стандартних умовах вимірювання. Цими стандартними умовами є температура робочих фотоелементів $T_c = 25^\circ\text{C}$ і інтенсивність випромінювання $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$, на рівні моря. За інших умов опромінення та температури значення параметрів панелі, її продуктивність та ефективність будуть змінюватися. Тому міжнародні виробники, які постачають фотоелектричні системи в різні країни з різними умовами освітленості і температури, додають характерний графік або таблиці значень для умов, що відрізняються від стандартних. Дуже важливо перевірити, що їхні характеристики, особливо MPP , I_{mpp} і V_{mpp} , відповідають обіцяним виробником [16]. Крім того, перед монтажем необхідно перевірити значення продуктивності при температурі панелі, щоб переконатися, що вони відповідають умовам навколишнього середовища. За іронією долі, іноді можна виявити, що дві панелі мають однакові робочі характеристики. Однак їхні I-V або P-V характеристики можуть мати абсолютно різний вигляд за різних умов. Наприклад, два модулі можуть виробляти 54 Вт фотоелектричної потужності при 25°C і $G=1000 \text{ Вт/м}^2$, але вони можуть мати різні фотоелектричні потужності при 40°C .

2.2 Моделювання фотоелектричних комірок

У цьому розділі представлено математичний аналіз двох різних фотоелектричних модулів з різними експлуатаційними характеристиками. Моделювання базується на програмному забезпеченні Matlab для типових ФЕП потужністю 54 Вт і 100 Вт. Детальний аналіз буде представлений за різних умов та факторів, які впливають на продуктивність ФЕП і, таким чином, повинні бути враховані при плануванні будівництва фотоелектричних станцій. Цими факторами є коефіцієнт якості кремнію, фото-опромінення, температура та внутрішній послідовний опір. Програмне забезпечення для моделювання здатне розраховувати I-V і P-V криві. Потім це може бути довідником даних для цих панелей, якщо вони використовуються в різних умовах експлуатації.

Електричний опис фотоелемента отримано за допомогою еквівалентної схеми, показаної на рис. 18. Вона складається з фотографічного джерела струму, щоб продемонструвати вплив інтенсивності випромінювання на генерацію фотоелемента. Це залежне джерело струму змінюється зі зміною опромінення в прямо пропорційній залежності. Друга частина комірки - це діод, підключений паралельно, щоб продемонструвати електронно-дірковий перехід (p-n перехід) фотоелемента. Він також визначає напругу комірки (0,7 вольт), яка є напругою зворотного зсуву кремнієвих діодів. По третє, це послідовний резистор, який імітує внутрішній опір фотоелемента потоку струму. Нарешті, опір шунта - це дуже високий опір, і його вплив досить малий, щоб його не враховувати. Виходячи з базового опису вище, без фото опромінення фотоелемент працює як навантаження, що складається з діода і послідовного опору.

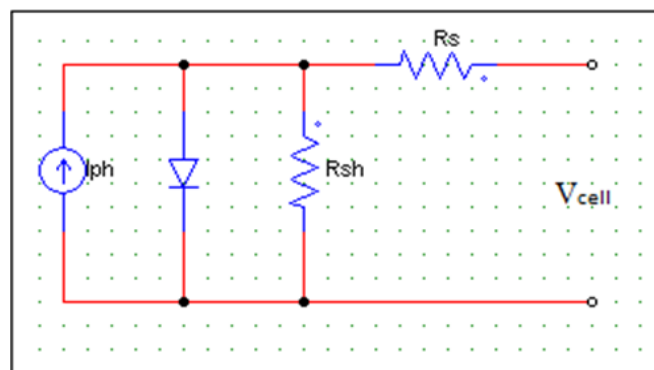


Рисунок 18. - Еквівалентна схема сонячного елемента

Цей математичний опис сонячного елемента називається подвійною експоненціальною моделлю. Вона походить від електричної та фізичної поведінки фотоелемента, описаної вище. Як показано на малюнку (18): $I_{pv} = I_{ph} - I_d$

Де:

- I_{ph} - струм, що протікає під дією сонячного (фото) випромінювання;
- I_d - струм шунтуючого діода;
- I_{pv} - вихідний струм фотоелемента.

Вольт амперні характеристики встановлених ФЕП близько відповідають оригінальним даним польових випробувань. У цій моделі є два широко використовувані модулі, протестовані для оцінки їх продуктивності за різних зовнішніх і внутрішніх умов. Зовнішні умови (випромінювання і температура) домінують над робочими характеристиками фотоелемента. Внутрішні умови (внутрішній опір і добротність) визначаються типом напівпровідників, що використовуються для побудови фотоелемента. Рівняння, що використовуються в цій моделі для моделювання I-V і P-V характеристик одного фотоелемента, показані нижче (1-10):

$$1. K = \frac{(I_{sc} \text{ at } T_2 - I_{sc} \text{ at } T_1)}{(T_2 - T_1)};$$

$$2. I_L \text{ at } T_1 = I_{sc} \text{ at } T_1 * G;$$

$$3. I_L = I_L \text{ at } T_1 + K * (T_{ac} - T_1);$$

$$4. I_L = I_L \text{ at } T_1 = \frac{I_{sc} \text{ at } T_1}{\left(\frac{e^{q*V_{oc} \text{ at } T_1}}{n*k*T_a - 1}\right)^{dx}};$$

$$5. I_n = I_0 \text{ at } T_1 * \left(\frac{T_{ak}}{T_{ak}}\right) \left(\frac{3}{n}\right) * e^{\left(\frac{-q*V_g}{n*k}\right) * \left(\frac{1}{T_{ak}} - \frac{1}{T_{ak}}\right)};$$

$$6. V = \frac{I_0 \text{ at } T_1 * q}{n*k*T_{ac} * e^{q*V_{oc} \text{ at } T_1}};$$

$$7. \frac{dV_{oc}}{dI_a} = \frac{-1.15}{Ns/2};$$

$$8. R_s = \frac{dV_{oc}}{dI};$$

$$9. V_t \text{ at } T_a = V_t \frac{A*k*T_{ak}}{q}.$$

Де:

- V_a - робоча напруга;
- G - кількість сонць; інтенсивність фото-випромінювання (1 сонце = 1000 Вт/м²);
- K - постійна Больцмана;
- q - заряд електрона;
- A - коефіцієнт якості діода;
- V_g - напруга діода;
- I_n - струм насичення;
- N_s - кількість послідовно з'єднаних елементів на панель;
- T_1 - стандартна робоча температура;
- V_{oc} при T_1 - напруга холостого ходу елемента при T_1 ;
- I_{sc} при T_1 - струм короткого замикання при T_1 ;
- T_2 - максимальна температура експлуатації;
- V_{oc} при T_2 - напруга холостого ходу комірки при T_2 ;
- I_{sc} при T_2 - струм короткого замикання при T_2 ;
- T_{ak} - робоча температура.

Потім можна застосувати чисельний метод Ньютона-Рафсона для отримання точного значення струму I_a при заданій робочій напрузі, як показано в рівнянні 10. Отримане значення струму використовується для побудови I-V і P-V кривих, як описано в наступному параграфі.

$$10. I_a = \frac{I_a - \left(I_L - I_a - I_n \cdot \left(e^{\frac{V_c + I_a \cdot R_c}{V_t}} - 1 \right) \right)}{-1 - I_n \cdot \left(e^{\frac{V_c + I_a \cdot R_c}{V_t}} - 1 \right) \cdot \frac{R_s}{V_t \cdot I_a}}$$

З наведених вище рівнянь зрозуміло, що розрахунок штрафного струму (I_a) при заданій робочій напрузі здійснюється за допомогою електричних характеристик, зазначених у технічному паспорті панелі (I_{sc} , V_{oc}). Змінними, що використовуються в цьому методі моделювання, є напруга, температура, опромінення та послідовний опір. Зазвичай для розрахунку струму (I_a) використовуються електричні характеристики модуля (I_{sc} , V_{oc}). Змінними величинами будуть напруга, опромінення

(G), послідовний опір (R_s) і температура (T). Існуючі ФЕ моделі надають різноманітні аналітичні результати моделювання.

Продуктивність фото модулів Kyocera і Solara оцінюється за їхніми I-V і P-V характеристиками. ФЕП Kyocera забезпечує вихідну потужність 54 Вт, а фото модулі Solara - 100 Вт. Ця модель використовується для моделювання продуктивності як всієї панелі, так і окремого фотоелемента. Враховується, що ці модулі складаються з 36 послідовно з'єднаних кремнієвих елементів. Основні характеристики для цього моделювання наведені в таблиці (2) за стандартних умов опромінення 1000 (Вт/м²) та температури 25 °С. Моделювання ФЕ панелі реалізовано за допомогою Matlab. Параметри моделі оцінюються під час виконання за допомогою рівнянь сонячного моделювання.

Таблиця 2: Технічні характеристики ФЕ модулів Kyocera та Solara

Технічні характеристики	Kyocera панель	Solara панель
I_{sc} (Ампер)	3.31	8.18
I_{mpp} (Ампер)	3.11	7.30
V_{oc} (Вольт)	21.7	21.7
V_{mpp} (Вольт)	17.4	17.8
MPP (Ватт)	54	100
Торгова марка	Японська	Німецька
Габарити (см)	64 x 65.3 x 5.3	150 x 68 x 4

По-перше, при стандартних параметрах опромінення 1000 (Вт/м²) і робочій температурі 25 °С, оцінка і моделювання обох компонентів діодної дифузії, якими є послідовний опір і коефіцієнт ідеальності напівпровідникового переходу (A), експериментально виділяються в I-V і P-V криві. Реалізовано чисельний метод і впроваджено його в програмний код. Отримані дані показують вплив R_s і A на значення вихідного струму при заданій напрузі для певного фотоелектричного випромінювання. Крива (I-V) відображає всі можливі значення напруги і струму при різних значеннях змінних (R_s і A). Криві R_s і A не впливають на продуктивність фотоелектричної системи, оскільки значення R_s і A є постійними величинами і

визначаються в процесі виробництва. Вони відносяться до матеріалів, з яких складаються фотоелементи. А дорівнює 2 для кристалічного кремнію і менше 2 для аморфного кремнію. R_s - це загальний опір через *pn*-перехід кожного фотоелемента панелі; він також включає в себе опір з'єднань між шиною фотоелемента і з'єднувачами панелі. Легування також визначає значення R_s .

Характерні робочі криві залежать в основному від двох факторів: фото випромінювання, що отримується фотоелементами, і температури фотоелемента. При постійній площі фотоелемента, струм, що генерується, прямо пропорційний фотографічному сонячному випромінюванню (G). Зверніть увагу, що напруга трохи падає при підвищенні температури. Хороший регулятор намагатиметься максимізувати кількість енергії, яку забезпечує панель, відстежуючи точку, що забезпечує максимальну потужність ($V \times I$). Максимальна потужність, яка відповідає електричним параметрам, показана в таблиці (2). Вихідна потужність сонячного модуля збільшується зі збільшенням сонячного випромінювання (G); вона також зростає зі зменшенням послідовного опору. І навпаки, вихідна потужність зменшується з підвищенням температури і якості кремнію.

2.2.1 Коефіцієнт якості кремнію

Якість кремнію - це конструктивний фактор, який визначається під час складання сонячного елемента. Як правило, коефіцієнт якості кремнію варіюється від 1,2 до 2. Різні матеріали або типи кремнію мають різні коефіцієнти якості кремнію. Він становить 2 для кристалічного кремнію і менше 2 для аморфного кремнію. З рис. 19 видно, що струм, який споживає панель, прямо пропорційний якості (Як), незалежно від типу панелі.

При моделюванні впливу цього фактору (Як) є змінною і вважається, що вона розподілена порівну на чотири ступені для моделювання чотирьох кривих А-В, які зображені різними кольорами. Чим краща якість (вище Як), тим більший згенерований струм I_{ph} втягується в фотоелектричну панель. А-В криві демонструють електричну поведінку фотоелектричної панелі.

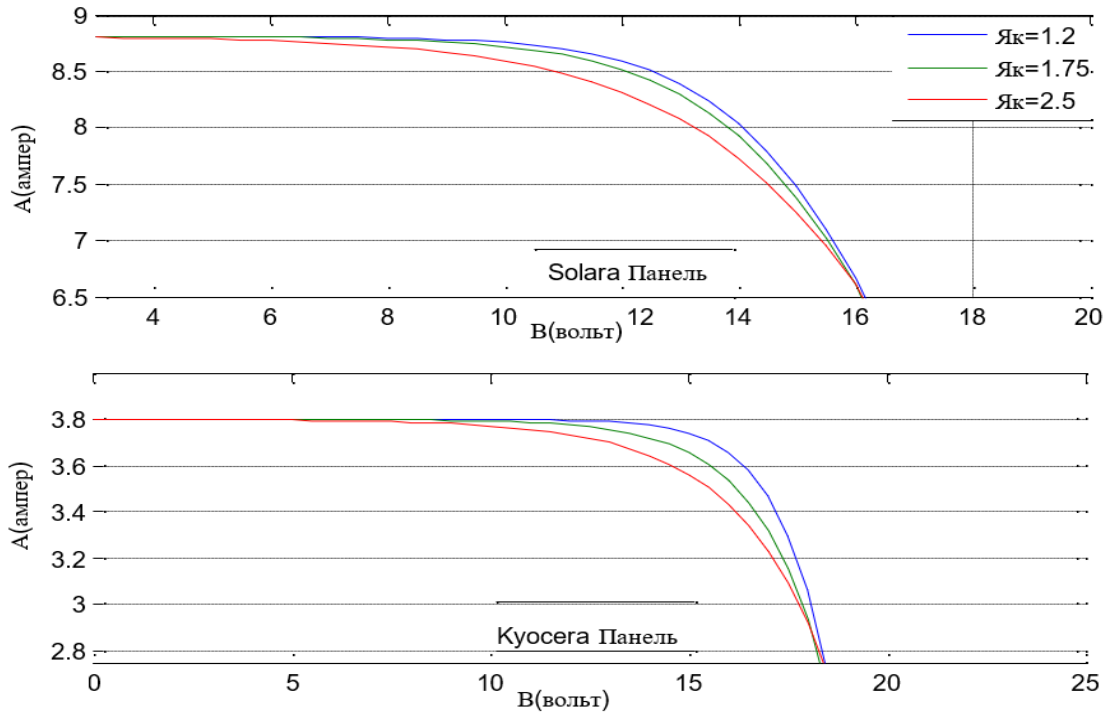


Рисунок 19. - Вольт-амперна характеристика в залежності від якості кремнію

2.2.2 Моделювання послідовного опору (R_s)

Це паразитний опір, який впливає на електричні характеристики фотоелектричної панелі. Він знижує вихідну потужність пристрою. R_s фотоелектричних (ФЕ) модулів являє собою сумарний опір у клемних з'єднаннях елемента, області бази та емітера PN-переходу елемента, металізації та роз'єму послідовної шини панелі [17]. За стандартних умов випромінювання, R_s у будь-яких освітлених комірках не повинен перевищувати 20 МОм для всієї панелі (36 комірок). Однак у випадку панелей, які генерують великі струми (I_{ph}), R_s стає більш ефективним, оскільки падіння напруги стає вищим. Отже, R_s панелі має значний вплив на нахил кривої А-В [18].

На рис. 20 показано вплив опору серії на вольтамперні характеристики. Легко помітити, що максимальний струм споживається при $R_s=0$. Таким чином, чим більше зростає опір серії, тим меншої вихідної потужності можна досягти. Отже, ефективність ФЕП знижується через недостатню технологічну якість виробників.

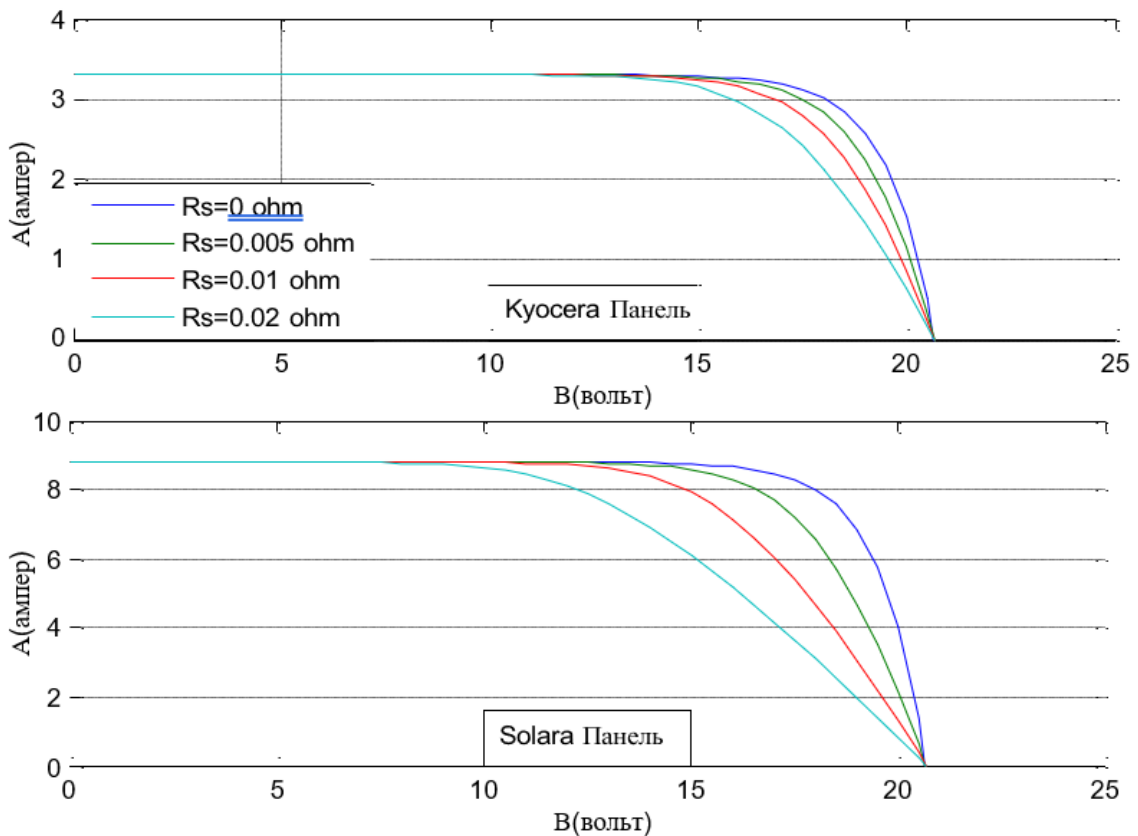


Рисунок 20. - Вольт-амперна характеристика при зміні R_s для ФЕ панелей Kyocera та Solara

2.2.3 Інтенсивність випромінювання

Інтенсивність фото енергії (освітленість), що припадає на один квадратний метр площі, називається інтенсивність випромінювання (E_e). Таким чином, вона вимірюється у ватах на квадратний метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Щоб зрозуміти вплив (E_e), слід знати, що фотоелектричні панелі виготовляються зі спеціальних напівпровідникових матеріалів лише для того, щоб перетворити фото енергію сонячного випромінювання (E_e) в електричну енергію.

Таким чином, продуктивність панелі, яку демонструють вольт амперні характеристики ФЕП, в основному залежить від рівня E_e , нанесеного на поверхню панелі. E_e природним чином надходить від сонця, яке не є стабільним джерелом енергії.

