

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

факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: «Розроблення Flyback мікроінвертора
сонячної системи резервного електроживлення потужністю 100 Вт»

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КА-41

спеціальності 151 «Автоматизація

та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва спеціальності)

Дячук
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник
(підпис) Трембач Р.Б.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль
(підпис) Козбур В.Р.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри
(підпис) Савків В.Б.
(прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) К
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2024р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Дячуку
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розроблення Flyback мікроінвертора сонячної системи резервного електроживлення потужністю 100 Вт»

Керівник роботи к.т.н., доцент Трембач Р.Б.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 28 » травня 2024 року № 4/7-552

2. Термін подання студентом завершеної роботи 10 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи Технічна характеристика сонячної системи резервного Електроживлення потужністю 100 Вт.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
1) аналітична частина; 2) проектна частина;
3) спеціальна частина; 4) Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Презентація кваліфікаційної роботи 12 аркушів формату А4

АНОТАЦІЯ

В аналітичній частині роботи було проведено огляд існуючих аналогів, таких як сонячна черепиця, різні типи мікроінверторів та мікроінвертори без датчиків струму. Це дозволило виділити основні переваги та недоліки існуючих рішень та визначити шляхи покращення розроблюваної системи. Аналіз літературних джерел показав, що використання Flyback топології є перспективним напрямком для розробки компактних та ефективних мікроінверторів.

У проектній частині роботи детально розглянуто характеристики мікроінвертора Flyback типу, його схему та принципи роботи. Було проведено детальний аналіз етапів обробки електроенергії в одноступінчастих та багатоступінчастих мікроінверторах. Описано різні топології багатоступеневих мікроінверторів, включаючи напівмостовий boost мікроінвертор, мікроінвертор Push-Pull та Flyback мікроінвертор. Це дозволило обґрунтовано вибрати оптимальну топологію для розробки.

У спеціальній частині роботи здійснено моделювання системи за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Проведено симуляцію роботи мікроінвертора, що дозволило оптимізувати параметри компонентів та перевірити ефективність розробленої системи. Отримані результати моделювання узгоджуються з теоретичними розрахунками, що підтверджує правильність обраного підходу.

Розділ з безпеки життєдіяльності та основ охорони праці містить аналіз безпеки експлуатації розробленої системи та рекомендації щодо забезпечення безпечних умов роботи з електричними пристроями. Це є важливим аспектом для практичного впровадження розробленої технології.

У кваліфікаційній роботі досліджується робота фотоелектричного мікроінвертора типу flyback без використання вимірювання струму і розглядаються відповідні методи оцінювання струму. Було протестовано і порівняно чотири методи оцінки струму. Два з них вже присутні в

літературі; вони засновані на інтегруванні форми пилкоподібного струму первинної сторони флайбек-трансформатора протягом циклу половинної сітки. Інші два є новими методами, що використовують пульсації напруги на конденсаторі, присутньому на вході постійного струму (DC) мікроінвертора, для розрахунку вхідного струму. Один з нових методів також включає оцінку індуктивності намагнічування зворотного трансформатора в контурі керування, що забезпечує адаптацію до змінної індуктивності.

Кожна методика оцінювання струму виведена математично, змодельована та реалізована експериментально. Для проведення практичних випробувань на експериментальній установці спроектовано та побудовано сонячний мікроінвертор. Проведено порівняння поточних методів оцінки шляхом вивчення їх впливу на продуктивність МРРТ.

Ключові слова: МІКРОІНВЕРТОР, FLYBACK, СТРУМ, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, ТРАНСФОРМАТОР, КОТУШКА ІНДУКТИВНОСТІЮ

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	7
1.1 Огляд існуючих аналогів	7
1.1.1 Сонячна черепиця	7
1.1.2 Сонячний мікроінвертор	8
1.1.3 Мікроінвертор без датчика струма	8
1.2 Постановка задачі	10
2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА	12
2.1 Характеристики мікроінвертора Flyback типу	12
2.2 Схема побудови мікроінвертора та порядок роботи	18
2.3 З'єднання модулів наявних мікроінверторів	22
2.3.1 Центральні інвертори	23
2.3.2 Каскадні DC/DC перетворювачі з центральним інвертором	25
2.3.3 Струнний інвертор	25
2.3.4 Мікроінвертор	26
2.4 Етапи обробки електроенергії	27
2.4.1 Одноступінчастий мікроінвертор	28
2.4.2 Багатоступінчастий мікроінвертор	28
2.5 Топології багатоступеневих мікроінверторів	29
2.5.1 Напівмостовий boost мікроінвертор	29
2.5.2 Мікроінвертор Push-Pull	31
2.5.3 Мікроінвертор Flyback	33
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	35
3.1 Моделювання системи	35
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	41
4.1. Організація безпеки праці на підприємстві	43
4.2 Процедури безпеки при обслуговуванні електроустановок	44
4.3 Вимоги пожежної безпеки до електросилових установок	45

4.4 Вплив електричного струму на організм людини	47
ВИСНОВКИ	50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	51

ВСТУП

Сьогодні, в еру стрімкого розвитку альтернативних джерел енергії, сонячні панелі займають провідні позиції серед технологій відновлюваної енергії. Вони є ефективним та екологічно чистим джерелом електроенергії, яке здатне задовольнити потреби сучасного суспільства. Проте для максимальної використовуваності сонячної енергії важливо мати надійні та ефективні системи керування мікроінверторами, які конвертують постійний струм, що надходить від сонячних панелей, у змінний струм для подальшого використання у мережі.

Ця дипломна робота присвячена розробці автоматизованої системи керування мікроінвертора типу flyback для сонячних панелей. Мікроінвертори є ключовим елементом сонячних систем, які дозволяють оптимізувати роботу кожної окремої сонячної панелі, забезпечуючи максимальний вихід електроенергії та забезпечуючи стабільну роботу у різних умовах.