Таким чином, E_e чутливий до умов навколишнього середовища і, відповідно, безперервно коливається. Крім того, для оцінки надійності фотоелектричної системи необхідно враховувати тривалість сонячного сяйва. Тому, окрім вимог до навантаження, E_e є основним розрахунковим фактором при визначенні розміру та

вимог до фотоелектричної системи. Вищий E_c призводить до вищого I_{ph} і, природно, вищого I_{ph} , що призводить до вищого MPP при заданій напрузі. Збільшення E_c як I_{mpp} , так і V_{mpp} є значним. Фізично, при більшій кількості сонячного світла, що потрапляє на фотоелектричну панель, електрони збуджуються більш високою енергією (фотонами). Отже, збільшення рухливості електронів призводить до більшого потоку струму [19].

Як згадувалося раніше, E_c не є постійним протягом дня. Тому миттєве значення E_c слід усереднювати за певний період часу. У багатьох джерелах прийнято розглядати E_c за годину, день або місяць, щоб допомогти проектувальникам передбачити продуктивність системи в конкретний момент або протягом будь-якого періоду часу. У цьому моделюванні криві побудовані по-іншому, щоб продемонструвати вплив $1 E_c = 1000 \text{ Вт/м}^2$. E_c знаходиться в діапазоні від (0,5 до 1,2) Вт/м^2 . При 1000 Вт/м^2 показники повинні відповідати специфікаціям, зазначеним у технічному паспорті. З рис. 20 видно, що MPP, I_{oc} , V_{sc} , V_{mpp} та I_{mpp} збільшуються зі збільшенням E_c .

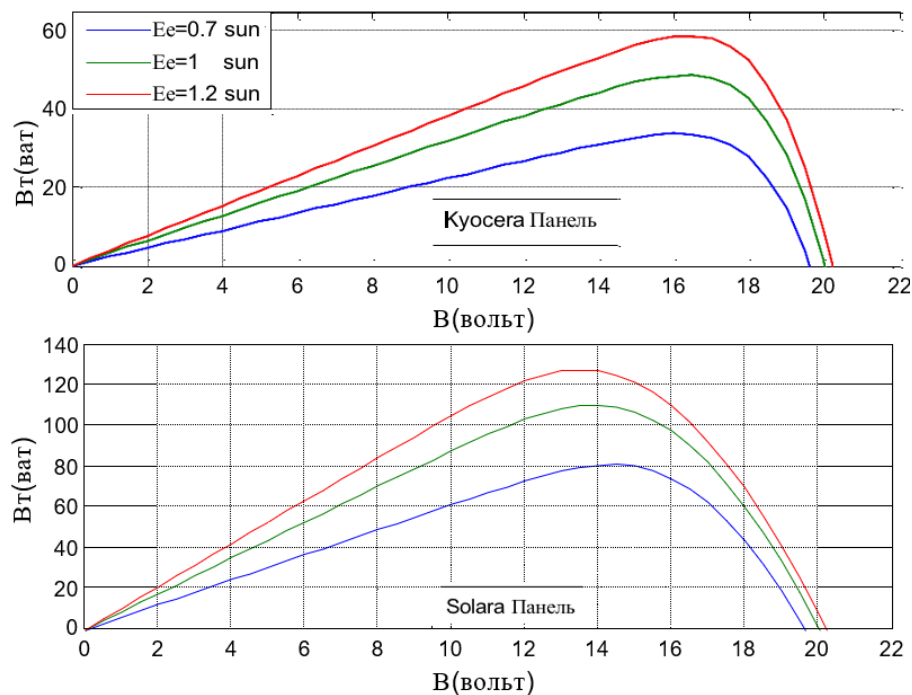


Рисунок 21. - Вольт-ватна характеристика при зміні опромінення

2.2.4 Температура

Добре відомо, що сонячні дні літку містять більшу кількість E_c , ніж взимку. Однак, оскільки воно несе в собі вищу температуру, підвищення температури

навколишнього середовища фотоелектричної панелі негативно впливає на потужність, що генерується I_{ph} і MPP. Природно, що вища температура призводить до розширення забороненої зони атомів матеріалу. Таким чином, електронам потрібно більше фото енергії (E_c) для проходження через цей бар'єр, а отже, робочий струм I_{mpp} зменшується при заданому E_c . Отже, ефективність фотоелектричної панелі знижується.

На рис. 22 представлено вплив підвищення температури на електричні характеристики (Вт-В) сонячної панелі потужністю 100 Вт.

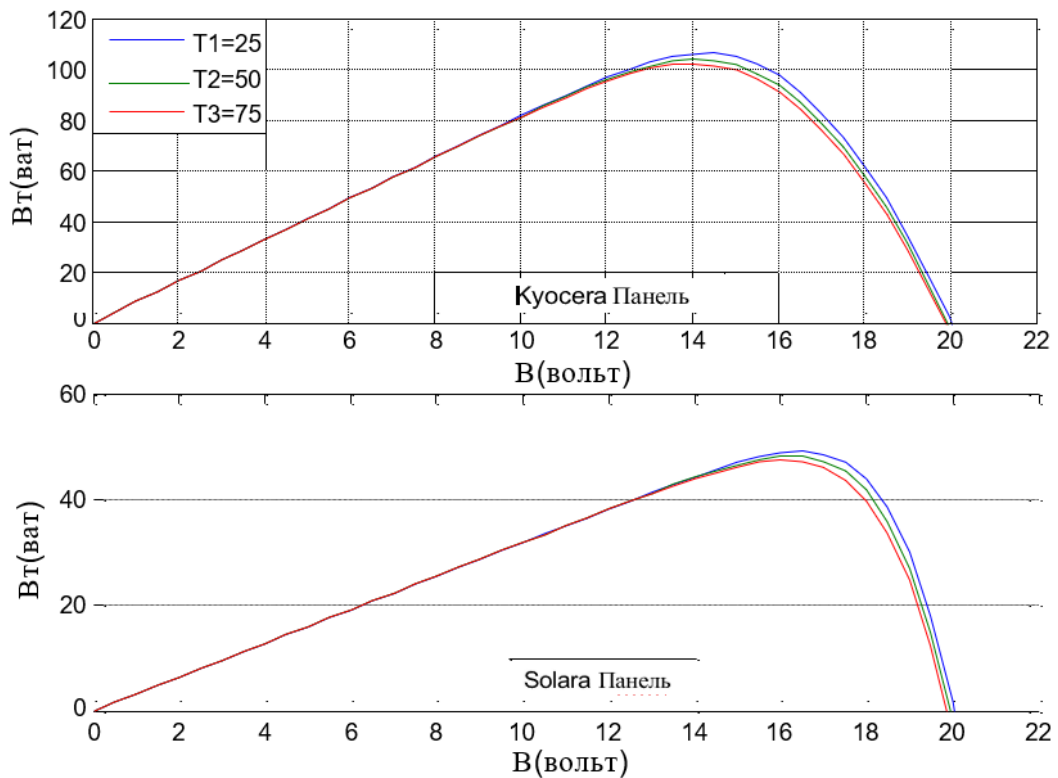


Рисунок 22. - Вольт-ватна характеристика при зміні температури

2.3 Відстеження точки максимальної потужності (MPPT)

Високе фото-випромінювання і низька температура - не єдині фактори, що впливають на досягнення максимальної продуктивності фотоелектричних систем, але також слід використовувати відповідний метод MPPT. Існує багато алгоритмів MPPT. Типовими алгоритмами, що використовуються в більшості MPPT перетворювачів, є наступні:

1. Алгоритм збурення і спостереження (Perturbation and Observation, P&O).

2. Алгоритм інкрементної провідності (Incremental Conductance, INC).
3. Алгоритм підйому на гору (Hill Climbing, HC).

У цьому розділі представлено відмінності та порівняння між трьома вищезгаданими алгоритмами в системі моделювання фотоелектричних систем [20]. Ці алгоритми називаються методами МРРТ зі зворотним зв'язком за потужністю. Також у цьому розділі порівняння демонструє, як фотоелектричні системи точно відстежують точку максимальної потужності (МРР) за допомогою трьох алгоритмів МРРТ.

Численні алгоритми МРРТ були запропоновані авторами та промисловими розробниками, такі як метод збурення та спостереження, метод інкрементної провідності, метод підйому на гору, метод лінійної апроксимації, метод зворотного зв'язку за напругою, метод фактичних вимірювань та метод нечіткого керування. Багато інших дослідників покращили продуктивність, реакцію та ефективність загальноновживаних методів, особливо методів HC та P&O. Три методи МРРТ зі зворотним зв'язком за потужністю оцінюються, щоб продемонструвати їх переваги, недоліки та ефективність виконання. Цей розділ демонструє продуктивність цих алгоритмів і швидкість реакції їхніх процесів на зміни і коливання вихідної потужності панелі через варіації, що обговорювалися в попередньому розділі. Крім того, швидкість реакції і застосовність методів збурення і спостереження, а також методу підйому на гору порівнюються з підключеною до мережі фотоелектричною системою.

2.3.1 Метод збурень та спостережень (P&O)

Метод P&O є найпоширенішим алгоритмом, що застосовується в МРРТ, оскільки він має надзвичайну простоту, зручність, надійну структуру і потребує меншої кількості параметрів, ніж методи INC і HC. Метод P&O відстежує МРР фотоелектричних модулів, порівнюючи згенеровану потужність за допомогою засобів ітеративного збурення та спостереження за робочою потужністю на вольт-ватних характеристиках. Перетворювач ітеративно невеликими кроками регулює

напругу від фотоелектричної батареї і вимірює потужність. Коли потужність збільшується, подальші налаштування в цьому напрямку слід перевіряти, поки потужність не досягне піку і більше не буде збільшуватися. MPPT використовує мікросхеми DSP (digital signal processor) для наближення до MPP шляхом безперервних збурень і спостережень.

Алгоритм відстеження максимальної потужності P&O має найшвидший динамічний відгук і добре регульовану напругу на фотоелектричних панелях у порівнянні з алгоритмом HS. Як показано на рис. 23, необхідними характеристиками алгоритму P&O є лише напруга та потужність фотоелектричних модулів.

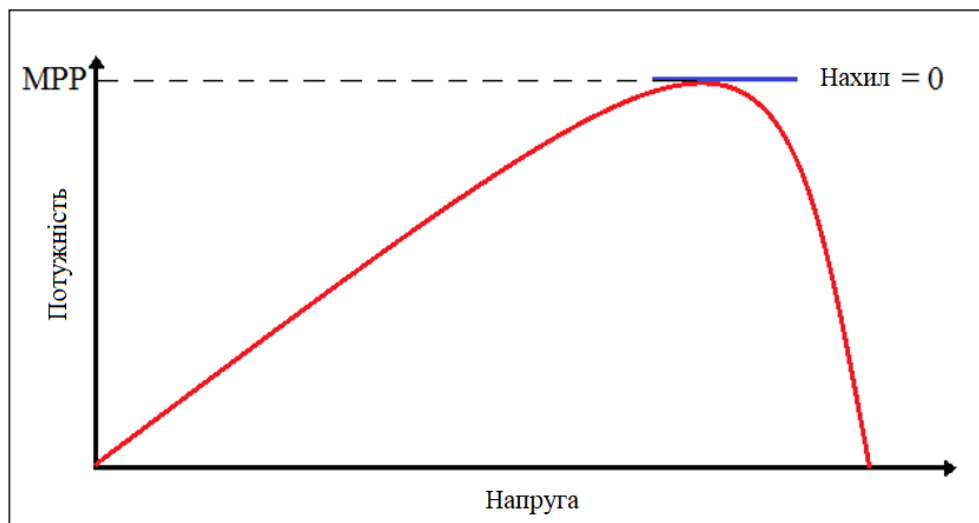


Рисунок 23. - Точка максимальної потужності методу P&O

На рис. 23 зображено залежність між робочою напругою (V) і потужністю, що генерується (P) фотоелектричної панелі. З нього видно, що MPP знаходиться за умови $dP/dV = 0$, незалежно від значення E_e і робочої напруги фото модулів. Для того, щоб знайти MPP, метод повинен ітеративно перевіряти нахил (dP/dV) потужності за допомогою послідовних робочих напруг і струмів. Цей процес виражається рівнянням:

$$\frac{P(n) - P(n - 1)}{V(n) - V(n - 1)} = \frac{dP}{dV}$$

На рис. 24 показано метод P&O, змодельований за допомогою програми PSIM. Вона керує комутаційними ланцюгами ПС/ПС (DC/DC) перетворювача з метою зміни

напруги певним чином для досягнення MPP від підключеної до перетворювача фотоелектричної панелі.

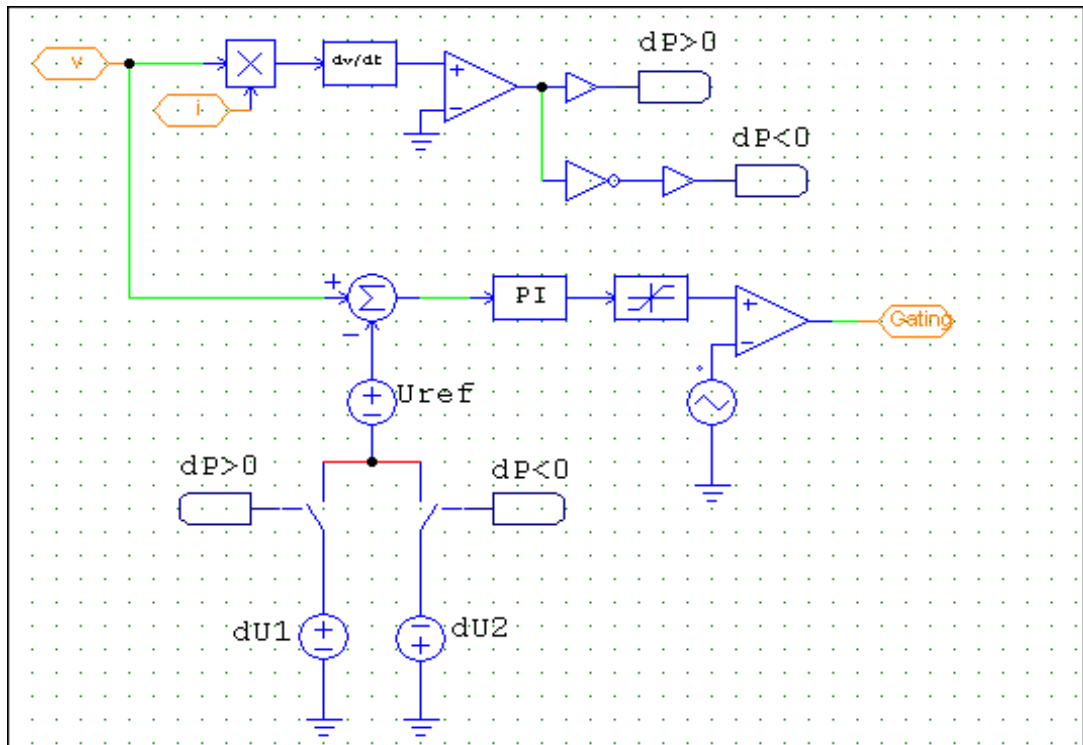


Рисунок 24. - Підсхема керування перемикання методом P&O

2.3.2 Метод інкрементної провідності (INC)

Метод INC визначає зміну напрямку робочої напруги фотоелектричних панелей шляхом виявлення та порівняння інкрементної та миттєвої провідності фотоелектричних панелей. Процес виявлення алгоритму INC є більш складним методом, ніж інші два алгоритми. Він має найповільнішу реакцію на зміну MPP, отже, час, витрачений алгоритмом INC на відстеження MPP, також трохи довший, ніж у двох інших алгоритмів зворотного зв'язку за потужністю. По суті, цей метод є похідним від методу P&O, як показано нижче:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \frac{dV}{dV} = \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} = 0$$

Таким чином, провідність $(g) = \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$

Приріст провідності $(g_s) = \frac{dI}{dV}$

Миттєва провідність $(g_d) = -\frac{I}{V}$

Щоб знайти MPP, значення приросту провідності має дорівнювати миттєвій провідності. Ця теорія проілюстрована на рис. 25.

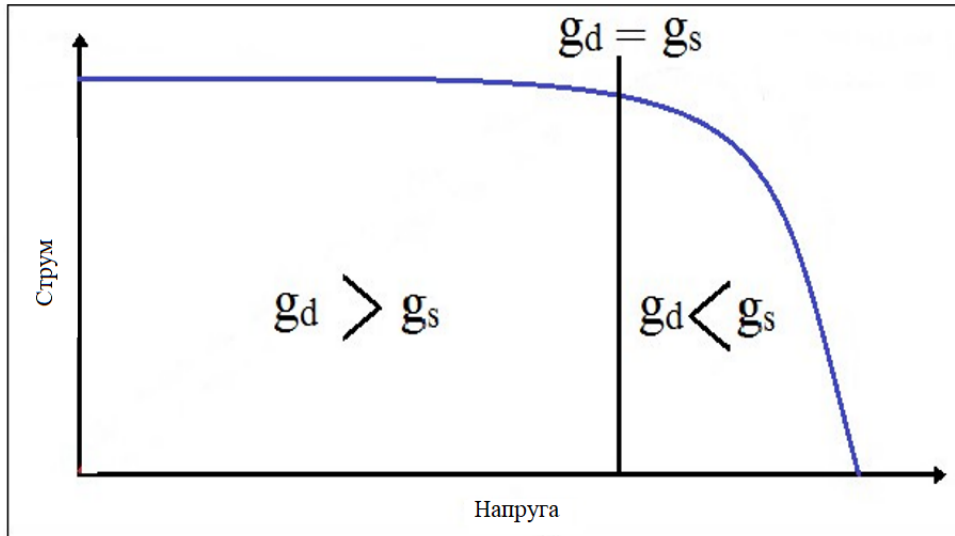


Рисунок 25. - Метод інкрементної провідності

З рис. 25 видно, що на зміну MPP не впливають погодні умови. У INC ця точка визначається характером вольт амперної кривої (I-V). Оскільки константа (I) стає ширшою зі збільшенням робочої напруги ($dI=0$), то для досягнення умови MPP потрібен ширший діапазон напруги. Значення dI (рівне $I(n)-I(n-1)$) стає від'ємним, коли струм починає спадати на кривих I-V; починає з'являтися інкрементна провідність і починається процес порівняння з миттєвою провідністю ($-I/V$). Після цього з'являється умова MPP і $g_s=g_d$. Таким чином, при збільшенні фото випромінювання ($dI=0$ ширше), V_{mpp} зростає і навпаки.

Перший сценарій пошуку MPP в методі INC полягає в тому, що MPPT повинен підвищити робочу напругу фотоелектричних модулів, щоб відстежувати MPP. Однак, коли фото випромінювання зменшується, V_{mpp} зменшується, а $dI < 0$. На цьому етапі MPPT повинен зменшити робочу напругу фотоелектричних панелей, щоб виконати

умову методу INC. Крім того, коли напруга і струм змінюються під час збурення напруги і $g_s > g_d$ ($dI/dV > -I/V$), робоча напруга знаходиться зліва від MPP на кривих $I-V$. Таким чином, її потрібно підняти, щоб відстежити MPP. Другий сценарій полягає в тому, що, припускаючи, що $dI/dV < -I/V$ ($dP/dV < 0$), робоча напруга знаходиться праворуч від MPP на кривій $I-V$. Таким чином, її потрібно зменшити, щоб відстежити MPP.

На рис. 26 показано метод INC, змодельований за допомогою PSIM. Він полягає в управлінні комутаційними ланцюгами DC/DC перетворювача з метою зміни напруги певним чином для досягнення MPP від ФЕП, підключеної до перетворювача.