У цьому вступі ми розглянемо актуальність проблеми, мету та завдання дослідження, а також коротко ознайомимося з методами, які будуть використані в процесі дослідження та розробки flyback мікроінвертора.

Першочерговою проблемою, яка вирішується в рамках цього дослідження, є необхідність підвищення ефективності та надійності сонячних систем за допомогою розробки нових технологій керування мікроінверторами. З метою досягнення цієї мети, у даній роботі буде проведено аналіз існуючих методів та технологій, визначено їх переваги та недоліки, а також запропоновано власний підхід до розв'язання проблеми.

Головною метою цієї дипломної роботи є розробка мікроінвертора типу flyback для сонячних панелей, яка буде відповідати вимогам ефективності, надійності та економічної доцільності. Для досягнення цієї мети будуть поставлені такі завдання:

1. Провести огляд наявних технологій мікроінверторів та методів керування ними.

2. Розробити концепцію та алгоритм роботи автоматизованої системи керування мікроінвертора.
3. Реалізувати розроблену систему на практиці та провести експериментальні дослідження її ефективності та надійності.

В рамках цього дослідження будуть використані такі методи дослідження, як теоретичний аналіз літературних джерел, моделювання та симуляція роботи системи на комп'ютері, а також експериментальні дослідження на базі реальних сонячних панелей та мікроінверторів.

В цілому, дана кваліфікаційна робота спрямована на розв'язання актуальної проблеми підвищення ефективності сонячних систем за допомогою розробки мікроінверторів. Результати цього дослідження можуть бути використані в промисловості для покращення якості та ефективності сонячних електростанцій.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Огляд існуючих аналогів

Вже зроблено значні кроки в дослідженні та розробці різних методів оцінки струму для бездатчикових мікроінверторів зі зворотним зв'язком. [21, 22, 25] Більшість з цих методів покладаються на інтеграцію струму індуктора для знаходження фотоелектричного струму. Через пульсації струму, що виникають на конденсаторі ланки постійного струму інвертора, струм індуктивності не є єдиним внеском у фотоелектричний струм. Весь струм в кінцевому підсумку проходить через індуктор, але відсутність струму конденсатора призводить до запізнювання в системі керування. Таким чином, точне представлення миттєвого фотоелектричного струму не може бути досягнуто за допомогою цієї технології. Деякі роботи виправляють цю невідповідність шляхом включення зміни напруги на конденсаторі в рівняння оцінки. Інші цікаві методи також були досліджені для покращення мікроінвертора зі зворотним зв'язком. Вони включають в себе додавання розвязки активної потужності, чергування зворотного перетворювача і методи м'якого перемикавання.

1.1.1 Сонячна черепиця

У порівнянні з іншими відновлюваними джерелами енергії, перевага сонячної енергії полягає в тому, що вона є масштабованою і доступною в усьому світі. Бізнес-кейси варіюються від великомасштабних сонячних електростанцій до установок з однієї панелі. Однак, висока початкова вартість сонячних установок перешкоджає їх широкому впровадженню. BIPV - це нещодавно запроваджений метод зниження початкових витрат на фотоелектричну установку. У BIPV традиційні будівельні

матеріали замінюються або інтегруються з фотоелектричними матеріалами. Поєднання установки фотоелектричної системи зі звичайним будівельним проектом призводить до зниження витрат. Сонячна черепиця є прикладом BIPV, де черепицю будинку або будівлі замінюють на сонячні модулі. Дах будинку - чудове місце для встановлення фотоелектричної установки, оскільки на нього потрапляє дуже мало тіні. Крім того, черепиця з'єднана між собою, що спрощує електропроводку.

1.1.2 Сонячний мікроінвертор

Фотоелементи виробляють електроенергію постійного струму, тоді як мережа використовує енергію змінного струму (АС). Таким чином, для перетворення постійного струму в змінний перед подачею енергії в мережу необхідно використовувати схему перетворювача. Для сонячних установок існує чотири поширених способи підключення до електромережі: Центральні інвертори, стрінгові інвертори, мікроінвертори та DC-оптимізатори. Кожне з цих рішень має свої переваги та обмеження. Найважливішим є компроміс між ефективністю, ціною та простотою використання. Топологія, що досліджується в цій дипломній роботі, - це мікроінвертор. Зокрема, використовується мікроінвертор зі зворотним зв'язком. На рисунку 1.1 показано топологію мікроінвертора зі зворотним зв'язком.

1.1.3 Мікроінвертор без датчика струма

Однією з проблем сонячної енергії є те, що вона не завжди відповідає попиту на електроенергію. Наприклад, у зимові кількість сонячних годин протягом дня обмежена. Попит на електроенергію є найвищим вранці та ввечері, коли багато людей перебувають вдома. Зображення форм типових кривих попиту на електроенергію та сонячної генерації можна побачити на рисунку 1.2.

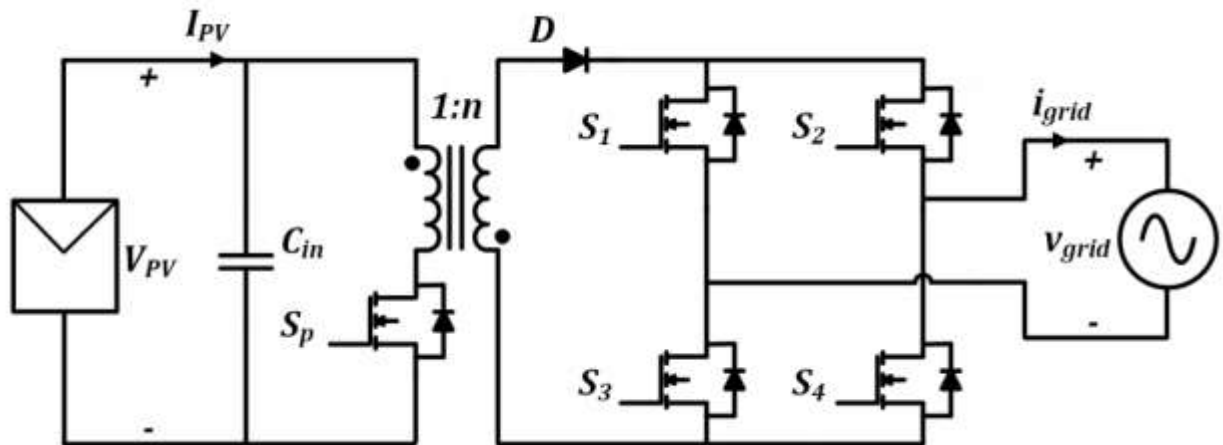


Рисунок 1.1 - Мікроінвертор зі зворотнім зв'язком

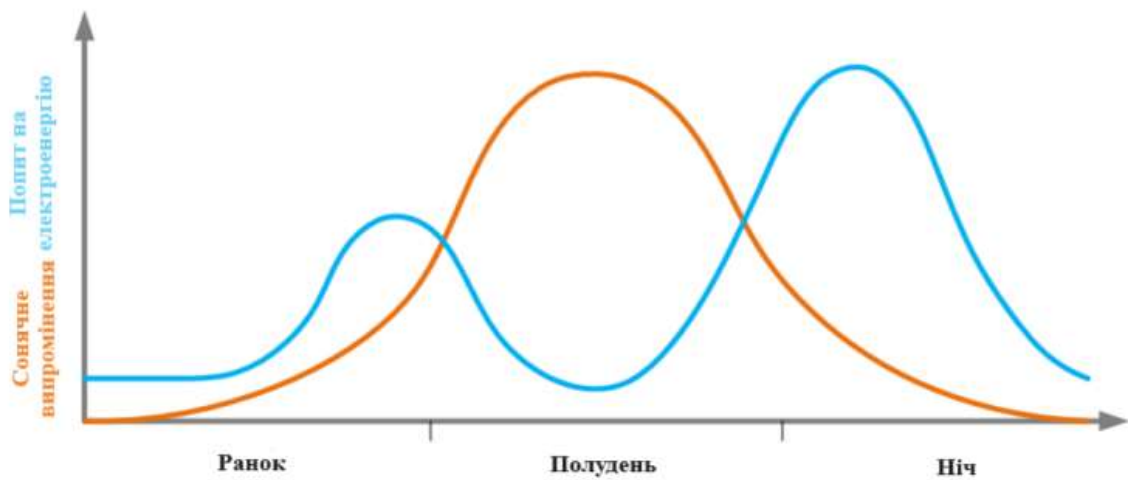


Рисунок 1.2 - Щоденне сонячне опромінення та попит на електроенергію

Поточні пропозиції щодо пом'якшення невідповідності між попитом та пропозицією зазвичай включають тимчасове зберігання енергії та/або переривчасту генерацію з викопних джерел. Однак вартість зберігання є високою, а викопне паливо спричиняє викиди парникових газів. Таким чином, дуже важливо максимізувати сонячну генерацію на низькій потужності, щоб мінімізувати залежність від цих методів компенсації.

Оптимізація сонячних модулів зазвичай вимагає вимірювання струму для формування MPPT. Вимірювання струму в силових електронних схемах здійснюється або за допомогою датчика на основі ефекту Холла, або за допомогою низькоомного вбудованого резистора. Обидва методи створюють напругу, пропорційну струму. При дуже низькій потужності ці методи вимірювання стають неточними і створюють велику кількість шуму в системі. Вимірюваний струм буде низьким, в сотні міліампер, чим менший струм, тим вище буде відношення сигнал/шум. бути. Однак саме в ці періоди малої потужності потреба в точності є найбільш нагальною. Оскільки параметри ланцюга відомі, можна оцінити струм, використовуючи лише напругу, індуктивність та час перемикання. Така оцінка створює набагато менше шуму і може сприяти підвищенню ефективності при низькій потужності. Однак реальні застосування представляють певні труднощі, оскільки фактори навколишнього середовища та незначні фізичні відхилення можуть мати значний вплив на індуктивність. Таким чином, система управління повинна бути розроблена датчик, який може оцінювати струм, адаптуючись до змін індуктивності.

1.2 Постановка задачі

Мета цієї роботи полягають у наступному:

1. Запропонувати нову методику оцінювання потоку та довести стійкість використовуваної системи керування.
2. Розробити та сконструювати мікроінвертор, який приймає постійний струм від фотоелектричного модуля та видає змінний струм, синхронізований з мережею.
3. Створіть прошивку, необхідну для керування схемою мікроінвертора з зворотним зв'язком.
4. Реалізувати бездатчиковий MPPT на мікроінверторі з зворотним

зв'язком, щоб довести життєздатність контуру керування.

5. Порівняйте ефективність МРРТ запропонованого методу оцінки з іншими методами, представленими в літературі.

2. ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1 Характеристики мікроінвертора Flyback типу

Мікроінвертор зі зворотним зв'язком являє собою багатоступеневе, гальванічно ізольоване рішення для збору енергії від сонячних батарей. Багато схем мікроінверторів використовують багатоступеневу топологію зі зворотним зв'язком. Після аналізу було виявлено, що зворотний перетворювач є найкращою топологією для застосувань з низькою потужністю. Мікроінвертор зі зворотним зв'язком складається з двох основних схем: Перетворювача зі зворотним зв'язком і повномостового інвертора. Перетворювач зі зворотним зв'язком відіграє три ролі (1) підвищує напругу (2) формує форму вихідного струму до випрямленої синусоїди, і (3) виконання MPPT. Повномостовий інвертор потрібен для розгортання випрямленої синусоїди на виході, що є неможливим завданням для одиночного флайбек-перемикача.