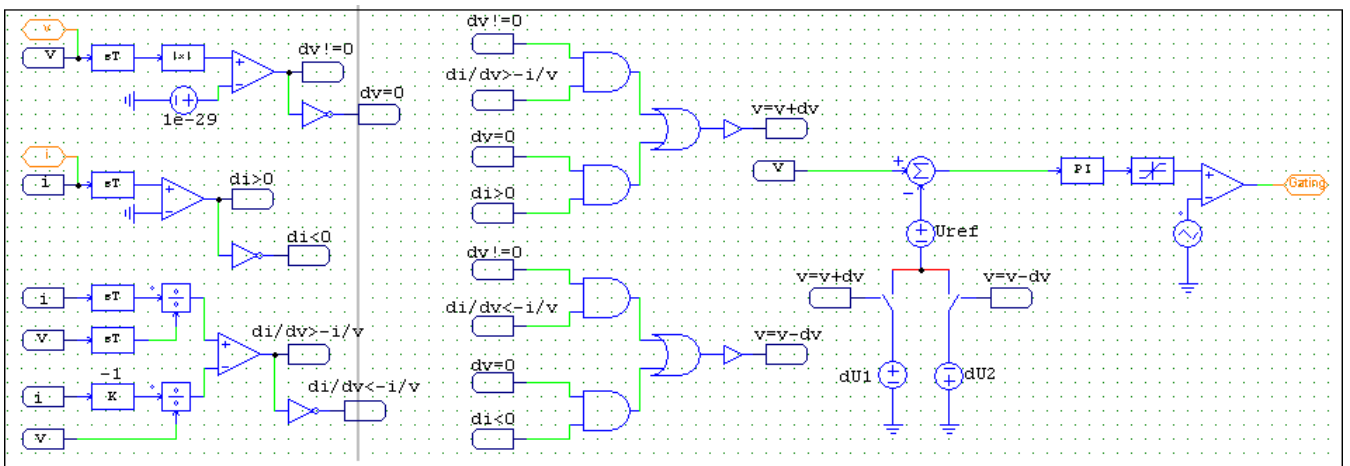


Рисунок 26. - Алгоритм INC, змодельований у PSIM

Метод INC є кращим серед двох інших алгоритмів MPPT. Він має багато переваг: По-перше, він визначає точний напрямок збурення робочої напруги. Унікальним є те, що при знаходженні MPP за умов ($dI/dV = -I/V$ і $dI = 0$) методу INC можна уникнути явища збурення, близького до MPP, яке могло б статися в інших методах MPPT. Це пояснюється тим, що ймовірність стану INC для MPP ($dI/dV = -I/V$) дуже мала на інших ділянках кривої $I-V$. Тому робоча напруга фіксується під час роботи MPPT-перетворювачів, що спрощує наступний етап фотоелектричної системи, будь то DC/DC (для живлення акумуляторів) або DC/AC перетворення для живлення багаторівневого інвертора.

2.3.3 Метод підйому на гору (НС)

Теорія алгоритму НС використовує умову, що потужність - $P(n)$ більше, ніж $P(n-1)$, подібно до алгоритму P&O. Однак, в той час як P&O використовує умову dP/dV для перевірки того, чи є поточна точка MPP чи ні, НС включає умову dP/dD в своє судження, де D - робочий цикл. Використання D як умови робить цей метод найпростішим у використанні. Добре відомо, що DC/DC і DC/AC перетворювачі зазвичай використовуються як пристрої інтерфейсу живлення між навантаженням і фотоелектричними модулями. Робочий цикл (D) цих перетворювачів використовується НС як тестовий параметр для визначення MPP. MPP визначається, коли виконується умова $dP/dD = 0$. На рис. 27 показана P-D крива силового інтерфейсного DC/DC перетворювача, підключеного до фотоелектричного модуля.

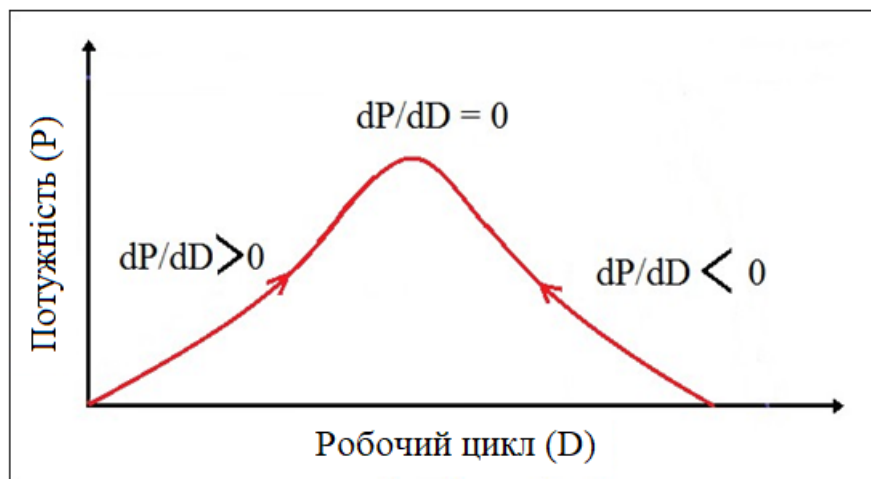


Рисунок 27: P-D крива DC/DC перетворювача, підключеного до ФЕП

Робочий цикл визначається шляхом порівняння поточної потужності з попереднім ($P(n) - P(n-1)$). Як показано на рис. 27, коли приріст потужності $dP > 0$, D потрібно збільшити, щоб зробити $dD > 0$. Коли $dP < 0$, D потрібно зменшити, щоб зробити $dD < 0$. Цей метод має багато переваг: Він має просту структуру і менше потребуючих параметрів. Однак фатальним недоліком є помилкове визначення напрямку відстеження. Це може статися в ситуації, описаній нижче:

З рис. 27 видно, що коли початкова робоча точка фотоелектричної системи знаходиться зліва від MPP, то D потрібно постійно збільшувати для того, щоб

відстежувати MPP. Коли робоча точка фотоелектричної системи знаходиться праворуч від точки максимальної потужності, D потрібно постійно зменшувати, щоб повернутися до MPP. Однак, коли робоча точка знаходиться в точці максимуму, але $(dP > 0)$, таким чином, приріст D буде більшим за нуль $(dD > 0)$, ніби робота в області $dP/dD < 0$ відповідає процедурі прийняття рішення методу НС, показаної на рис. 27. Таким чином, робоча точка буде віддалятися від MPP.

2.4 Перетворювачі що відстежують МРРТ

У цьому розділі показано фотоелектричну систему, підключену до конвертерів які відстежують точку максимальної потужності (МРРТ). Після цього розглядаються дві моделі перетворювачів з МРРТ, які були об'єднані за допомогою DC/DC перетворювача і методу відстеження Р&О. Вони були оцінені та порівняні для пояснення продуктивності цих пристроїв.

Максимальна потужність, яку можна отримати від фотоелектричної батареї, залежить від робочої точки $I-V$ кривої. Як вже згадувалося раніше, точка максимальної потужності (МРР) одного фотоелектричного масиву зазвичай розташовується навколо точки коліна кривої $I-V$. Встановлення МРРТ-перетворювачів необхідне для того, щоб відслідковувати коливання умов навколишнього середовища, які впливають на вихідну потужність фотоелектричної батареї. Таким чином, зручно розміщувати МРРТ в різних умовах навколишнього середовища. Як згадувалося в цій главі, $I-V$ крива, а також МРР змінюються при зміні рівня випромінювання або температури фотоелемента. В якості прикладу можна розглянути фотоелектричні модулі, які моделюються в цій дипломній роботі. На рис. 28 показано $P-V$ характеристики для типових фотоелектричних панелей потужністю 54 Вт і 100 Вт. МРР змінюється під впливом різних умов E_e .

При $E_e = 1 \text{ sun}$ (кВт/м²) і температурі елемента $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ вихідна напруга для МРР становить близько 54 Вт і 100 Вт для модулів Kyocera і Solara, відповідно.

Однак, коли E_e становить 0,75 сонця, температура елемента становить $50 \text{ }^\circ\text{C}$, а вихідна напруга становить близько 40 Вт і 78 Вт для модулів Kyocera і Solara,

відповідно. Для того, щоб отримати максимальну вихідну електричну потужність від фотоелектричного масиву при будь-якому рівні випромінювання і температурі фотоелемента, між фотоелектричним модулем і мережевим інвертором вставляється DC/DC перетворювач з апаратним забезпеченням MPPT для досягнення оптимального узгодження. Основна ідея технології MPPT полягає в автоматичному регулюванні напруги V_{mpp} , при якій фотоелектрична батарея може працювати на MPP. Використання інтелектуального алгоритму підтримує роботу фото модуля на MPP при зміні фото-випромінювання, температури, інсоляції та навантаження. Використовуються три основні алгоритми стеження, які були описані в попередньому розділі, і пропонується ряд топологій DC/DC перетворювачів, які є підходящою комбінацією для створення ефективного MPPT.

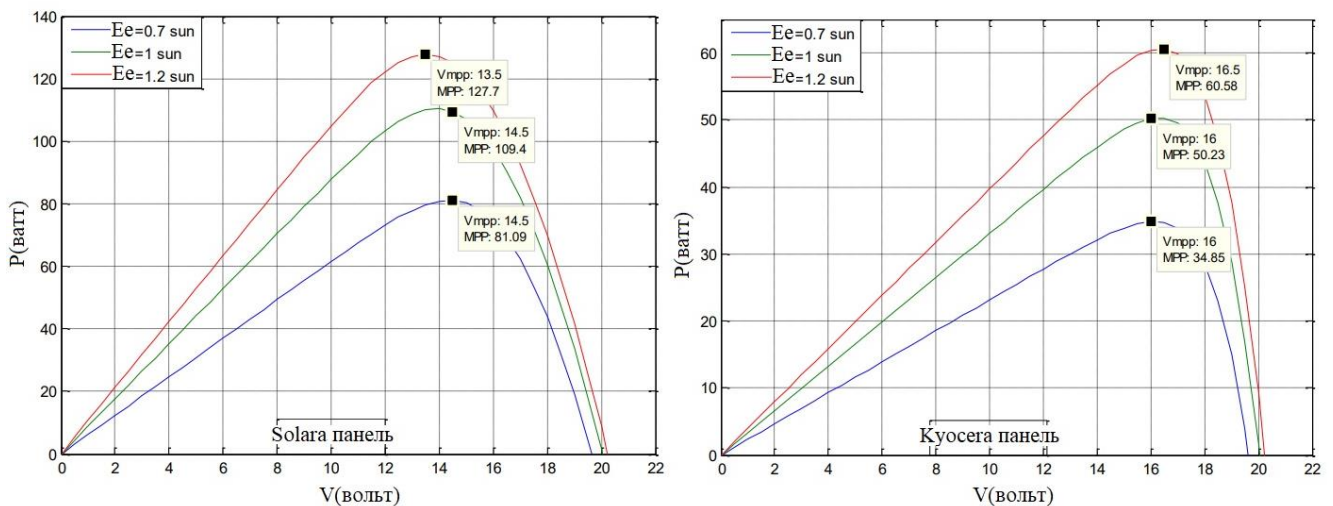


Рисунок 28. - P-V криві та MPP при зміні інтенсивності опромінення для цільових панелей

У літературі запропоновано багато схем керування DC/DC-перетворювачами для відстеження MPP таким чином, щоб вихідна потужність сонячного елемента була максимальною. На рис. 29 ілюструє загальну блок-схему MPPT-перетворювача, що відстежує MPP, для додатків змінного (AC) або постійного струму (DC) в фотоелектричних системах. У цьому розділі представлені дві найпопулярніші топології MPPT-перетворювачів, які є частиною інтерфейсного перетворювача для інтеграції у фотоелектричні мережі, як показано на рис. 27. Ці топології MPPT

перетворювачів - це підвищувальний перетворювач P&O та квазі- Z-перетворювач (англ. quasi-Z-Source - QZS).

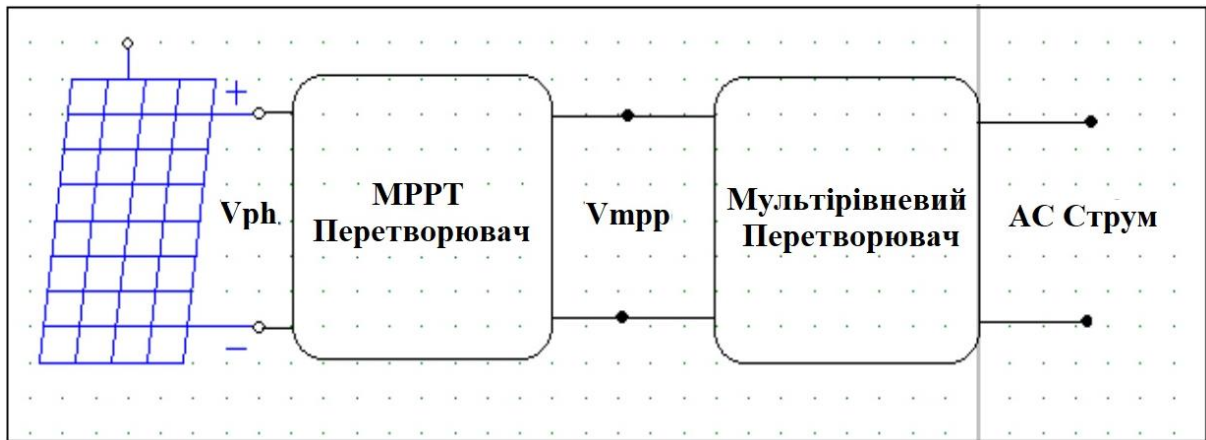


Рисунок 29. - Загальна блок-схема MPPT-перетворювачів для фотоелектричної системи

2.4.1 Перетворювач MPPT з квазі-Z-джерелом

Квазі-Z-джерело (QZS) може бути інтегроване в мережевий перетворювач і/або може бути реалізоване лише як MPPT-перетворювач. Відстеження MPP - це комбінація DC/DC перетворювача та одного з алгоритмів відстеження. Цей перетворювач використовує методи P&O та INC. Це нова перспективна технологія перетворення енергії, вдосконалена в порівнянні з Z-перетворювачем. Перетворювач Z-джерела - це імпедансний перетворювач, запропонований для вирішення недоліків традиційних перетворювачів (перетворювачів джерела струму та напруги). Перетворювач QZS призначений в основному для відстеження максимальної потужності фотоелектричної системи. Він ідеально підходить для взаємодії з фотоелектричними джерелами енергії. Перетворювач QZS має багато унікальних переваг у порівнянні з Z-перетворювачем: робота в режимі одно каскадного перетворення, безперервний вхідний струм (вхідний струм ніколи не падає до нуля, що призводить до зниження напруги джерела вхідної напруги, що особливо корисно в таких вимогливих додатках, як кондиціонери для сонячних панелей), відмінна надійність завдяки здатності витримувати пробої, низький пусковий струм під час

запуску або його відсутність, а також низький рівень синфазного шуму. Слід зазначити, що коефіцієнт підсилення напруги та ефективності QZS-перетворювачів обмежений у порівнянні зі звичайними допоміжними підвищувальними DC/DC-перетворювачами. Однак покращення коефіцієнта підвищення напруги конвертера QZS без збільшення кількості активних перемикачів було недавно запропоновано кількома авторами. Перетворювач QZS забезпечує стабільне регулювання напруги в ланці постійного струму і регулювання потужності всієї системи на стороні змінного струму.

Топологія QZS була впроваджена нещодавно для подолання деяких проблем Z-перетворювача. Значною перевагою QZS-перетворювача є те, що він повністю інтегрується з мережевим багаторівневим інвертором, як показано на рис. 30. Топологія квазі-Z-джерел складається з унікальних LC і діодних мереж, з'єднаних з мостом перетворювача. Деякі запропоновані структури цього перетворювача мають захисний вимикач, підключений між C2 і землею. Його роль полягає в тому, щоб ефективно захистити схему від пошкодження, коли відбувається пробій, а також підвищити вхідну напругу до більш високого рівня просто за рахунок зміни робочого циклу пробую.

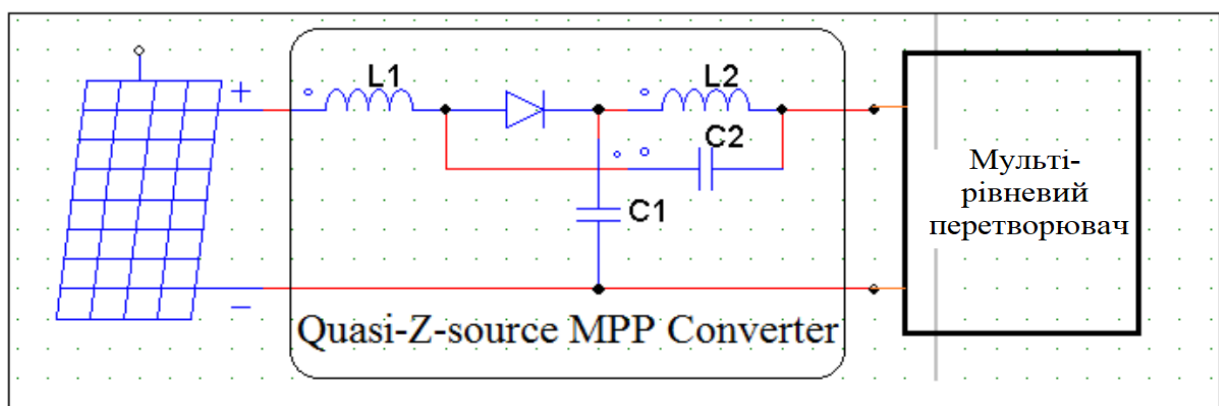


Рисунок 30. - МРРТ топологія квазі-Z-джерела для мережевої інтеграції фотоелектричної системи

Після того, як акумулятор повністю заряджений, напругу зарядки акумулятора необхідно регулювати, оскільки малий струм більше не заряджає батарею. У таких ситуаціях МРРТ не може бути досягнуто, оскільки буферна зона не здатна поглинати

додаткову потужність. Але, коли батарея розряджається, напруга батареї різко падає, і від сонячних модулів недостатньо потужності, тому потрібне або обмеження навантаження, або пожертвувати MPP для підтримки підвищеної напруги. Таким чином, мережа постійного струму має важливе значення для підтримання належного рівня вихідної напруги. Побудова електричної системи, необхідної для задоволення вимог до навантаження, буде розглянута пізніше.

2.4.2 Підвищувальний перетворювач MPPT

Цей перетворювач є єдиним перетворювачем MPPT з окремим керуванням перемиканням. Його не можна використовувати для інтеграції мережевого інвертора. Як показано на рис. 31, підвищувальний перетворювач повинен бути з'єднаний каскадом з мережевим багаторівневим інвертором. Така схема збільшує складність силової схеми, схеми керування, вартість і розмір пристроїв. Крім того, більша кількість силових електронних перемикачів призводить до більших втрат при перемиканні і, отже, до меншої ефективності. Принцип роботи підвищувального перетворювача залежить від замикання і розмикання силового електронного перемикача і має два режими роботи. По-перше, режим, коли перемикач T1 замкнутий. Цей режим відомий як режим зарядки. По-друге, це режим, коли перемикач T1 розімкнутий. Цей режим відомий як режим розрядки.

Блок відстеження MPP DC/DC перетворювача в поєднанні з одним з алгоритмів відстеження описано в розділі 3.3. Ідеальним методом для використання з підвищувальним перетворювачем є алгоритм НС, який включається для керування комутаційним ланцюгом (T1) перетворювача шляхом зміни робочого циклу. У режимі заряду перемикач T1 замкнутий, таким чином, індуктор заряджається від джерела через T1.

Зарядний струм, природно, є експоненціальним, але для простоти вважається, що він змінюється лінійно. Діод має зворотне зміщення і обмежує потік струму від джерела до навантаження. Потреба навантаження задовольняється за рахунок розряду конденсатора. У режимі розряду перемикач розімкнутий. Таким чином, діод

має пряме зміщення; отже, котушка індуктивності розряджається і разом з джерелом заряджає конденсатор і задовольняє потреби навантаження. Зміна струму навантаження повинна бути дуже малою і в багатьох випадках вважається постійною під час роботи [22].

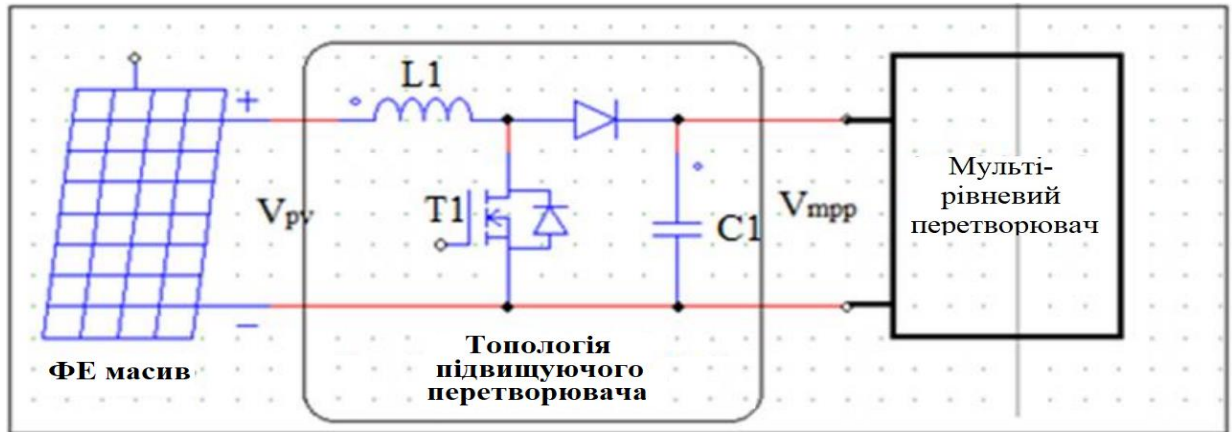


Рисунок 31: Топологія MPPT підвищуючого конвертера для підключення до мережі ФЕ системи.

2.4.3 Понижуючий перетворювач MPPT з методом збурення та спостереження.

У цьому розділі представлено автономну фотоелектричну систему, каскадно з'єднану за допомогою перетворювача з алгоритмом збурення та спостереження (англ. Perturb and Observe, P&O), і змодельованою за допомогою програми PSIM, щоб отримати MPP кривих P-V за різних умов навколишнього середовища. Таким чином, основна функція перетворювача, окрім зниження DC напруги фотоелектричного модуля, є проміжним силовим процесором, який може досягти MPP від фотоелектричного масиву. Зміна рівня напруги та струму дозволяє жити фіксоване джерело змінним навантаженням. Експериментальні результати отримані на основі співставлення PSIM. Алгоритм P&O MPPT добре відомий тим, що має дуже швидку реакцію і точний результат, оскільки він швидко досягає сталого стаціонарного режиму роботи. На рис. 32 показано відстеження MPP за допомогою методу P&O,

виконане PSIM, де температура T дорівнює 25 C , а освітленість E_c - 1 sun .

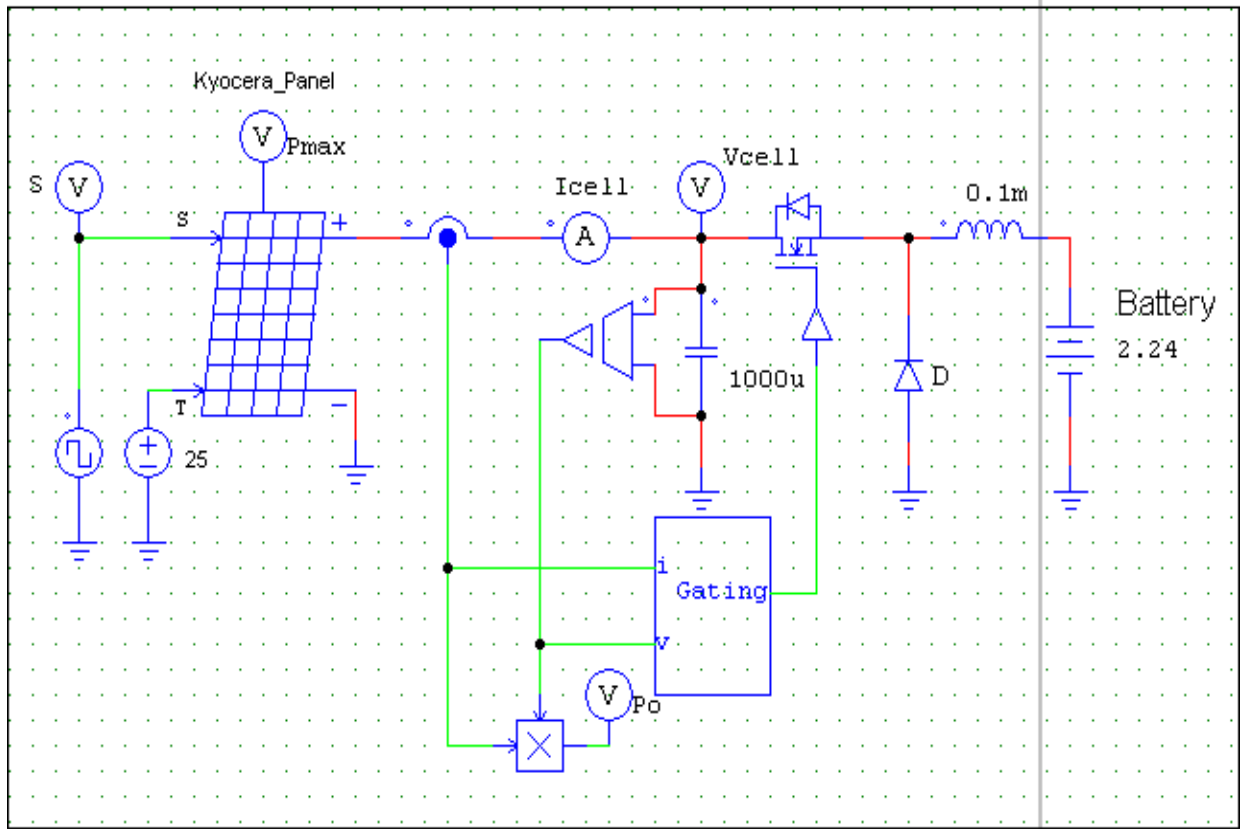


Рисунок 32. - Відстеження MPP за допомогою методу P&O

Максимальна потужність досягається, коли $dP/dV = 0$, напруга збурюється і спостерігається зміна вихідної потужності. Підсхемою керування є схема перемикачів P&O, показана на рис. 25. Метод P&O полягає в керуванні комутаційною схемою для зміни напруги певним чином для досягнення MPP від панелі Kyocera, підключеної до перетворювача. Рис. 33 ілюструє вихідну потужність, напругу та струм від змодельованого вище перетворювача. Панель марки Kyocera тестується під дією змодельованого перетворювача. Максимальна потужність становить 53 Вт, а максимальна напруга - 17 вольт, що ідентично максимальній напрузі і струму, зазначеним у таблиці (2) і спостерігається у P-V характеристиках. Струм становить 3,3, що дорівнює одній точці I_{mrr} . Однак, квадратна форма I_{mrr} зумовлена обмеженням симулятора, яке не має нічого спільного зі струмом, що протікає через ФЕП.

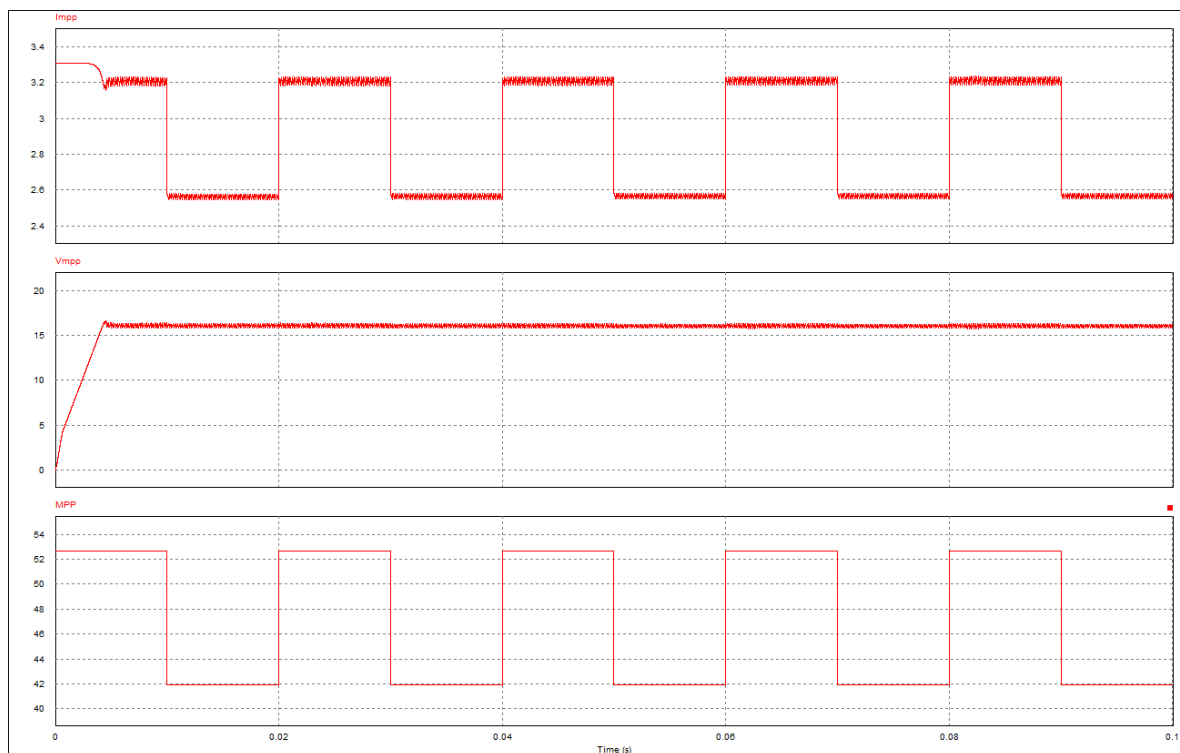


Рисунок 33: MPP, V_{mp} та I_{mp} понижуючого конвертера за методом P&O.

РОЗДІЛ 3

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Вимоги до навантаження багаторівневих перетворювачів для автономних застосувань покриваються оптимізованим дизайном конфігурації системи відновлюваних джерел енергії. Оптимізація конструкції системи має на меті виробляти енергію, яка може відповідати профілю навантаження і задовольняти його. При проектуванні та встановленні багаторівневого інвертора необхідно враховувати багато характеристик, таких як надійність, здатність до перенапруги та ефективність. Крім того, в мережевих перетворювачах напрямок потоку потужності має вирішальне значення для контролю реальної та реактивної потужності і корекції коефіцієнта потужності.

Головним чином, є два параметри профілю навантаження, які впливають на розподільчі системи, а також на специфікацію інвертора - це пікове навантаження та імпульсна потужність. Пікове навантаження можна розрахувати, просто підсумувавши номінальну споживану потужність усіх споживачів, яка є найбільшим можливим навантаженням, що може бути витягнуте споживачами. Однак розрахунок або навіть оцінка імпульсної потужності зазвичай є складним завданням, оскільки перехідний процес запуску (пусковий струм) більшості приладів не розраховується. Наприклад, холодильники та водяні насоси зазвичай містять однофазні асинхронні двигуни. Ці машини потребують пускового струму, що в кілька разів перевищує їхні номінальні значення в нормальному режимі роботи [21]. Наприклад, середнє споживання сільського споживача оцінюється приблизно в 45 кВт-год/місяць з імпульсною потужністю 5 кВт. Враховуючи, що більша частина споживання відбувається протягом 2 годин на добу (в кращому випадку), пікова потреба в потужності становить 750 Вт, а середня потреба в навантаженні - 63 Вт. Отже, цей споживач потребує багаторівневого перетворювача, здатного впоратися з 750 Вт безперервної потужності і 5 кВт імпульсної потужності. Отже, високоефективні багаторівневі перетворювачі повинні бути розраховані на високу імпульсну потужність і низьке споживання в режимі очікування.

3.1 Конфігурації систем відновлюваної енергетики

Ці системи використовуються в різних розмірах, від невеликих систем, що забезпечують кілька ват, до складних інтелектуальних енергосистем, пікові потужності яких перевищують мегават. Зазвичай, у випадку застосування для одного споживача, потрібні системи розміром до декількох кіловат з різноманітними конфігураціями, що використовуються для їх реалізації.

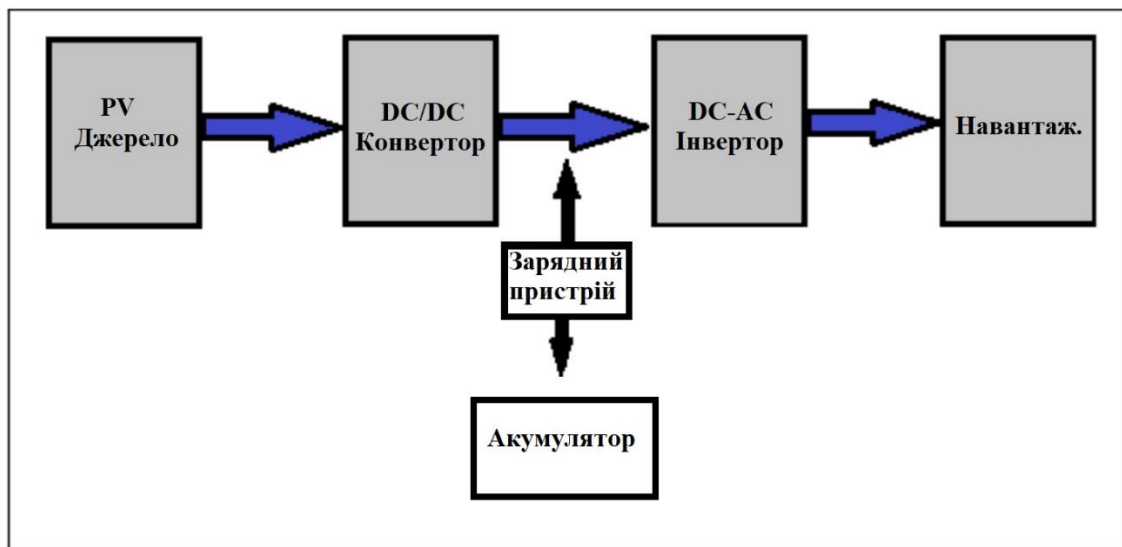


Рисунок 34. - Типова система з одним джерелом

На рис. 34 зображено приклад конфігурації системи з одним джерелом, поєднаної з фотоелектричною системою та резервним акумулятором.

Як було вказано вище в попередньому розділі, через переривчастий характер майже всіх відновлюваних джерел енергії, особливо фотоелектричних систем, єдиний споживач повинен включати пристрій зберігання енергії (акумуляторну батарею), який призначений для швидкого заряджання. Акумулятори підключені до інтелектуальних DC/DC перетворювачів, які дуже важливі для забезпечення роботи фотоелектричного модуля на піковій потужності (MPPT), а також для зниження або підвищення напруги фотоелектричного модуля відповідно до напруги постійного струму акумуляторів (12 вольт). Потім необхідний багаторівневий інвертор (DC/AC перетворювач) негайно отримує живлення безпосередньо від акумуляторної батареї або від MPPT. Напруга, яка подається на інвертор, повинна бути в діапазоні від 12 В до 96 В.

У випадку гібридних систем з декількома джерелами енергії, системи живляться від двох або більше різних джерел енергії. Гібридні системи забезпечують високий рівень надійності порівняно зі звичайними системами з одним джерелом. Це надійні системи, побудовані на інтеграції класичних та відновлюваних джерел енергії. Генератор змінного струму (AC GEN) поєднується з одним або декількома відновлюваними джерелами, як показано в прикладі на рис. 35. У звичайному режимі роботи системи інвертор ізольований від навантаження, поки працює генератор змінного струму. В аварійному випадку можна активувати гібридний режим і виконати ті ж самі дії, що і в конфігурації з одним джерелом.

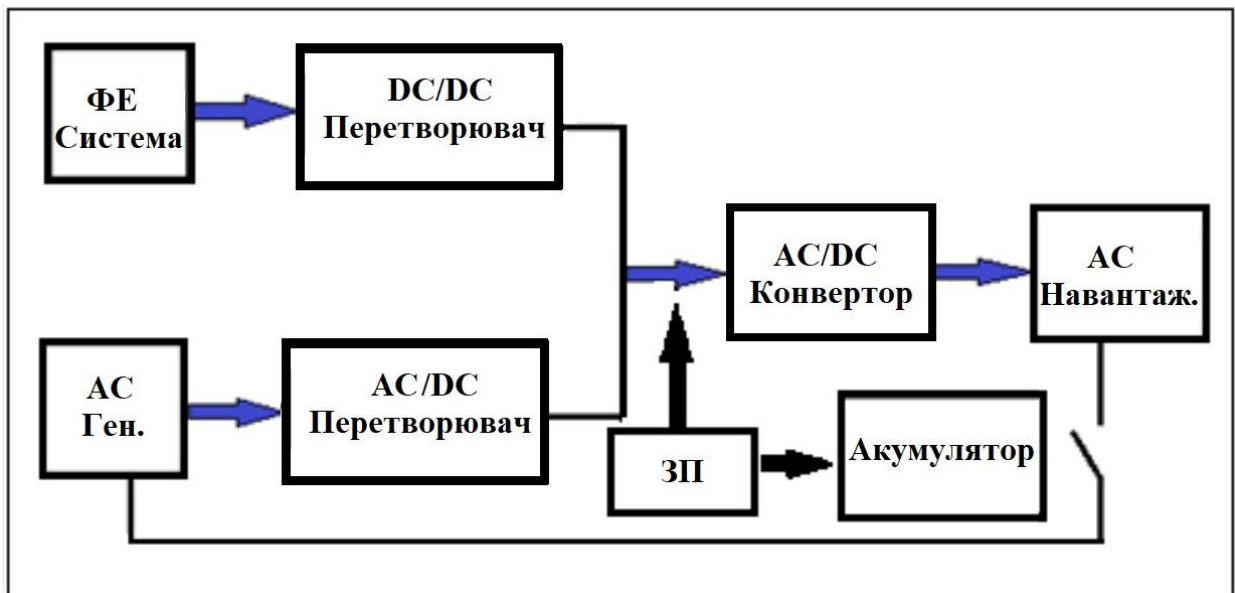


Рисунок 35. - Системи з кількома джерелами

Конфігурації повинні бути гнучкими, надійними і легко розширюваними для включення нових енергетичних ресурсів і навіть для створення інтелектуальної енергосистеми. У цих конфігураціях ресурси, за винятком генератора, не призначені для задоволення попиту на електроенергію, що виникає в результаті перенапруги. Існує дві конфігурації:

- конфігурація мережі постійного струму
- конфігурація мережі змінного струму

Переваги та недоліки кожної конфігурації пов'язані з інвертором. У конфігурації мережі постійного струму, показаній на рис. 36, інвертори та

перетворювачі, розташовані поруч з джерелами є єдиною альтернативою для генерації регульованої вихідної АС напруги. Таким чином, вони повинні бути дуже надійними, щоб задовольняти будь-які вимоги до навантаження.