Спочатку зворотний перетворювач був винайдений для керування електронним променем у електронно-променевій трубці (ЕПТ). ЕПТ найбільш відомі завдяки використанню в старих телевізорах. На виході схеми виходить високочастотний пилоподібний струм високої напруги. Зазвичай, флайбек-перетворювачі використовуються в діапазоні від низької до середньої потужності ($<100 \text{ Вт}$). На рисунку 2.1 показано базовий зворотний перетворювач. Базовий флайбек-перетворювач простий і складається лише з чотирьох компонентів:

(1) котушка індуктивності з магнітним зв'язком, яка називається зворотним трансформатором, (2) комутаційний елемент, (3) конденсатор і (4) діод. Найбільш помітним компонентом є зворотний трансформатор через його багатоцільову природу. Шунтуючий трансформатор забезпечує накопичення енергії, передачу енергії та гальванічну розв'язку. Поєднання декількох функцій в одному компоненті знижує вартість порівняно з іншими топологіями, особливо тими, що вимагають

декількох котушок індуктивності.

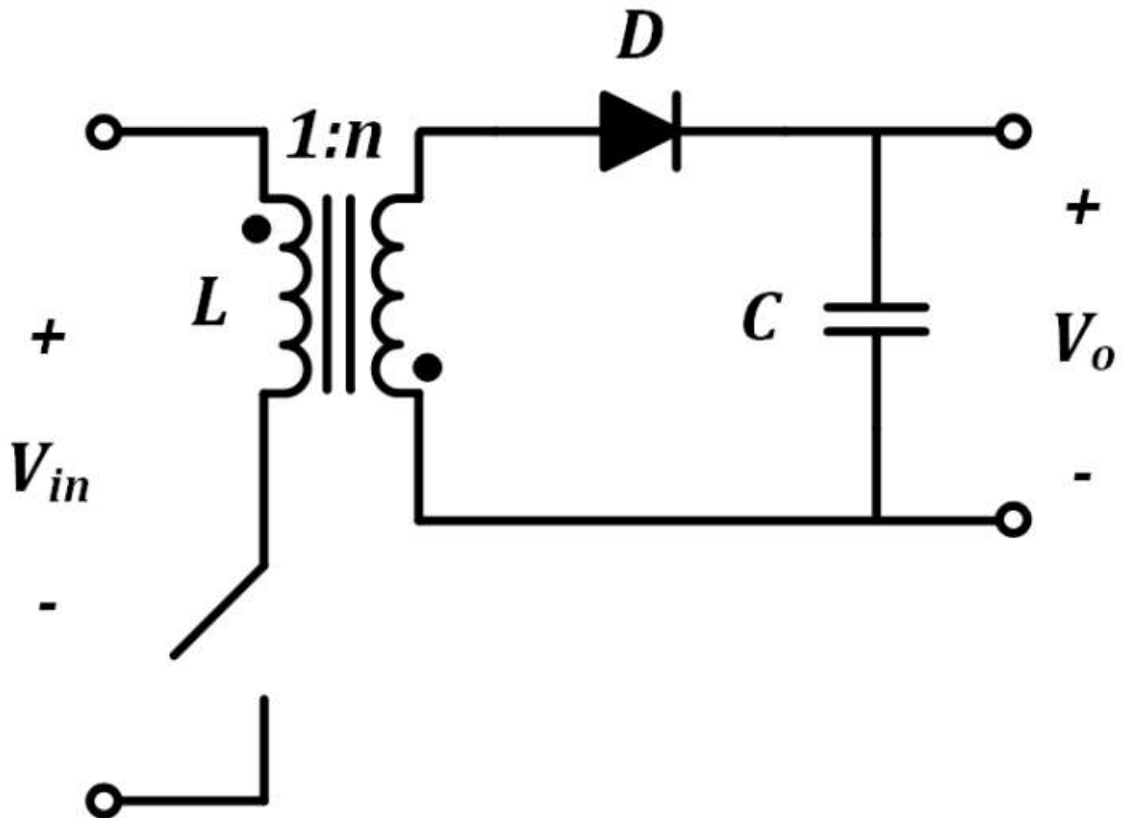


Рисунок 2.1 - Базовий перетворювач зворотнього зв'язку

Хоча зазвичай його називають трансформатором, насправді він є зв'язаною котушкою індуктивності. Різниця полягає в тому, що зв'язані котушки індуктивності зберігають енергію в повітряному проміжку, тоді як трансформатори цього не роблять. Повітряний проміжок зменшує ефективну проникність котушки індуктивності, дозволяючи їй зберігати набагато більше енергії до настання насичення. Таким чином, існує суттєва різниця між трансформаторами і зв'язаними котушками індуктивності. Однак, на превеликий жаль пуристів зворотно-поступальних перетворювачів, найчастіше використовується трансформатор.

Робота флайбек-перетворювача надзвичайно проста, залежно від режиму роботи він має лише два-три різних стани.

Перший стан роботи характеризується тим, що вимикач увімкнений. Під час цього стану замкнутий вимикач викликає наростання струму

на первинній стороні трансформатора. Під час цього стану струм не передається на вторинну обмотку, оскільки полярність діода відносно напрямку обмоток. На діод зі зворотним зміщенням подається велика напруга. Ця напруга дорівнює сумі вихідної напруги і відбитої вхідної напруги. Замість того, щоб передаватися на вторинну обмотку, енергія зберігається в трансформаторі. Точніше кажучи, енергія зберігається в повітряному проміжку.