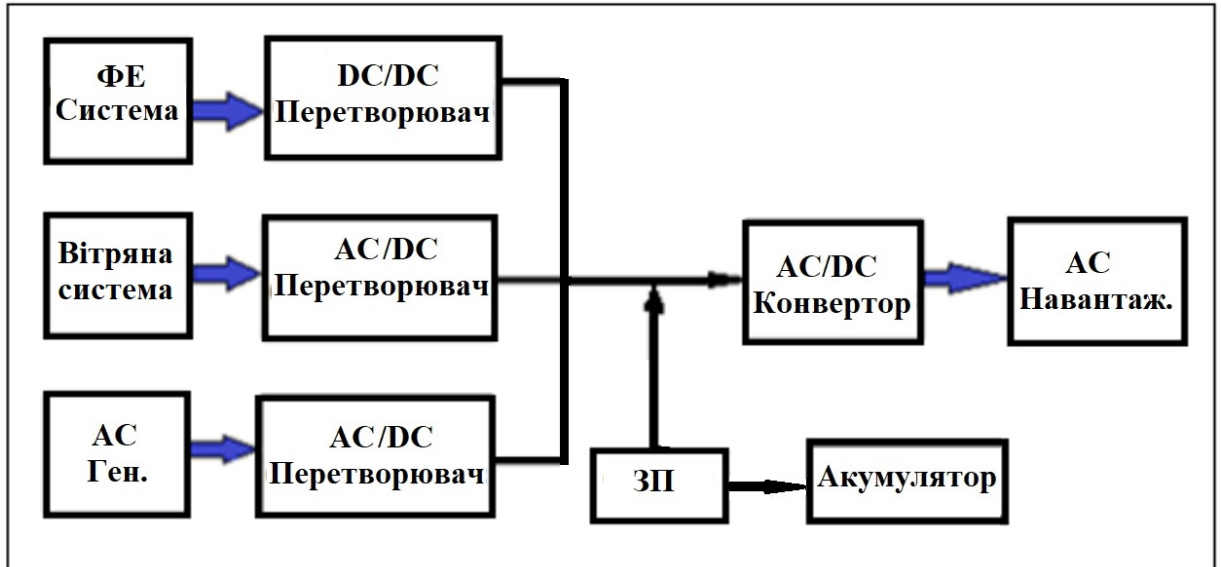


Рисунок 36. - Конфігурація мережі постійного струму

У конфігурації мережі змінного струму, показаній на рис. 37, акумуляторний інвертор знаходиться лише на передній лінії, що відповідає за коливання навантаження і захищає інші елементи системи.

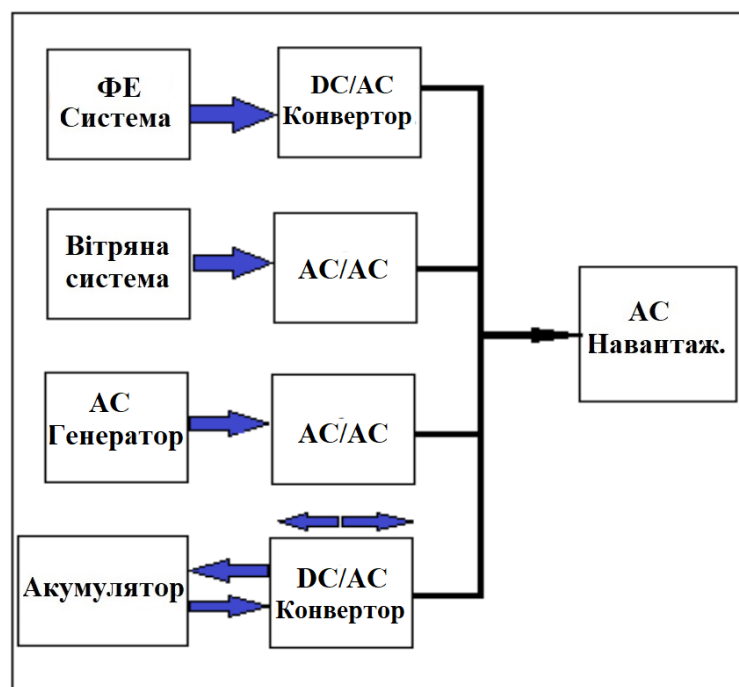


Рисунок 37. - Конфігурація мережі змінного струму

Таким чином, цей інвертор (DC/AC перетворювач) є найбільш критичною частиною. Акумуляторний інвертор не може бути двонаправленим, оскільки він підключений до навантаження. Однак, для зарядки акумуляторів у разі потреби потрібен додатковий зарядний пристрій.

3.2 Інвертори для автономних систем відновлюваної енергетики

Сьогодні на сучасному ринку високоякісні бренди багаторівневих інверторів повинні мати певні технічні характеристики для різних застосувань. Існує багато параметрів, таких як регулювання напруги, загальний коефіцієнт гармоніки, регулювання частоти і робоча температура, які можна вважати стандартними характеристиками, що мають бути досягнуті всіма брендами. Однак параметри продуктивності, вартість пристрою та додаткові функції використовуються для ідентифікації інвертора для конкретного застосування. Ці характеристики інверторів автономних систем відновлюваної енергії роблять їх гнучкими та надійними. Крім того, ці характеристики підтримують баланс компонентів системи.

Найважливішими характеристиками DC/AC перетворювача є наступні:

- надійність;
- стійкість до перенапруги;
- споживання без навантаження та ефективність.

3.2.1 Надійність

Надійність загалом - це здатність пристрою або системи виконувати свою специфічну функцію в ненормальних умовах і протягом певного періоду часу. Традиційно надійність системи пояснюється як середній час напрацювання на відмову (англ. Mean time between failures, MTBF). За останнє десятиліття галузь перетворювачів зазнала швидкого розвитку. Тим не менш, вони, на жаль, все ще мають погану репутацію систем з критичним балансом. Наприклад, у фотоелектричних системах очікуваний термін служби може становити 25 років, але

перетворювачі, які можна вважати найбільш критичним компонентом, не в змозі впоратися з цим періодом часу. Протягом двох десятиліть проблеми надійності привертають все більше уваги та досліджень з боку розробників перетворювачів відновлюваної енергії, щоб впоратися з реальними вимогами до якості систем відновлюваної енергетики, вимогам до якості систем відновлюваної енергетики та зростаючій конкуренції на ринку. Хоча стандартна гарантія на мережеві інвертори становить близько 10 років, розробники не впевнені щодо очікуваного терміну служби автономних перетворювачів, які вони виробляють. Розрахунки та практичні факти ілюструють, наскільки ці пристрої є критично важливими і потребують подальшого вдосконалення для забезпечення кращого використання відновлюваних джерел енергії. Наразі складними факторами в оптимізації перетворювачів є перепади напруги та висока температура, які зменшують термін служби силових електронних перемикачів. Багаторівневі перетворювачі пропонують фундаментальні рішення для подолання цих проблем і, таким чином, досягли високого рівня надійності. Вони також демонструють високу ефективність при меншому тепловиділенні та нижчій температурі, а також високу стабільність при менших перепадах напруги.

3.2.2 Стійкість до перенапруги

Надійні системи, здатні забезпечити роботу холодильника або будь-якого іншого пристрою, що працює від асинхронного двигуна, безумовно, корисніші і бажаніші, ніж системи, здатні забезпечити роботу лише невеликих пристроїв, таких як світильники, радіоприймачі та телевізори. Тому здатність до перенапруги можна вважати другою за важливістю характеристикою інвертора. Як правило, інвертори з низькою частотою регулювання можуть витримувати більшу перенапругу порівняно з перетворювачами, які працюють на високій частоті. На практиці, доступні дворівневі звичайні перетворювачі зазвичай витримують перенапругу приблизно вдвічі більшу, ніж їхня номінальна потужність, тоді як багаторівневі перетворювачі з низькою частотою перемикачів здатні витримувати перенапругу більш ніж втричі більшу, ніж їхня номінальна потужність.

3.2.3 Характеристика ефективності

Характеристика ефективності має пряму кореляцію з вартістю інвертора і впливає на загальну ефективність відновлюваної системи. Однак, досягнення високої ефективності пов'язане з погіршенням надійності системи, оскільки вища ефективність означає нижчу напругу та робочої температури. Вища ефективність призводить до кращої довговічності, оскільки менші втрати можуть призвести до менш глибокого розряду акумулятора. Вища ефективність призводить до високої вартості перетворювача, тому конструктори здебільшого шукають компроміс між ефективністю та вартістю інвертора. Наприклад, високоякісні перемикачі та матеріали сердечника трансформатора можуть підвищити ефективність пристрою, але призвести до збільшення виробничих витрат. Високоефективний перетворювач може оптимізувати загальну ефективність відновлюваної енергії. Вплив ефективності інвертора на загальну ефективність системи визначається профілем навантаження. Ефективність інвертора повинна включати в себе як інформацію про споживання без навантаження, так і ефективність при споживанні електроенергії. Реальна ефективність інвертора вимірюється, коли вся ця інформація доступна. Існує дві зручні моделі для аналізу характеристик ефективності та продуктивності інвертора; ці моделі визначаються за споживанням холостого ходу та ефективністю перетворення енергії. Наведені нижче рівняння ілюструють, як оцінити еквівалентну ефективність перетворення для заданої умовної точки ефективності.

$$\text{Стандартна модель } (\eta_c) = \frac{P_o}{P_{in}}$$

$$\text{Розширена модель } (\eta) = \frac{P_o}{\left(\frac{P_o}{\eta_c}\right) + P_{nl}}$$

Де:

P_o - це вихідна потужність;

P_{in} - це вхідна потужність;

η_c - це дворівнева ефективність;

P_{nl} - це споживання на холостому ходу.

У наведених вище рівняннях розширена модель відокремлює споживання холостого ходу від процесу перетворення. Тому при певному профілі навантаження будь-який інвертор може бути охарактеризований цими двома параметрами:

- споживання на холостому ходу
- середньозважена ефективність перетворення (η_{cw})

η_{cw} - це середнє значення зваженої кривої η_c , яка визначається функцією профілю навантаження (L_p). Його можна розрахувати за наведеним нижче рівнянням.

$$\eta_{cw} = \frac{\int \eta_c * P_{in} * P_o * L_p * dP_o}{P_o * L_p * dP_o}$$

3.3 Управління потоком потужності

3.3.1 Управління активною потужністю

Управління багаторівневими перетворювачами зосереджене на двох основних аспектах: напруга конденсатора ланки постійного струму і регулювання вихідної потужності. Напруга конденсаторів ланки постійного струму може бути легко збалансована за допомогою механізму вибору. Регулювання вихідної потужності обговорюється в цьому розділі. Зазвичай багаторівневий перетворювач може видавати в мережу лише постійну активну потужність, незалежно від потреб навантаження та стану коефіцієнта потужності. Однак, використовуючи методи керування потоком потужності, можна живити мережу необхідною потужністю та/або коригувати коефіцієнт потужності за допомогою вводу реактивної потужності. Управління реактивною потужністю обговорюється в наступному розділі. Як показано в третьому розділі, вихідна потужність фотоелектричних модулів є змінною через постійну зміну умов навколишнього середовища. Тому вихідну активну потужність необхідно контролювати, щоб живити мережу з можливою постійною потужністю і використовувати максимальну потужність від ФЕП. Решту потужності можна зберігати та/або використовувати для живлення системи реактивною потужністю.

Для того, щоб Для керування активною потужністю системи необхідно розглянути спрощену еквівалентну схему та фазову діаграму, показану на рис. 38.

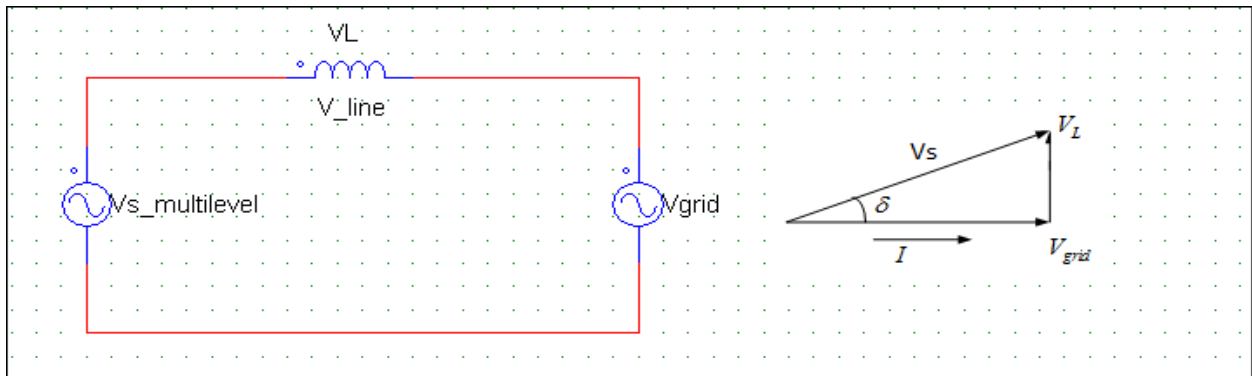


Рисунок 38. - Спрощена схема та діаграма фаз

Де:

V_s - середньоквадратичне значення напруги на виході багаторівневого перетворювача;

V_L - середньоквадратичне падіння напруги на індуктивності лінії;

X_L - індуктивність з'єднувальних провідників і кабелів;

V_{grid} - приймальна середньоквадратична напруга в мережі;

δ - кут між сіткою та багаторівневою вихідною напругою;

I - струм у з'єднувальних провідниках і кабелях.

Опором лінії та ємністю шунта нехтуємо, оскільки під час нормальної роботи індуктивність X_L знаходиться в послідовному з'єднанні з опором і є набагато більшою за опір лінії, а ємність шунта є дуже великою, оскільки вона вважається розімкненим контуром. Таким чином, активну потужність (P) можна розрахувати за наступним рівнянням:

$$P = \frac{V_s * V_{grid} * \sin(\delta)}{X_L}$$

Зрозуміло, що активною потужністю можна легко керувати, змінюючи кут зсуву фаз між багаторівневою вихідною напругою та напругою мережі. Фазовий кут

V_{grid} є постійним, тому фазовий кут мережі вибирається як фазовий кут опорного (керуючого) сигналу. Крім того, фазовий кут вихідної напруги багаторівневого перетворювача повинен контролюватися фазовим кутом сигналу модуляції, як пояснювалося в другому розділі. Тому в цьому випадку використовується замкнута система керування зі зворотним зв'язком для відповідної зміни фази сигналу модуляції.

3.3.2 Управління реактивною потужністю

Як пояснювалося в попередньому розділі, багаторівневий перетворювач може живити мережу тільки активною потужністю, оскільки потужність постійного струму не може бути реактивною. Однак у деяких випадках, наприклад, у пристроях стабілізації напруги, інвертори можуть виробляти напругу з певною амплітудою і кутом нахилу, що використовується для підтримки напруги або, відповідно, для корекції коефіцієнта потужності. Тому багаторівневий перетворювач повинен також мати можливість обмінюватися реактивною потужністю з мережею. Фактично, керування реактивною потужністю залежить від величини напруги. Тому керування реактивною потужністю може бути реалізовано шляхом відповідної зміни величини вихідної напруги. Подібно до керування активною потужністю шляхом зміни кута зсуву фаз модуляційного сигналу, керування реактивною потужністю може бути реалізовано шляхом зміни величини напруги опорного сигналу модуляції для формування бажаної вихідної напруги. Реактивна потужність (Q) регулюється відповідно до формули нижче:

$$Q = \frac{I_{pg} * V_{pg}}{2} \sin(\delta v - \delta i)$$

Де:

V_{pg} та δv - пікова напруга мережі та її фазовий кут;

I_{pg} та δi - піковий струм мережі та його фазовий кут.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

У цьому розділі обговорюється запропонована топологія. Також надається доступ до практичного проектування та оптимізаційного аналізу. Представлено симуляції, які показують деякі особливі характеристики запропонованого інвертора. Представлено традиційний каскадний багаторівневий перетворювач і стратегію під назвою "обрізана синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція" (англ. Clipped Sinusoidal Pulse Width Modulation, CSPWM), а також проаналізовано багаторівневі перетворювачі на основі розділового трансформатора. Як пояснювалося в другому розділі, традиційний каскадний багаторівневий перетворювач вимагає окремих зовнішніх джерел постійного струму, таких як батареї або конденсаторні ланки постійного струму.

У цій роботі модифіковано традиційний метод ШІМ, щоб запропонувати нову техніку для видалення гармонік високих порядків, які не можуть бути видалені за допомогою ШІМ. Робота також передбачає використання розділового трансформатора для блокування постійної складової та покращення загального рівня коефіцієнту нелінійних спотворень. Таким чином, ізоляційні трансформатори послідовно вставляються на кожному рівні.

Ізольовані джерела та компоненти доступні в області фотоелектричних систем, оскільки перетворювач необхідний для використання джерел DC розосереджених фотоелектричних модулів. Однак у традиційних застосуваннях ізольовані джерела DC дуже складно регулювати, рівномірно розподіляти і контролювати, щоб жити кілька елементів перетворювача. Таким чином, фотоелектрична система усуває цей серйозний недолік і надає їй унікальну перевагу. На закінчення, для роботи каскадного багаторівневого H-моста без ізольованих зовнішніх джерел постійного струму були введені ізолюючі трансформатори, які можуть використовуватися як фільтри низьких частот для зменшення dV/dt . У цій главі запропоновано використовувати розділовий трансформатор як елемент усунення гармонік і для керування вихідною напругою, якщо це необхідно.

4.1 Інструмент моделювання

Моделювання багаторівневих перетворювачів зіштовхується з величезними труднощами, оскільки побудова найпростішого багаторівневого перетворювача з трьома вихідними рівнями вимагає складної комутаційної схеми і пристроїв. Характеристики форми сигналу (амплітуда і частота) використовуються для ідентифікації гармонік, які допомагають визначити вимоги до фільтрації. На практиці, програма PSIM є дуже зручною і здатна швидко генерувати і контролювати сигнали перемикачів. За допомогою цієї унікальної комп'ютерної програми можна створювати та розробляти стандартні аналогові/цифрові підсхеми.

Моделювання проводилося за допомогою програми PSIM. Ця програма вважається найпотужнішим програмним забезпеченням для моделювання електричних конструкцій. Воно включає в себе адекватні інструменти для побудови всієї фотоелектричної системи від ФЕР до електромережі. Він також підходить для тестування багаторівневих перетворювачів з дуже високою роздільною здатністю. Отримані форми сигналу є дуже точними з високою графічною роздільною здатністю і можуть бути швидко змінені. Більше того, ця програма надає THD і частотну область для будь-якої хвилі. Це полегшує процес тестування хвиль багатьох багаторівневих перетворювачів і різних хвиль, які виробляються відповідно до запропонованих рішень. Ці можливості є стимулом для використання PSIM у цій роботі для проектування та аналізу структур багаторівневих перетворювачів, а також для реалізації подальших розробок у компактний і гнучкий спосіб для опису всіх комутаційних і вихідних сигналів.

4.2 Технологія CSPWM

У цьому розділі представлено новий алгоритм CSPWM для зменшення THD, який використовує простий спосіб побудови модуляційного сигналу. Це новий тип традиційних методів ШІМ на основі несучої частоти. Запропонований підхід генерує

сигнал ШІМ для багаторівневих інверторів, який є узагальненим методом і використовує метод сходження для зміни модульованого сигналу, а отже, і послідовності перемикання, для досягнення вихідної хвилі з меншим ТНД.

Спостерігаючи за вихідними сигналами, видно, що вони мають імпульси, які є результатом послідовності перемикань. Кожен імпульс у вихідному сигналі містить багато частотних складових. Форма модуляційного сигналу призначена для видалення цих пульсацій. По-друге, сходова природа від нижньої до наступної вершини вихідної форми сигналу передбачає ще одне джерело гармонік. Ці сходи також містять певну кількість імпульсів, причому кількість імпульсів пропорційна ширині сходів. Тому, коли сигнал модуляції має вищу амплітуду, частина, що містить сходинки, буде крутішою, а отже, сходинки будуть вужчими, що призведе до меншої кількості імпульсів на сходинку, а отже, до меншого значення ТНД. Рис. 41 і 42 візуально відображають вищезгаданий опис.