Другий стан досягається, коли вимикач вимкнено, і триває до повного розмагнічування трансформатора або до повторного увімкнення вимикача. На цьому етапі накопичена в котушці індуктивності енергія виробляє напругу, яка зміщує діод на вторинній стороні. Діод вмикається, і енергія, накопичена в трансформаторі, розсіюється у вигляді струму на вторинній стороні. Перемикач на вхідній стороні є відкритим контуром, і напруга на ньому дорівнює сумі вхідної напруги та відбитої від входу вихідної напруги.

Існує також можливий третій стан роботи. Під час цього стану трансформатор повністю розмагнічений, але вимикач ще не був знову увімкнений. Час між розмагнічуванням і початком наступного циклу перемикач називається мертвим або резонансним часом. У цьому стані ні діод, ні перемикач не проводять струм. Цей час називається резонансним, оскільки первинна індуктивність і паразитна ємність перемикача резонують і викликають дзвін. Існує також високочастотний дзвін, який виникає відразу після вимкнення вимикача. Це викликано індуктивністю витoku, що резонує з паразитною ємністю вимикача. На рисунку 2.2 показано як високочастотний, так і низькочастотний дзвін.

Високочастотний дзвін викликає найвищу пікову напругу на перемикачі зворотного ходу. Надмірна напруга на цьому перемикачі може призвести до лавинного пробоя і з часом пошкодити MOSFET. Таким чином, цей дзвін необхідно враховувати при визначенні

номінальної напруги перемикача. Крім того, дзвін з'являтиметься по всій схемі, спричиняючи можливі логічні помилки та неточності вимірювань. Для пом'якшення цих ефектів можна використовувати резисторно-конденсаторний діод (RCD) (або RCD затискач). У ПЗВ використовується діод, який обмежує напругу на вимикачі до прийнятного рівня. Струм від індуктивності витоку буде поглинатися ПЗВ, коли напруга на виході перевищить значення напруги конденсатора, що розвантажує. Конденсатор RCD підвищує надійність вимикача і може зменшити максимальну напругу, необхідну для вимикача на етапі проектування. Додаткові RC-обмежувачі також можна використовувати над MOSFET і діодом, щоб індивідуально захистити їх від дзвінкового спрацювання.

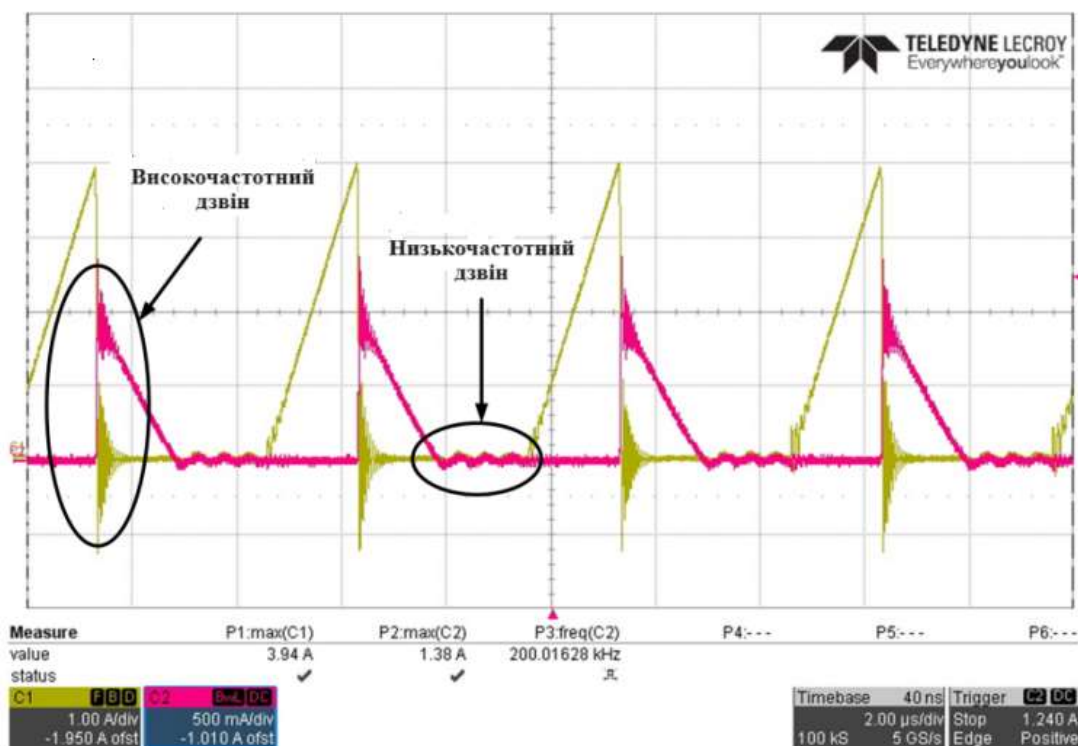


Рисунок 2.2 - Дзвін у зворотному перетворювачі

Існує три режими роботи зворотного конвертера (рис.2.3): (1) CCM, який також називають трапецієподібним, (2) DCM, який також називають трикутним, і (3) BCM.

Робота ССМ відбувається, коли зворотному трансформатору не дозволяється повністю розмагнічуватися між кожним циклом перемикання. Таким чином, резонансний стан ніколи не досягається. Особливу увагу слід приділяти підтримці вольт-секундного балансу, оскільки невеликі зміни робочого циклу можуть спричинити швидку зміну струму. Робота DCM є протилежною, зворотний трансформатор повинен повністю розмагнічуватися під час кожного циклу. Піковий струм індуктора або робочий цикл може бути модульований для подачі на вихід.

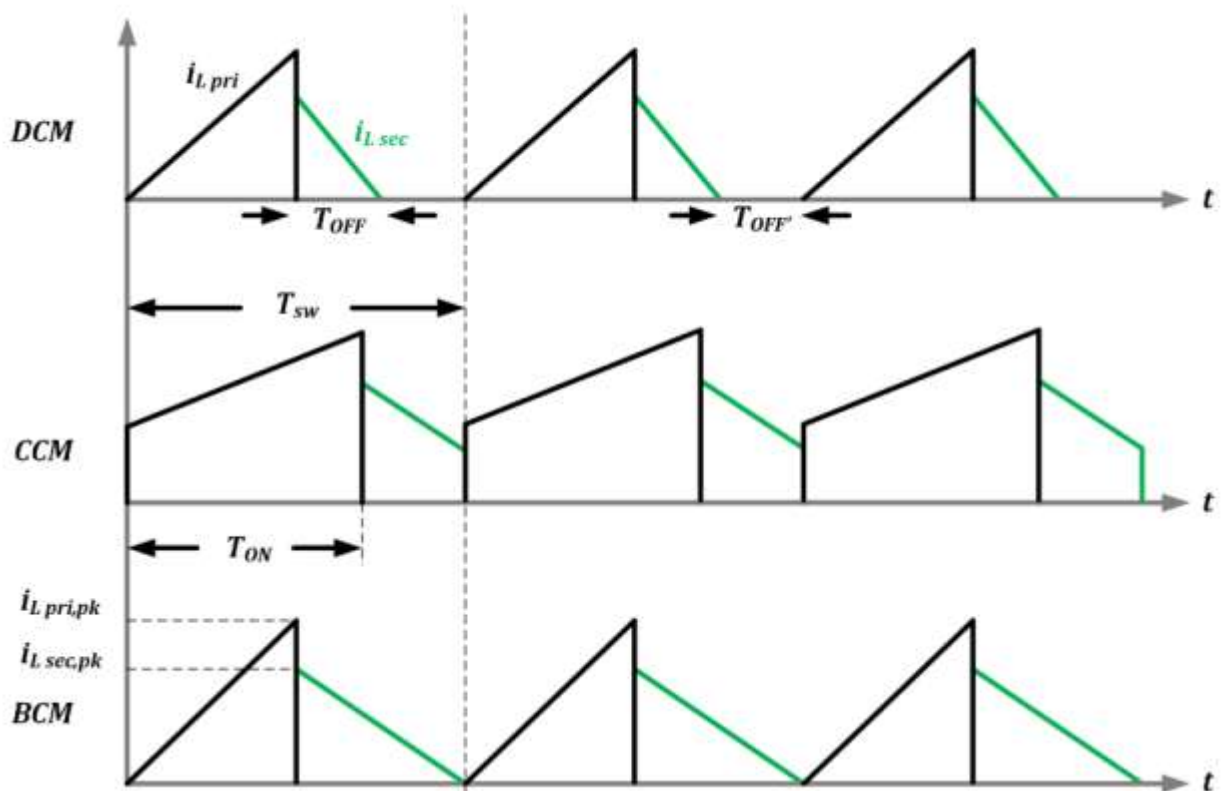


Рисунок 2.3 - Характерні форми сигналів DCM, CCM і BCM

Робота BCM відбувається на стику між роботою CCM і DCM. Як тільки зворотний трансформатор повністю розмагнічується, вимикач знову вмикається. Робота BCM може розглядатися як підмножина роботи DCM. Однак він вимагає більш складного управління, оскільки частота і робочий цикл повинні активно контролюватися. Хоча флайбек-

перетворювачі зазвичай призначені для роботи в режимі DCM або CCM, якщо використовуються як CCM, так і DCM, кажуть, що перетворювач працює в подвійному або гібридному режимі. Як показано в, подвійний режим може бути використаний і має певні переваги над використанням або CCM, або DCM.

В проаналізовано роботу режимів DCM та BCM і зроблено висновок, що режим DCM є найкращим для застосувань з низькою потужністю, тоді як режим BCM слід використовувати для застосувань з більшою потужністю. BCM вимагає дуже чутливого вимірювання струму, що збільшує вартість. Однак, робота в режимі BCM може призвести до зменшення розміру трансформатора, оскільки це покращує його використання. BCM також використовує м'яке перемикання, що підвищує ефективність. DCM і BCM усувають втрати на зворотне відновлення у вихідному діоді, коли струм через нього падає до нуля. Крім того, шунтувальні трансформатори, розроблені для DCM і BCM, мають меншу первинну індуктивність порівняно з шунтувальними трансформаторами, розробленими для CCM. Це призводить до зменшення розміру трансформатора та зниження його вартості. У DCM передавальна функція зворотного трансформатора не має нуля у правій площині (RHP), що робить його роботу більш стабільною, ніж у CCM. До недоліків роботи DCM відносяться великі втрати на комутацію і великі пульсації струму на виході, що вимагають великого фільтра ЕМІ.

Під час проектування трансформатора необхідно вибрати частоту перемикання або діапазон частот. Існує компроміс між втратами провідності на низьких частотах і втратами при перемиканні на високих частотах. На високій частоті можна використовувати трансформатор меншої потужності. При більш високій частоті перемикання середньоквадратичне значення струму зменшується, але кількість випадків перемикання, а отже, і втрати на перемикання, збільшуються. У використовується топологія з двома зворотними

трансформаторами, що зменшує пульсації вторинного струму та середньоквадратичне значення струму. Це також покращує номінальну потужність самого трансформатора.

Для зменшення втрат на перемикання можна використовувати долину комутацію. Дзвін, спричинений первинною індуктивністю та паразитною ємністю вимикача, призводить до зниження напруги на вимикачі. Втрати на перемикання можна мінімізувати, вимірюючи цю напругу і перемикаючись, коли вона мінімальна. Квазірезонансна комутація - це особливий тип долиної комутації, при якому вимикач завжди вмикається під час першого мінімуму. Перемикання під час першої долини є оптимальним, оскільки перше кільце є найглибшим. Можна досягти майже ZVS, ефективно усуваючи втрати на перемикання. Однак це передбачає більш складну систему керування, що вимагає поєднання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та імпульсної частотної модуляції (ІЧМ).