Як було описано раніше, чим вища амплітуда (тобто чим крутіший нахил перетину від 0 до $\pi/2$), тим вужчі сходинки (тобто менше імпульсів перемикання). Однак амплітуда не повинна перевищувати амплітуду опорного сигналу. Таким чином, у цій роботі представлено підхід, який дозволяє збільшити нахил транзакції і зберегти амплітуду на рівні еталонної за допомогою двох кроків. По-перше, збільшення амплітуди для досягнення найкращого нахилу з найменшою кількістю імпульсів. По-друге, відсікання амплітуди синусоїдальної хвилі, щоб вона дорівнювала еталонній, тому цей підхід називається CSPWM. Метод тестування був використаний для того, щоб з'ясувати, наскільки потрібно збільшити амплітуду, щоб видалити ШІМ пульсації. ШІМ реалізується шляхом збільшення модуляційного сигналу на 13% і відсікання напруги на рівні опорної амплітуди. Значення 13% було обрано після багатьох тестувань методом проб та помилок. Отже, для багаторівневого перетворювача багаторівневого перетворювача з вихідною напругою 750 В, сигнал модуляції повинен бути збільшений до $(750+0,13*750)$ 850 В, як показано на рис. 39.

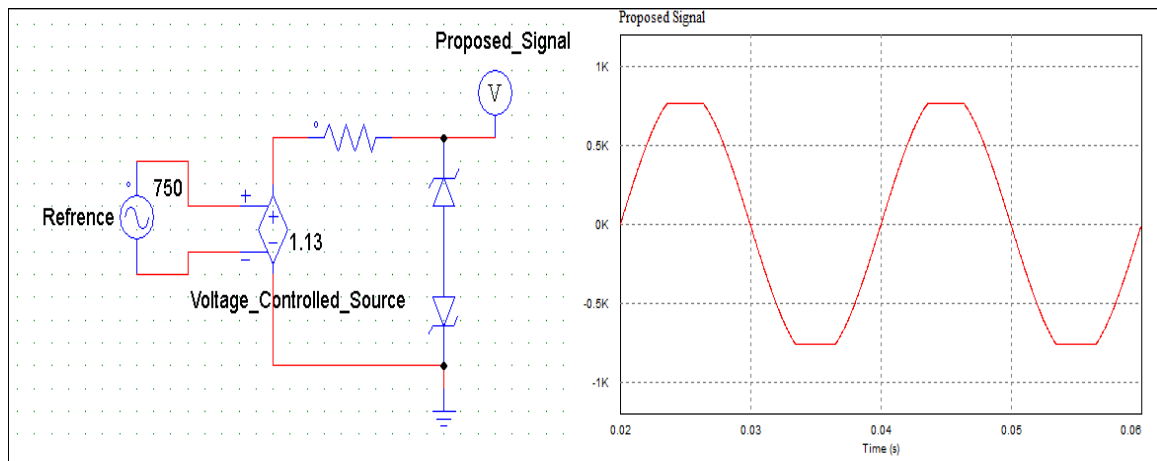


Рисунок 39. - Схема фільтра для генерування обрізаного синусоїдального сигналу (CS)

Для створення нової форми модуляційного сигналу синусоїдальний опорний сигнал (або керуючий сигнал, що імітує напругу мережі, як описано в розділі 4) можна послідовно з'єднати з іншою напругою, величина якої дорівнює 13% від основної (або підключивши його до джерела, керованого напругою, як показано на рис. 39, 40, а потім зрізати з величиною, що дорівнює опорному сигналу.

Рис. 40 ілюструє посилення опорної напруги на 13% в новій структурі багаторівневого перетворювача. Для семирівневого перетворювача кількість H-мостових елементів становить 3 (це також кількість відокремлених зовнішніх джерел постійного струму (фотоелектричних модулів)). Пік опорної напруги становить 750 В; отже, кожне джерело постійного струму повинно мати напругу 250 В, що є амплітудою рівня. Кожен рівень може бути синтезований окремим джерелом постійного струму, наприклад фотоелектричним модулем. Стратегії модуляції класифікуються відповідно до методів перемикання. Як згадувалося у другому розділі, найпопулярнішими методами, що використовуються для реалізації концепції ШІМ для багаторівневих перетворювачів, є SPWM, THPWM і запропонована методика CSPWM. Вибір частоти перемикання (2 кГц) забезпечує компроміс між втратами на перемикання та електромагнітними завадами.

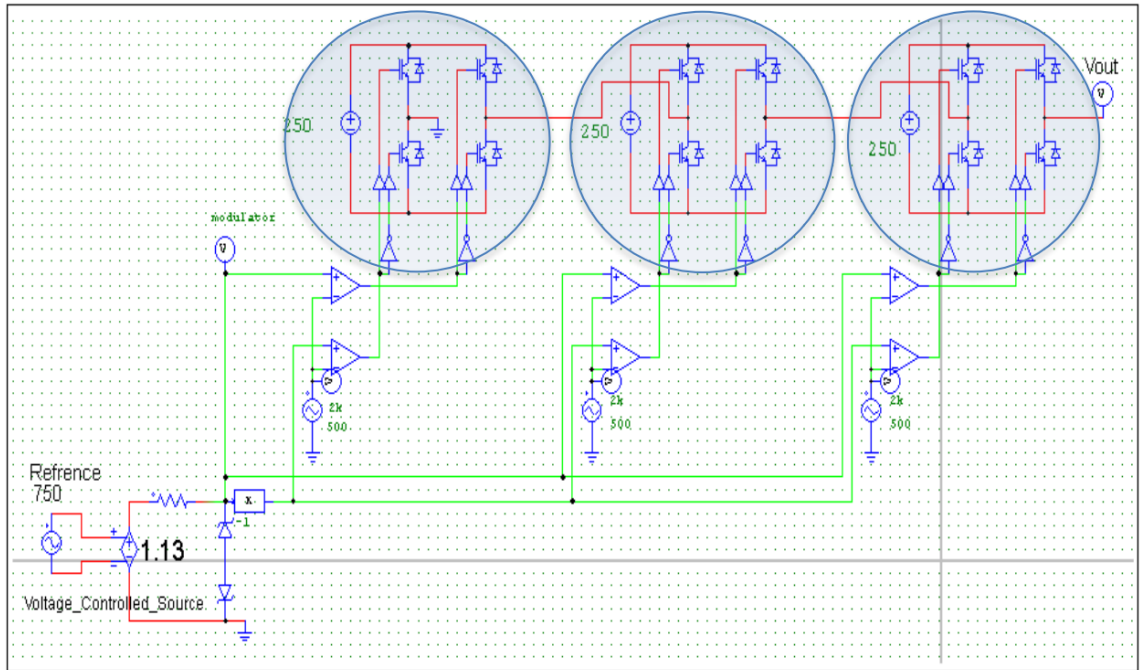


Рисунок 40. - Каскадний Н-мостовий семирівневий перетворювач з CSPWM

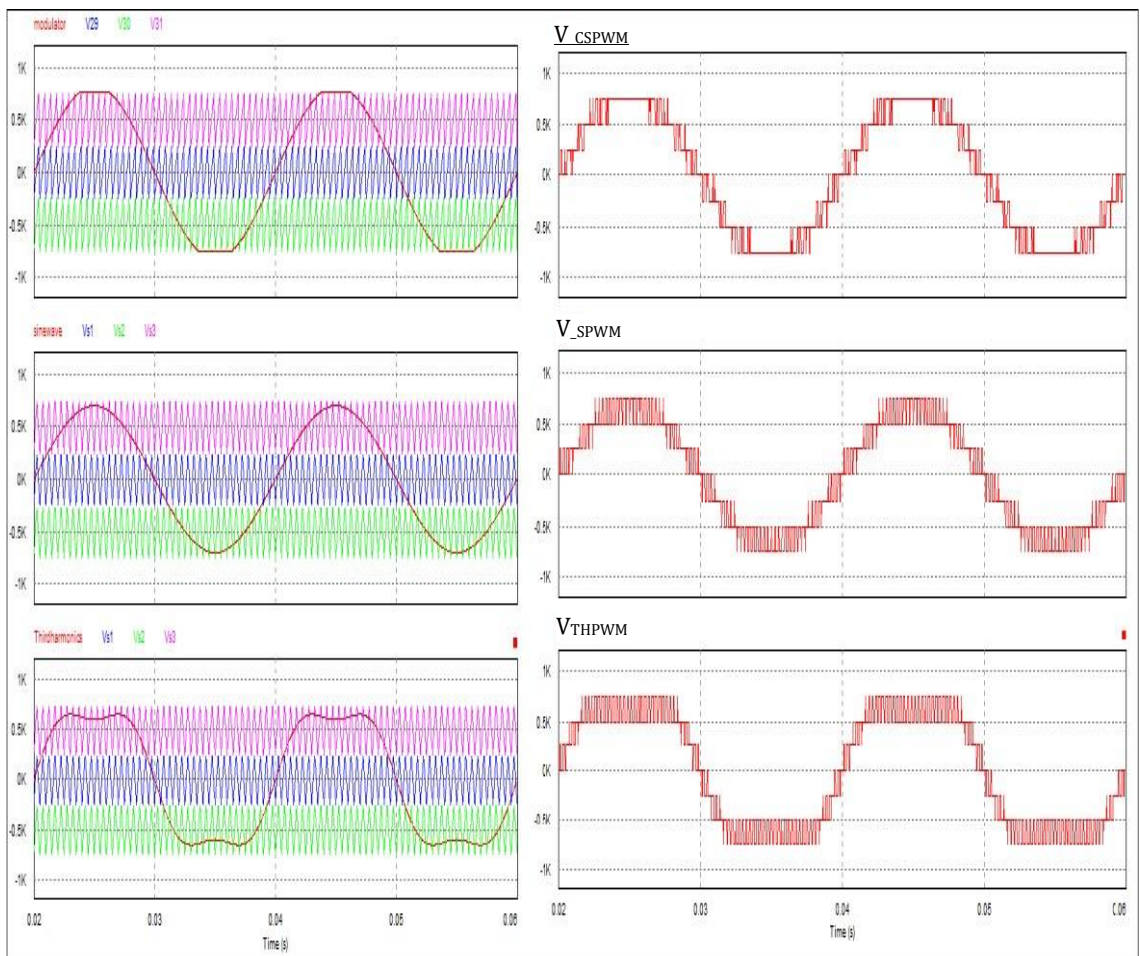


Рисунок 41. - Сигнали модуляції та семирівнева вихідна напруга

На рис. 41 показано багаторівневі сигнальні хвилі з трьома основними традиційними методами ШІМ (PWM) на основі несучої (CSPWM, SPWM і TH-PWM). Вихідна напруга запропонованого методу (VCSPWM) має найменшу кількість комутаційних імпульсів і, отже, містить найменше високочастотних гармонік.

На рис. 42 пояснюється частотна область і, отже, THD як для запропонованого методу, так і для традиційних методів ШІМ на основі несучої для вихідної напруги семирівневого інвертора, продемонстрованого на рис. 41.

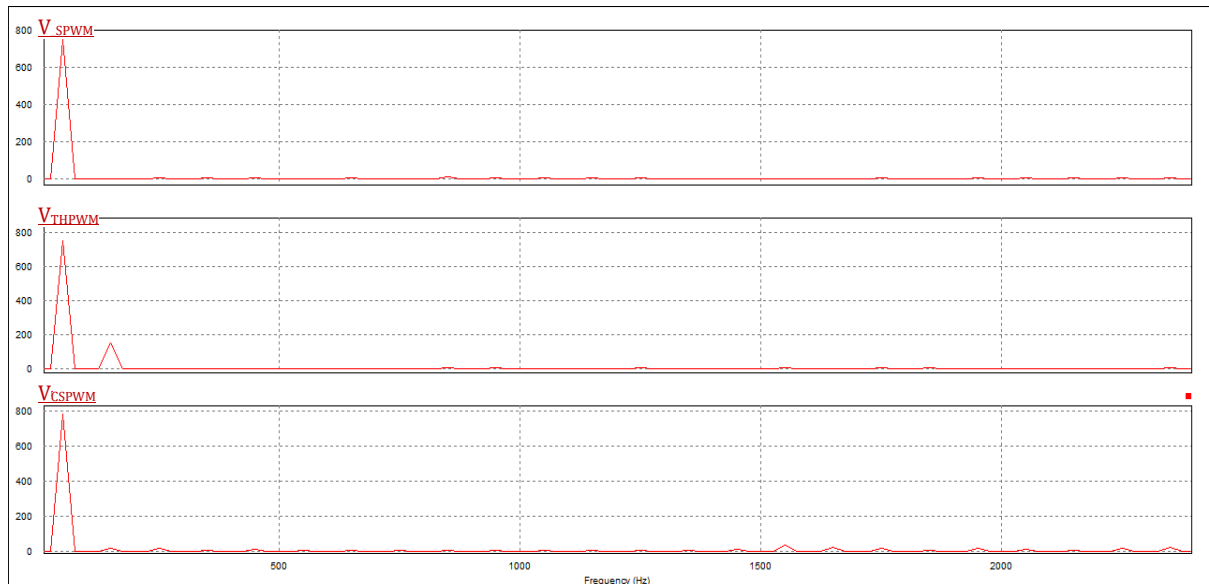


Рисунок 42. - Частотний спектр 7- рівневої форми сигналу з CSPWM, SPWM та THPWM

Спостереження з рис. 42 та показники THD з PSIM показують, що синусоїдальна ШІМ (SPWM) вважається бажаною технікою ШІМ, яку потрібно реалізувати. Однак спостереження з рис. 42 та симулятора PSIM показують, що вихідна напруга перетворювача (амплітуда основної частоти) становить 742 В, що є меншим за бажане значення опорної напруги 750 В. Таким чином, це є практичним для окремих систем, не підключених до мережі. Вихідна напруга інвертора менша за напругу мережі. Це заважає інвертору експортувати енергію з фотоелектричної системи в мережу, якщо напруга не буде підвищена до рівня напруги в мережі. THPWM має деякі переваги над SPWM з точки зору правильної основної напруги: амплітуда основної частоти становить 750, що є тією самою напругою, яка потрібна на виході. Однак, вона виробляє вищий THD і пульсації струму, ніж SPWM.

Метод CSPWM підходить для всіх типів багаторівневих інверторів з будь-якою кількістю рівнів. Крім того, вихідна напруга CSPWM (V_r) має найкращі результати порівняно з THPWM і SPWM з точки зору вихідних спотворень. По-перше, як показано на рис. 42, запропонована методика забезпечує напругу, що дорівнює опорному сигналу.

По-друге, загальний коефіцієнт гармонійних спотворень (THD) для кожного методу було розраховано за допомогою PSIM і наведено в таблиці нижче:

Таблиця 2

THD	
(Основна частота)	
Fundamental Frequency	5.0000000e+001 HZ
V_SPWM	1.9339436e-001
V_THPWM	2.9534122e-001
V _r	1.6455123e-001

Ця таблиця показує, що THD для CSPWM (позначений як V_r) є меншим, ніж значення THD для THPWM і SPWM, тоді як THD для SPWM становить 0,193, а для THPWM - 0,295, а для запропонованого методу він становить 0,164. Отже, цей результат може значно зменшити вимоги до фільтрації для запропонованого методу. Подібно до процесу 7-рівневого перетворювача, запропонована топологія може покращити вихідну напругу 13-рівневого перетворювача. Результат показав очікувані показники.

Показник THD значно покращився, коли було використано запропоновану методику. Крім того, 13-рівнева форма сигналу має більше рівнів, що призводить до меншого THD. Однак більша кількість H-мостових комірок вимагає більшої кількості трансформаторів і, таким чином, призводить до більш громіздкої структури. Результати застосування методу CSPWM для 13-рівневого перетворювача представлені на рис. 43, 44 і 45.

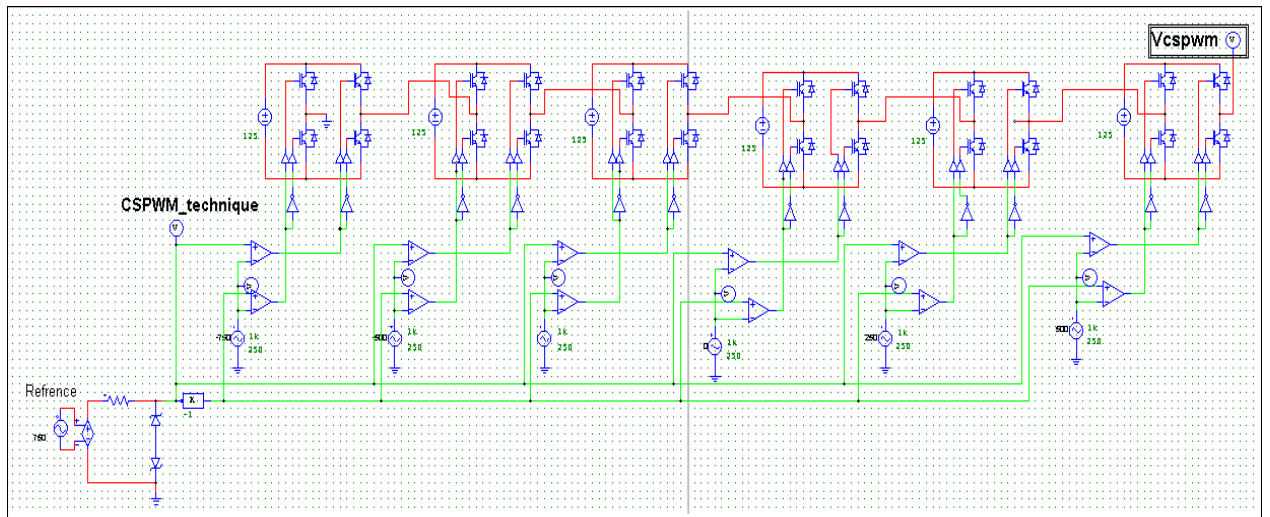


Рисунок 43. - Каскадний Н-мостовий 13-рівневий перетворювач за запропонованою концепцією

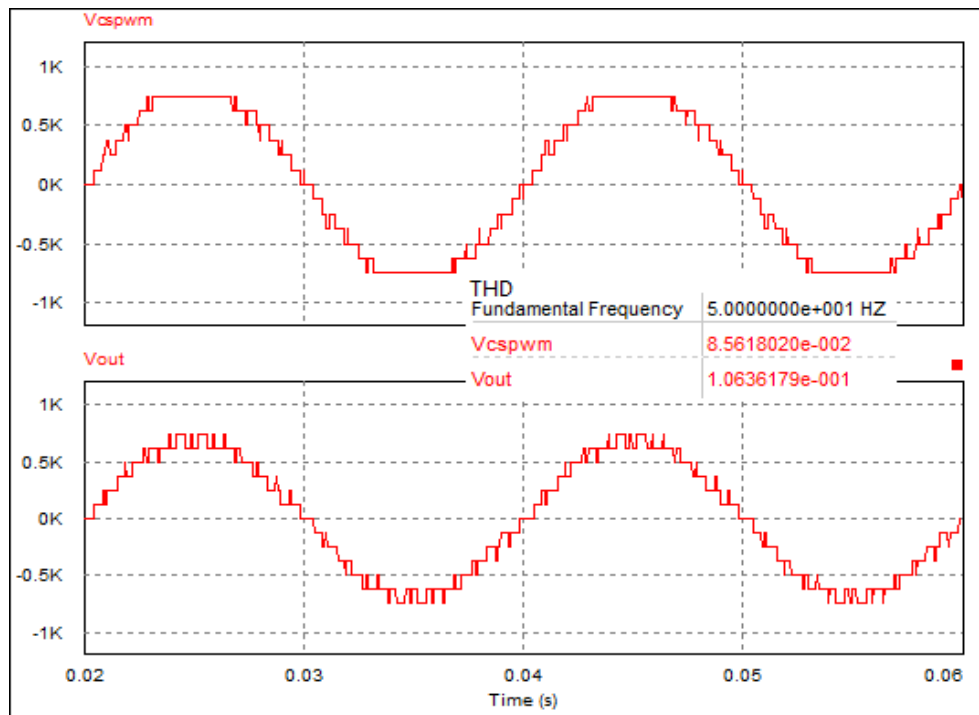


Рисунок 44. - Сигнали модуляції та 13-рівнева вихідна напруга з CSPWM

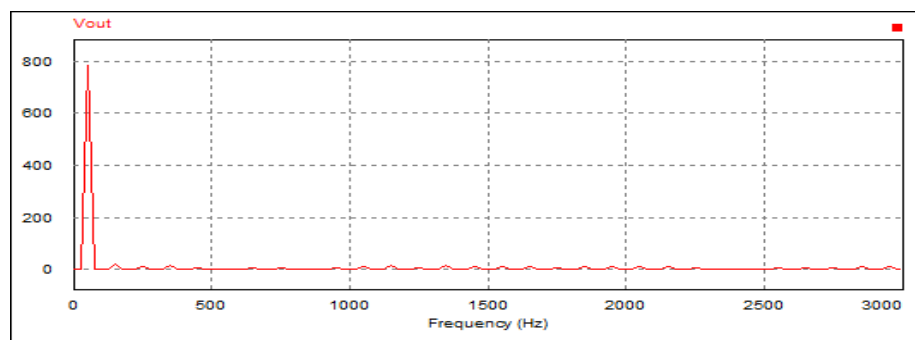


Рисунок 45. - Частотний спектр 13-рівневої форми сигналу із запропонованою концепцією

4.3 Топологія з кількома трансформаторами

Основна перевага багаторівневого перетворювача над звичайним дворівневим інвертором полягає в тому, що він генерує багаторівневу напругу змінного струму з меншим коефіцієнтом нелінійних спотворень (THD) як при лінійному, так і при нелінійному навантаженні. Існує два типи перетворювачів: без трансформатора і з трансформатором. Без трансформаторний перетворювач не має трансформатора на виході і використовується в системах великої потужності. Трансформатор розміщується перед навантаженням з метою ізоляції від землі, швидкої реакції і меншого THD. Подібно до каскадної топології H-моста, виходи розділових трансформаторів з'єднуються в каскад, а не безпосередньо з виходами H-моста. В результаті, всі H-мости можуть бути підключені до спільної точки і потрібне лише одне джерело DC, як показано на рис. 46.

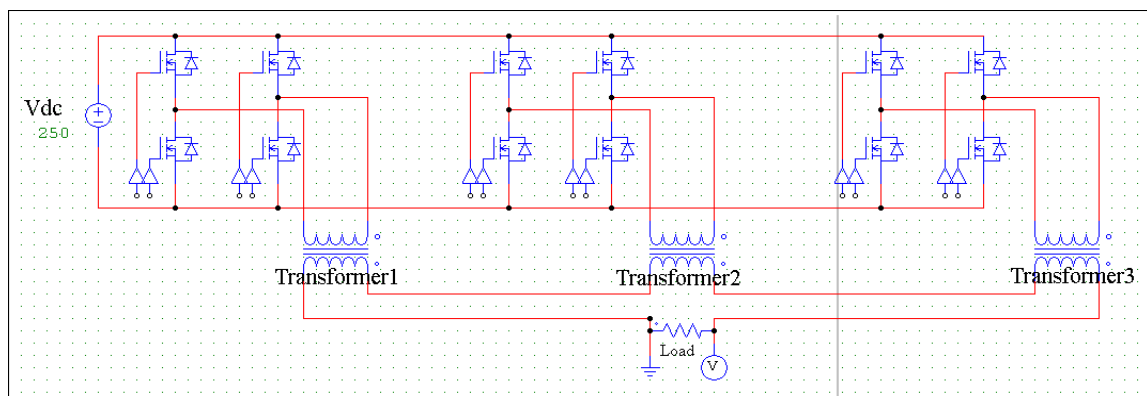


Рисунок 46. - Ізоляційний трансформатор багаторівневого перетворювача з одним джерелом DC

Трансформаторний перетворювач має важливі характеристики, такі як забезпечення гальванічної розв'язки між джерелом живлення і навантаженням, що запобігає протіканню струму через землю. Ці трансформаторні перетворювачі затребувані в таких сферах застосування, наприклад, як медичне обладнання. Де з метою безпеки необхідна ізоляція між вихідною обмоткою і джерелом живлення.

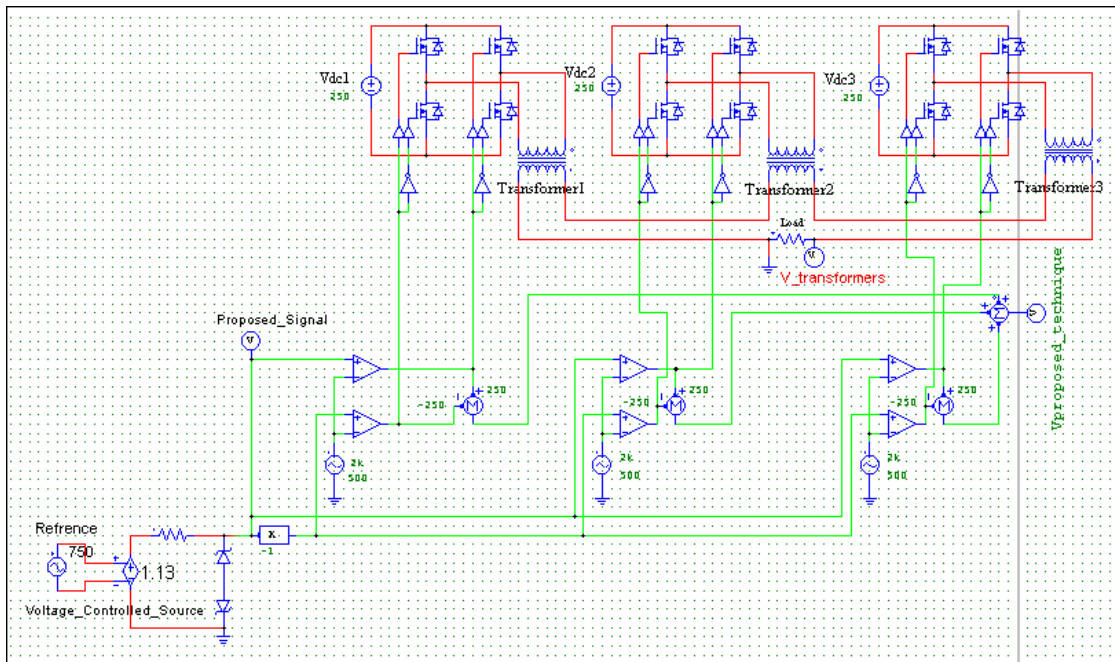


Рисунок 47. - 7-рівневий перетворювач з топологією CSPWM і трансформаторами

На рис. 47 показано топологію з декількома трансформаторами, що складається з трьох комірок (з'єднаних трикутником). Наразі на світовому ринку доступні деякі комерційні інвертори GBRES, які базуються на цій топології. Однак, вони не можуть дати той самий результат за допомогою інших методів, окрім CSPWM. На рис. 48 наведено осцилограми 7-рівневого перетворювача з трансформаторною топологією, що демонструють вплив трансформаторів.

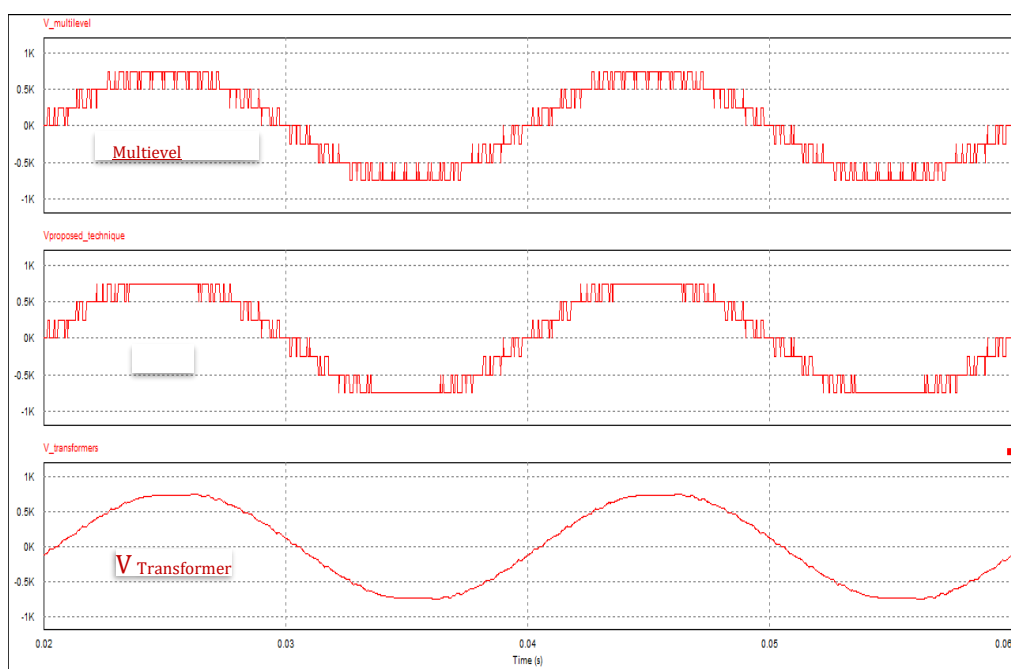


Рисунок 48. - 7-рівнева форма сигналу з CSPWM і трансформаторною топологією

Трансформаторний інвертор має можливість блокувати DC напругу і фільтрувати високочастотні перешкоди, що генеруються інвертором і нелінійним навантаженням. Блокування DC напруги також дуже важливе для навантаження, що містить магнітні компоненти, такі як котушки індуктивності та трансформатори. Як видно з наведеного вище малюнка, на виході AC інвертора присутній компонент DC напруги, який може бути усунутий за допомогою трансформатора. На рис. 49 зображено частотну область, щоб довести здатність трансформаторів фільтрувати високочастотні гармоніки. PSIM розрахував THD, як показано в таблиці нижче:

Таблиця 3

THD	
Fundamental Frequency	5.0000000e+001 HZ
V_multilevel	1.8897816e-001
Vproposed_technique	1.6455123e-001
V_transformers	2.6404318e-002

THD 0,18 був згенерований багаторівневою формою сигналу, 0,164 - запропонованою методикою, а потім зменшився до 0,026 за рахунок додавання трансформатора. Як показано на рис. 49, метод CSPWM усунув більшість високих гармонік. Крім того, трансформаторна топологія усунула низькочастотні ланки гармонік.

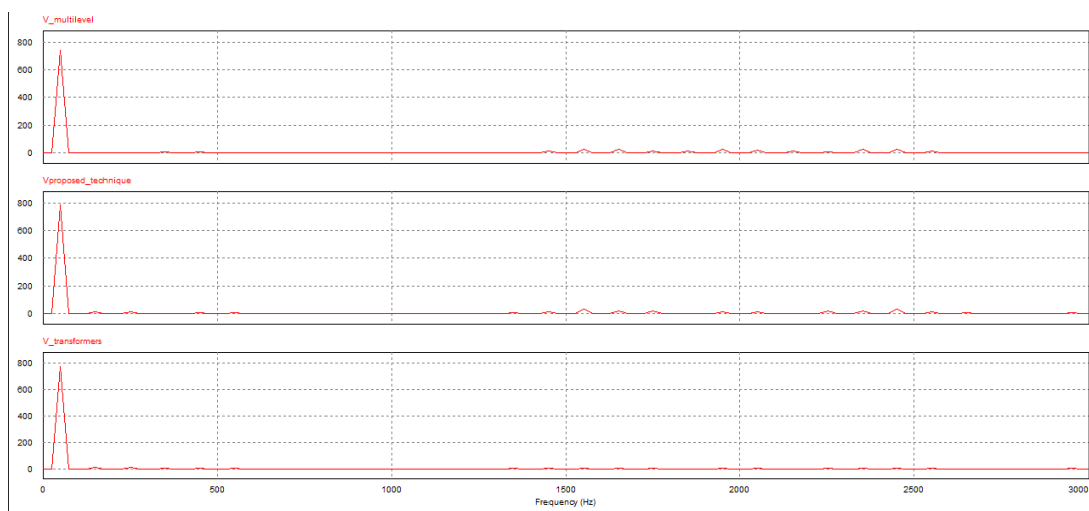


Рисунок 49. - Частотний спектр 7-рівневої форми сигналу з CSPWM та трансформаторною топологією

Ця топологія є гнучкою і може бути використана для будь-якої кількості рівнів.
 На рис. 50 зображено 13-рівневий перетворювач з трансформаторною топологією.

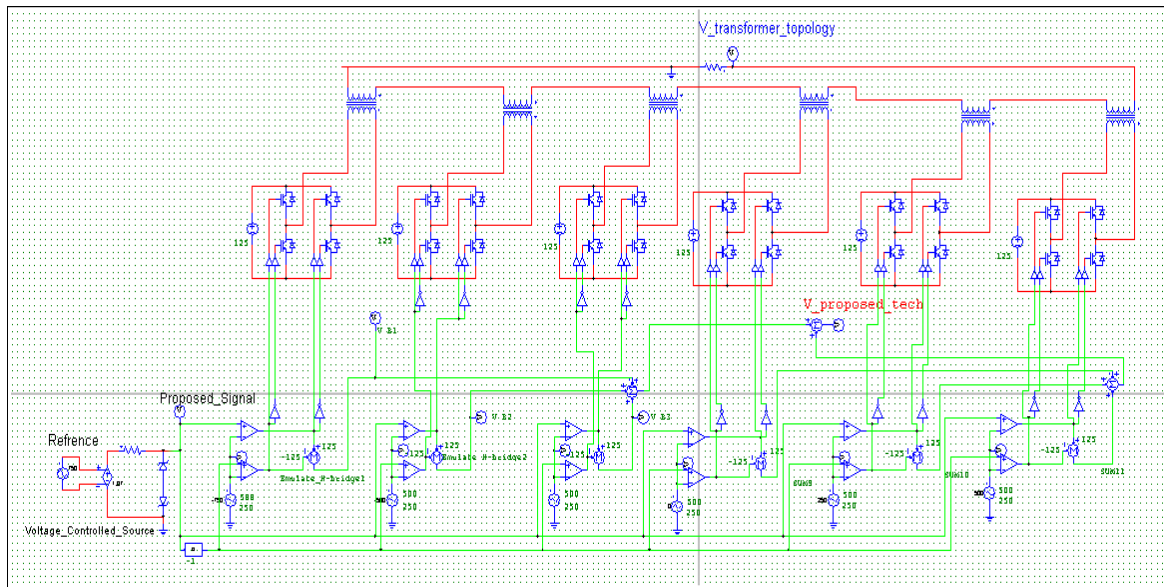


Рисунок 50. - Каскадний Н-мостовий 13-рівневий перетворювач з ізолюючими трансформаторами

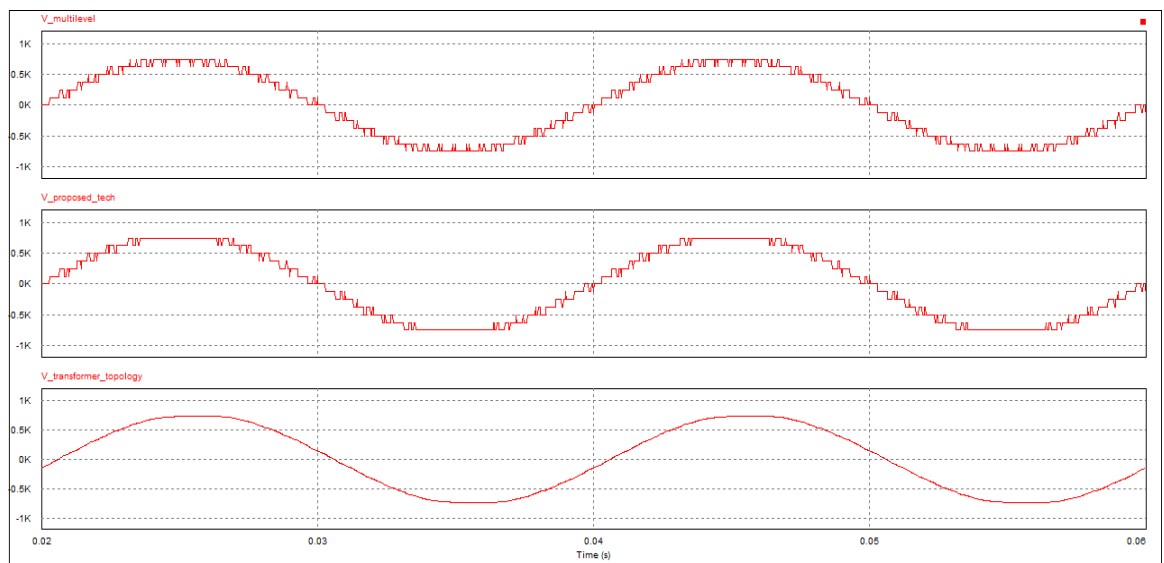


Рисунок 51. - 7-рівнева форма сигналу із запропонованою методикою та трансформаторною топологією

Наведені нижче показники THD для PSIM для рис. 51 становлять 0,094 для багаторівневої форми сигналу, 0,084 для запропонованої стратегії і лише 0,02 для трансформаторної топології.

Таблиця 4

THD	
Fundamental Frequency	5.0000000e+001 HZ
V_multilevel	9.4954819e-002
V_proposed_tech	8.4537174e-002
V_transformer_topology	2.1701628e-002

Трансформатор на виході інвертора використовується як фільтр нижніх частот і для розділення DC напруги, тим самим зменшуючи метод керування або вимоги до фільтрації. Блокування складової DC струму необхідне, щоб уникнути перенасичення сердечника машин. Однофазний трансформаторний перетворювач часто живить нелінійне навантаження, наприклад, силову електроніку, яка забруднює систему спотвореною хвилею, яку необхідно ізолювати. Однак у цієї топології є недолік: максимальний струм, що споживається інвертором, обмежений номіналом мережевих трансформаторів, і тому збільшення потужності трансформаторів може значно обмежити номінальний струм інверторів і призвести до збільшення вартості, ваги та габаритів.

На закінчення, згідно з новою стратегією, відповідна послідовність перемикання перетворювача буде скоригована для отримання іншої форми вихідного сигналу з меншим THD, ніж SPWM. Алгоритм CSPWM і топологія трансформатора пропонують новий метод мінімізації загальних гармонійних спотворень (THD) вихідної напруги інвертора і використовують простий сигнал модуляції для усунення причин виникнення гармонік. Запропонований метод може бути поширений на перетворювачі з будь-якою кількістю рівнів.

4.4 Трифазні багаторівневі перетворювачі

Ці системи являють собою комбінацію трьох індивідуальних імпульсних багаторівневих перетворювачів, з'єднаних в зірку, а потім з'єднаних з вихідним трансформатором, синхронізованим для отримання симетричного трифазного

виходу, як показано на рис. 52. Кожен з цих перетворювачів має кут зсуву фаз 120 градусів, що виводить на наступний перетворювач для формування позитивної послідовності 3-фазної напруги.