Перевагами роботи ССМ є нижчий THD і нижчий середньоквадратичний струм. Таким чином, для побудови вихідного фільтра можна використовувати менші компоненти. Однак наявність нуля RHP в ССМ може спричинити нестабільність і вимагає точного контролю. Крім того, індуктивність зворотного трансформатора повинна бути більшою, що збільшує вартість.

2.2 Схема побудови мікроінвертора та порядок роботи

Зворотний перетворювач широко використовується в силовій електроніці, такий як комутаційне джерело живлення, відновлювані джерела енергії, літакове (повітряне) джерело живлення та побутове електронне обладнання, де вихідна напруга навантаження повинна бути ізольована від джерела вхідної напруги. Він використовується в діапазоні малої потужності, тому що вимагає менше компонентів. Поворотний перетворювач потребує високої частоти для роботи,

що збільшує втрати комутатора та електромагнітні перешкоди (ЕМІ). Крім того, стрес напруги та струму MOSFET (перемикач) відчувається через витік індуктивності трансформатора. У результаті збільшується пікова напруга та струм, що спричиняє низьку ефективність. Крім того, зворотний перетворювач з одним трансформатором має високу індуктивність витоку та потік. Це зумовлює малу ефективність передачі енергії. З цієї причини він не використовується для систем високої напруги та високої потужності та обмежений додатками з низькою потужністю. Таким чином, мета цієї статті полягає в тому, щоб розробити систему перетворювача шляхом вдосконалення топології зворотного перетворювача при високій потужності за допомогою чергування зворотного перетворювача. Зворотний перетворювач із чергуванням використовується для зменшення вихідної пульсаційної напруги, вихідного пульсаційного струму, втрат на перемикачах і розміру вихідного конденсатора. Зворотний перетворювач постійного струму з чергуванням використовується в джерелі живлення з імпульсним режимом (SMPS) із замкнутим контуром системи для надання регульованої вихідної напруги. Перетворювач із замкнутою системою краще чутливий до умов навколишнього середовища, таких як вихідна напруга. Ще одна найважливіша перевага полягає в тому, що якщо є будь-які зміни в специфікаціях, нам не потрібно змінювати компонент, наприклад аналоговий контролер, замість цього нам потрібно змінити програму, щоб гнучкість була більшою, ніж аналоговий контролер. Він також дуже компактний і займає менше площі, і в основному це не дуже дорого. Flyback-перетворювач із чергуванням складається з двох Flyback-конвертерів, які з'єднані паралельно та мають одне джерело. У цьому документі запропоновано новий цифровий PI-контролер, який використовується з контролером Flyback з чергуванням, який використовує мікроконтролер Arduino Uno. Він керується PI-контролером і реалізується мікроконтролером Arduino Uno, щоб забезпечити постійну вихідну напругу за змін вхідної напруги та перешкод навантаження. ПІ-регулятор використовується для усунення похибок усталеного режиму та зменшення перерегулювання ступінчастої

характеристики. Він забезпечує стабільність системи, надсилаючи сигнал на ПІ-контролер для зміни робочого циклу для отримання постійної вихідної напруги при змінній вхідній напрузі або навантаженні. Ядро контролера - ATmega328 16MHz. Його можна живити від USB комп'ютера. Драйвер IR2110 використовується для отримання перемикача MOSFET. Техніка керування досягається шляхом використання ШІМ через VMC для покращення реакції системи керування. У цьому документі запропоновано дизайн цифрового контролера для перетворювача Flyback з чергуванням. Цифровий контролер має кращу гнучкість і швидку реакцію на зміну вхідної напруги та навантаження.

На рисунку 2.4 показана схема основного зворотно-ходового перетворювача з чергуванням. Він складається з двох Flyback конвертерів, які мають однаковий компонент. Два ідентичних конвертера Flyback з'єднані паралельно та мають одне джерело для роботи в стилі Flyback із чергуванням. Два Flyback конвертери склалися з одного перемикача (MOSFET), одного діода, одного конденсатора та одного трансформатора. Стробуючий сигнал двох перемикачів має однакову величину та відображається один відносно одного приблизно на 180 градусів. Представлений перетворювач працює в двох режимах. Коли MOSFET 1 перебуває у стані ON, а MOSFET 2 у стані OFF, первинний струм трансформатора (TF1) лінійно збільшується, а енергія зберігається в трансформаторі 1. Діод 1 знаходиться у зворотному зміщенні, і струм не буде проходити через навантаження. Але навантаження, що подається від перетворювача два під час MOSFET 2, у свою чергу, вимкнено (з попереднього стану). Коли MOSFET 2 увімкнено, а MOSFET 1 вимкнено, первинний струм (TF2) лінійно збільшується, і енергія зберігається в первинній обмотці трансформатора 2. Діод 2 має зворотне зміщення, і струм не проходить через навантаження від перетворювача 2. Навантаження, що живиться від перетворювача один за рахунок діода 1, є прямим зміщенням (від режиму один). На рисунку 2.5 показаний принцип роботи перетворювача Flyback з чергуванням.

Для отримання сигналу широтно-імпульсної модуляції використовується

контролер Arduino. У цій системі контролера вихідна напруга з перетворювача порівнюється з еталонною напругою, а значення різниці надсилається до мікроконтролера для створення робочого циклу. На рисунку 2.6 показано блок-схему для конвертера з контролером. Робочий цикл збільшується або зменшується залежно від зміни навантаження або вхідна напруга.