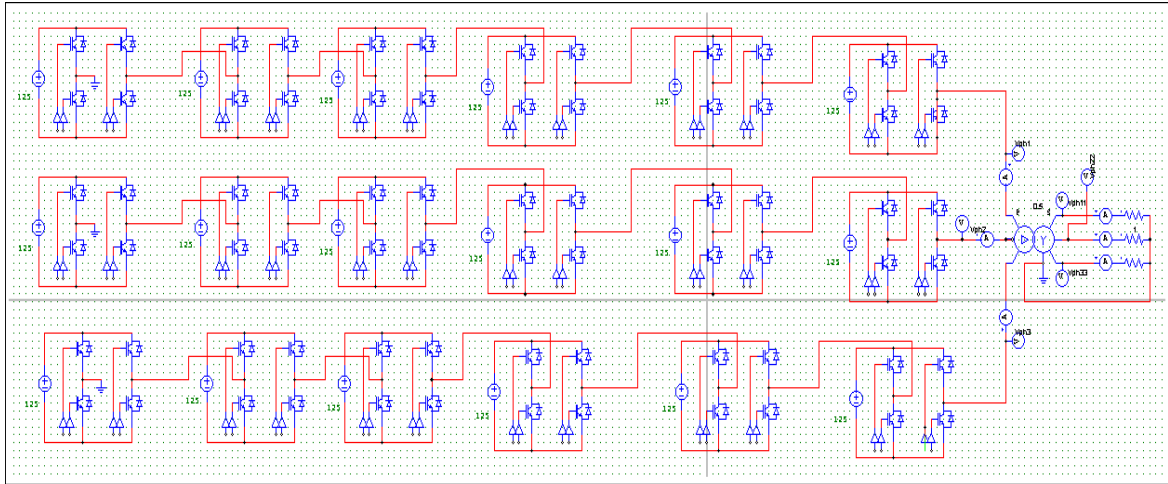


Рисунок 52. - Структура трифазного багаторівневого перетворювача

Трифазний трансформатор забезпечує ізоляцію між входом і виходом та підвищує напругу до необхідного рівня. Запропоновані топології також можуть бути використані в цій структурі для покращення характеристик за рахунок зменшення ТНД. На рис. 53 показано розташування 3-фазної структури з трансформаторною топологією.

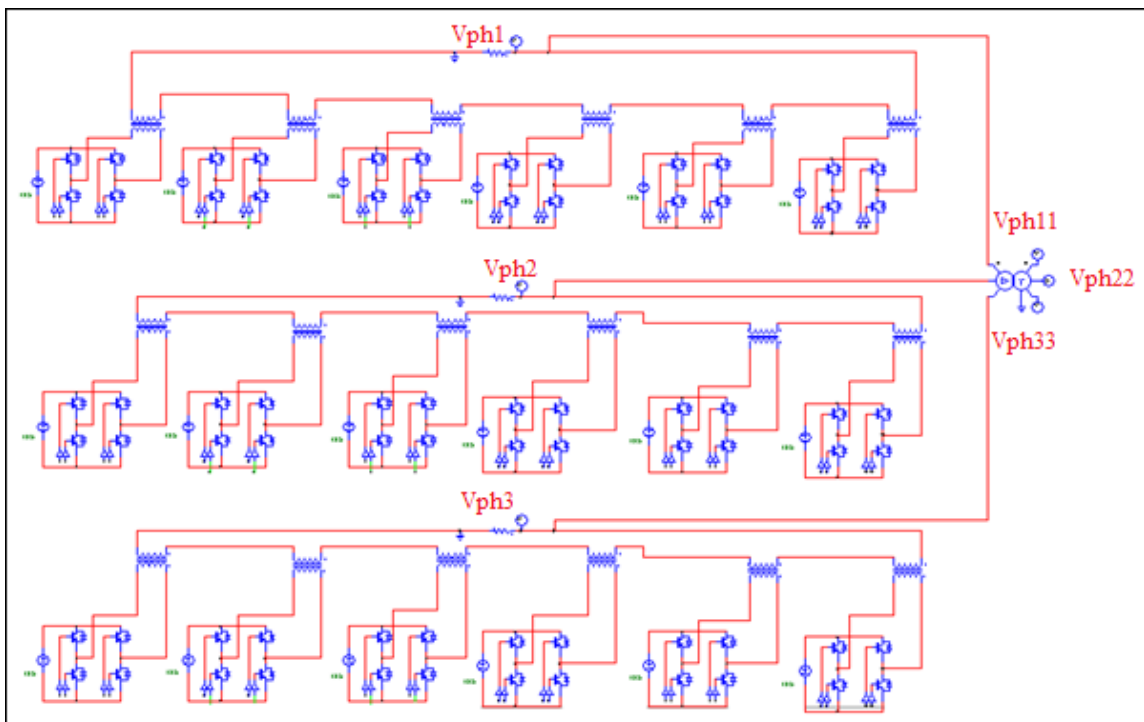


Рисунок 53. - Трансформаторна топологія для 3-фазного перетворювача

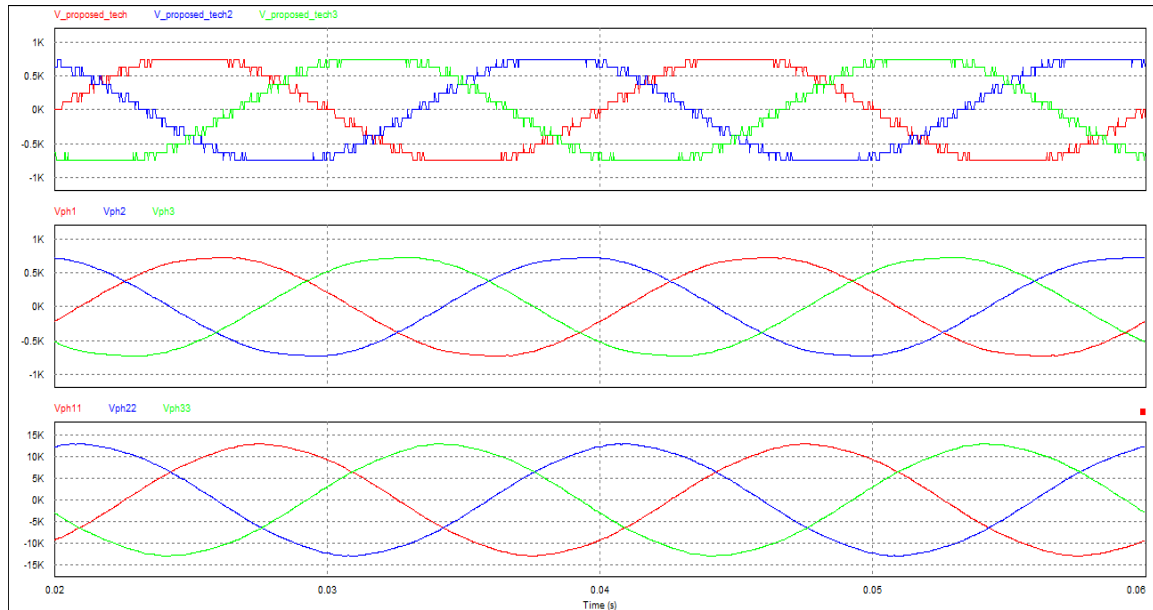


Рисунок 54. - Вихідні напруги 3-фазного багаторівневого перетворювача

Структура вихідних хвиль трифазної напруги показана на рис. 54. Напруги CSPWM - це трифазні напруги для кожного багаторівневого перетворювача. Vph1, Vph2 та Vph3 - це напруги після застосування трансформаторної топології. Vph11, Vph22 і Vph33 - напруги після 3-фазного трансформатора Delta-Why. Для запропонованої топології виведено значення THD на виході.

Таблиця 5

THD	
Fundamental Frequency	5.0000000e+001 HZ
V_proposed_tech	8.4537174e-002
V_proposed_tech2	8.5740354e-002
V_proposed_tech3	8.5079685e-002
Vph1	1.9668528e-002
Vph2	2.0788266e-002
Vph3	2.0811911e-002
Vph11	1.1191664e-002
Vph22	1.0758562e-002
Vph33	1.0795884e-002

THD зменшився до 0,08 для CSPWM, 0,02 для напруги після трансформаторної топології і, нарешті, 0,01 після 3-фазного трансформатора. Причиною такого покращення THD є індуктивна природа трансформатора, яка фільтрує високочастотні

гармоніки. Добре помітно, що розмір покращення зменшується після кожного з трьох кроків, це пояснюється тим, що менший THD на першому кроці призводить до меншої кількості THD, яку потрібно усунути на другому кроці, і ще меншого покращення на третьому кроці (тобто, якщо на вхід 2 і 3 кроку подається чиста синусоїда з 0 THD, це означає, що на другому і третьому кроці не буде THD, який потрібно усунути, і покращення буде дорівнювати 0).

Нарешті, варто згадати, що номінальна потужність трансформатора повинна бути вищою за номінальну потужність перетворювача (приблизно на 30%), оскільки трансформатори будуть отримувати потужність, яка включає гармоніки, що викликають вихрові струми. Оптимальна потужність трансформатора повинна відповідати профілю навантаження автономних систем.

ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі досліджено багаторівневі топології перетворювачів, які грають важливу роль у використанні енергії і використовуються як в мережевих, так і в автономних фотоелектричних системах. Ці дослідження проведені для рівнів напруги менше 1000 вольт. Такі інвертори необхідні для того, щоб працювати з покращеними характеристиками ефективності, надійності, здатності допускати досить великі навантаження. Підходи ШІМ базуються на вірному виборі частоти перемикавання. Вибрана частота перемикавання становить (2-3) кГц. Така низька частота дозволяє комутаційним пристроям справлятися з великою потужністю і високими коливаннями dV/dt з незначними втратами. Ці комутатори також можуть бути дуже стійкими до несподіваних збоїв, які можуть призвести до виходу системи з ладу. Підвищення температури, імпульсна потужність і перепади напруги є основними чинниками, які скорочують термін служби напівпровідників. Таким чином, ефективний вибір комутації та захист комутаторів призводить до підвищення надійності багаторівневих перетворювачів.

Представлено математичний аналіз двох ФЕП (Kyocera і Solara), змодельованих за допомогою програмного забезпечення Matlab для типових сонячних панелей потужністю 54 Вт і 100 Вт. Змодельована електрична схема та діаграма діодів фотоелементів для отримання кривих I-V та P-V-характеристик. Моделювання представляє аналіз продуктивності фотоелемента і ФЕП під впливом чотирьох основних параметрів: впливу добротності кремнію, внутрішнього послідовного опору, сонячного випромінювання і температури - ефективних параметрів, які визначають продуктивність і надійність фотоелектричної системи. Вхідними даними для цього методу є E_c , I_{sc} і V_{oc} , які дають точний опис продуктивності панелей.

Розглянуті модифікації багаторівневого інвертора для зменшення загальних гармонічних спотворень (THD) і, таким чином, вимоги до фільтрації гармонік. Ця модифікація була представлена в два етапи:

1. Модифікація схеми перемикавання для синтезу сигналу з обрізаною модуляцією для покращення THD та амплітудної характеристики вихідного сигналу.

2. Підключення виходів блоків багаторівневого перетворювача до первинних обмоток трансформаторів, а вторинні обмотки з'єднані послідовно. Ці трансформатори діють як пригнічувачі гармонік і можуть бути використані як регулятори напруги, якщо це необхідно.

Багаторівневі перетворювачі з каскадною H-мостовою топологією з 3-, 7- і 13-рівневими вихідними сигналами та окремими джерелами DC напруги живлення були змодельовані, імітовані та модифіковані для зменшення THD та вимог до фільтрації. Також змодельовано схеми з 4-рівневим фіксуєчими діодами і топологією з плаваючими конденсаторами. Техніка CSPWM була реалізована шляхом відсікання опорного сигналу для синтезу модуляційного сигналу, що призводить до меншого THD і бажаної вихідної амплітуди. Цей метод було вдосконалено шляхом встановлення трансформаторів на виході. Методика була досліджена за допомогою програми моделювання PSIM. Програма дозволяє користувачеві формувати часову і частотну області і розраховувати THD для вихідної напруги багаторівневих перетворювачів. Збільшення кількості рівнів покращує характеристики і зменшує загальний коефіцієнт гармонік. Використання методу відсікання ще більше покращує результат і зменшує спотворення. Крім того, встановлення трансформатора на виході кожного рівня і послідовне з'єднання вторинних обмоток матиме більший вплив на поліпшення вихідного сигналу і зменшення спотворень.

Результати методу CSPWM та трансформаторної топології були розраховані за допомогою PSIM і наведені в Таблиці 3.

Таблиця 3: Зменшення THD для запропонованого методу і трансформаторної топології

Кількість рівнів	Базова структура	CSPWM	Трансформаторна фільтрація
3 рівні	THD= 0.52	THD= 0.41	THD= 0.3
7 рівнів	THD= 0.21	THD= 0.16	THD= 0.03
13 рівнів	THD= 0.1	THD= 0.08	THD= 0.02

Метод CSPWM порівнювався з іншими методами, такими як SPWM і THPWM.

Результати моделювання показали, що обидві модифікації (відсікання сигналу та трансформація) SPWM значно покращують якість напруги порівняно з напругою SPWM та THPWM. Моделювання запропонованого методу показало здатність усунути широкий спектр гармонік і зберегти амплітуду основної частоти на бажаному рівні. Конструкція з фіксуючими діодами дозволила інвертору усунути більшу частину високих гармонік, тоді як низькочастотна складова гармонік була усунена за допомогою трансформаторної топології. Крім того, робота показала задовільні результати, оскільки коефіцієнт нелінійних спотворень склав менше 3%, що нижче встановленого стандартом IEEE STD 519-1992 обмеження в 5%.

Найскладнішим завданням сучасної схемотехніки є створення системи, яка може працювати як з однофазною, так і з трифазною мережею без необхідності фільтрації. Схеми фільтрації мають обмеження, тому нові системи повинні зменшити вимоги до фільтрації. Запропоновані методи відповідають низьким вимогам до фільтрації, оскільки гармоніки усуваються потужними елементами, вбудованими в перетворювач. Таким чином, у роботі:

- запропоновані модифікації були змодельовані, а отримані експериментальні результати показали чудову продуктивність у порівнянні з базовим багаторівневим перетворювачем і продуктивністю інших методів PWM, таких як SPWM і THPWM.

- представлено корисний аналіз запропонованої топології, який підтримує можливу майбутню реалізацію.

- змодельовані та перевірено трансформаторну топологію для зменшення dV/dt , а отже, і гармонічних струмів.

Запропонований багаторівневий перетворювач є компромісом між складною фільтрацією в інверторах з модифікованою синусоїдою та обмеженням інвертованої потужності. На ринку силових інверторів є багато варіантів. Вони варіюються від дуже дорогих до дуже дешевих, з різним ступенем якості, ефективності та вихідної потужності. Висока якість у поєднанні з високою ефективністю існує, хоча це часто пов'язано з високими грошовими витратами. Високоякісні інвертори чистої синусоїди, як правило, містять дуже дорогі, потужні цифрові компоненти. Пристрої з модифікованою синусоїдою можуть бути ефективними для деяких нечутливих

навантажень, оскільки не відбувається значної обробки вихідного сигналу, але це призводить до формування сигналу з великою кількістю гармонік, що може впливати на чутливе обладнання, наприклад медичні монітори. Багато з дешевих пристроїв виводять прямокутну хвилю, можливо трохи модифіковану прямокутну хвилю, з відповідною середньоквадратичною напругою і близькою до потрібної частоти. Ці обмеження поширених інверторів напруги є мотивацією для створення багаторівневого перетворювача. Запропонований багаторівневий інвертор є дуже надійним і ефективним пристроєм, який може працювати з додатками високої потужності. Запропонована топологія дешевша за традиційні, оскільки вимоги до фільтрації стають дуже низькими або непотрібними.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Jim Doucet, Dan Eggleston & Jeremy Shaw, "DC/AC Pure Sine Wave" Term paper, Worchester Polytechnic Institute, Worchester, USA, 2007.
2. Madhav D. Manjrekar and Thomas A. Lipo, "A hybrid multilevel inverter topology for drive applications", IEEE APEC, Anaheim, California, pp. 523-529, Feb. 1998.
3. Rasoul Shalchi Alishah, Daryoosh Nazarpour, Seyyed Hossein Hosseini, Mehran Sabahi " Design of New Single-phase Multilevel Voltage Source Inverter " International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 5, Special Issue on Electric Power Converter, July 2014, pp. 45-55.
4. F. Z. Peng and J. S. Lai, "Multilevel cascade voltage-source inverter with separate DC sources," U.S. Patent 5 642 275, June 24, 1997.
5. Rashid, Muhammad H. Power Electronics Handbook. Chapter 17. Power Converters. Second Edition, Academic Press, 2007. pp. 451-482.
6. A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point clamped PWM inverter," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.17, no. 5, pp. 518–523, Sep. 1981.
7. P. M. Bhagwat and V. R. Stefanovic, "Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-19, No.6 Nov./Dec., 1983, pp.1057-1069.
8. T.A. Meynard and H. Foch, "Multi-level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-Source Inverters," Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialist Conference, pages 397-403, 1992.
9. F. Z. Peng, "A generalized multilevel converter topology with self-voltage balancing," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, pp. 611–618, Mar./Apr. 2001.
10. J. S. Lai, F. Z. Peng, "Multilevel Converters - A New Breed of Power Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 3, May 1996, pp. 509-517.
11. Sergio Daher, 'Analysis, Design and Implementation of a High Efficiency Multilevel Converter for Renewable Energy Systems', Ph. D thesis at Kassel University, 2006.

12. Renewable Energy Policy Network for the 21st century, "Renewables global status report-2009 update," available at <http://www.ren21.net/publications/>
13. Mohammed Q. Taha, Qusay H. Eesse and Salih Mohammed Salih, "Mathematical Modeling of different Photovoltaic Modules", Journal of telecommunications, Volume 11, Issue 2, pp. 59-64, December, (2011).
14. R. Flickenger and et al, "Wireless Networking in the Developing World", 2nd edition, available at: <http://www.wndw.net/book.html> , 2007, 978-0-9778093-6-3.
15. Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA.
16. Geoff Walker. "Evaluating MPPT Converter Topologies Using Matlab PV Model", Department of Computer Science and Electrical Engineering, University of Queensland, Visited 10th of April-2012, Internet Survey URL: [http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec00/walker00 .pdf](http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec00/walker00.pdf).
17. A. Cheknane, S. Bensmain, B. Benyoucef, J.-P. Charles, and R. Zerdoum." Series Resistance of SnO₂/SiO₂/Si(n) Solar Cells" Internet Survey, Visited on 25th of November (2011). URL: <http://www.icrepq.com/PONENCIAS/4.311.CHEKNANE.pdf>
18. A. D. Rajapakse and D. Muthumuni "Simulation Tools for Photovoltaic System Grid Integration Studies" Electrical Power & Energy Conference (EPEC), IEEE, October 22- 23, 2009.
19. Ting-Chung Yu, Yu-Cheng Lin, A Study on Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems, Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), April 2011 IEEE.
20. Zakis, Janis; Vinnikov, Dmitri, "Study of Simple MPPT Converter Topologies for Grid Integration of Photovoltaic Systems", Power & Electrical Engineering;2011, Issue 29, p67, February 2011
21. Saurav Satpathy, "Photovoltaic Power Control Using MPPT and Boost Converter", Bachelor Thesis at Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, May 2012.

22. R. Karthikeyan, Dr.S. Chentur Pandian, " An Efficient Multilevel Inverter System for Reducing THD with Space Vector Modulation", International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 23– No.2, June 2011.