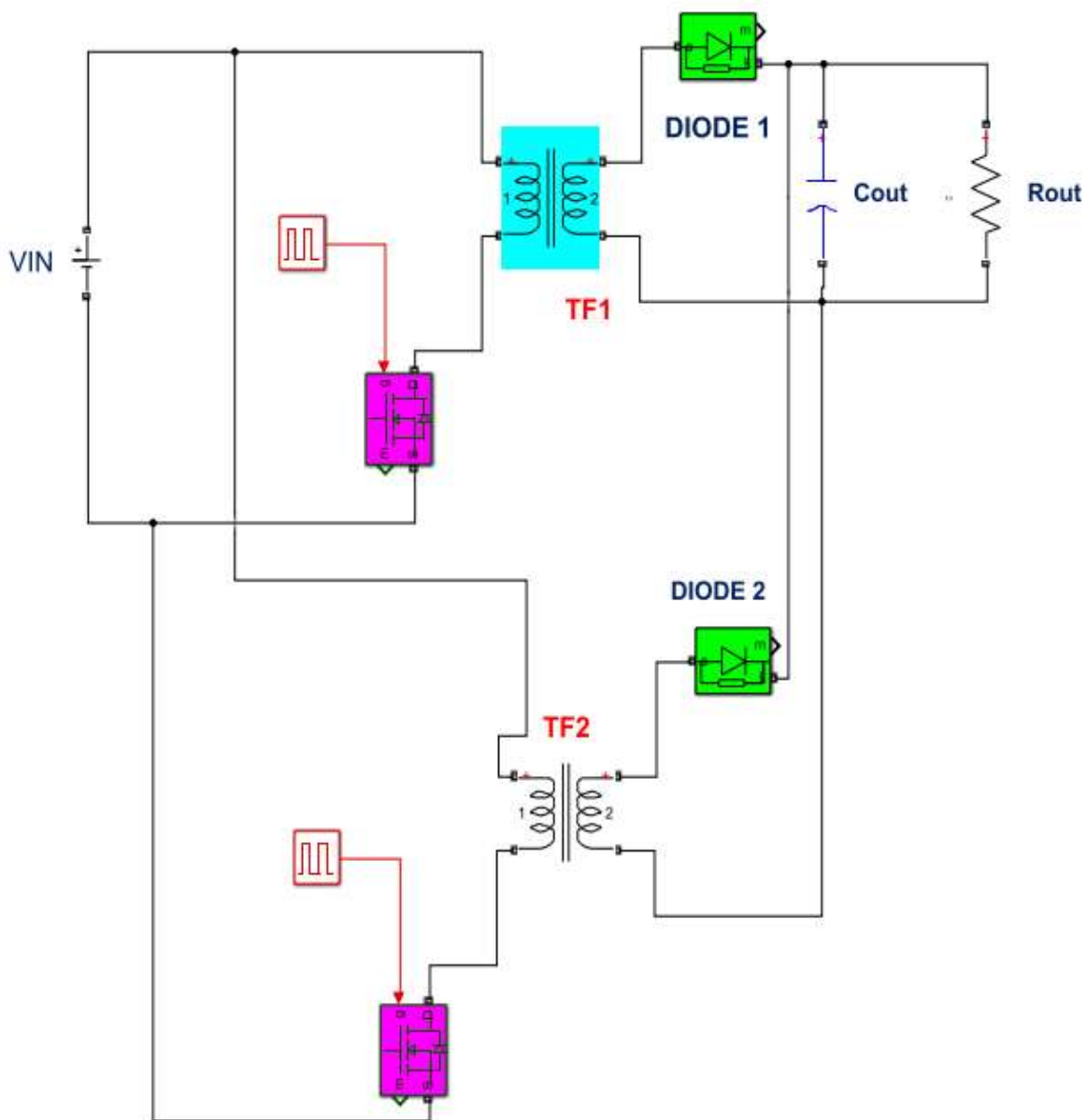


Рисунок 2.4 - Схема Flyback мікроінвертора

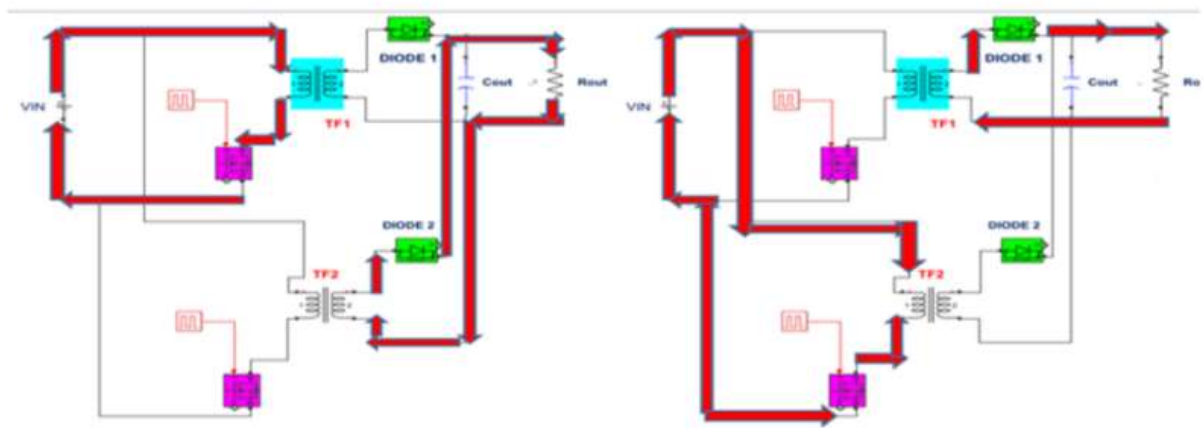


Рисунок 2.5 - Принцип роботи перетворювача Flyback з чергуванням.

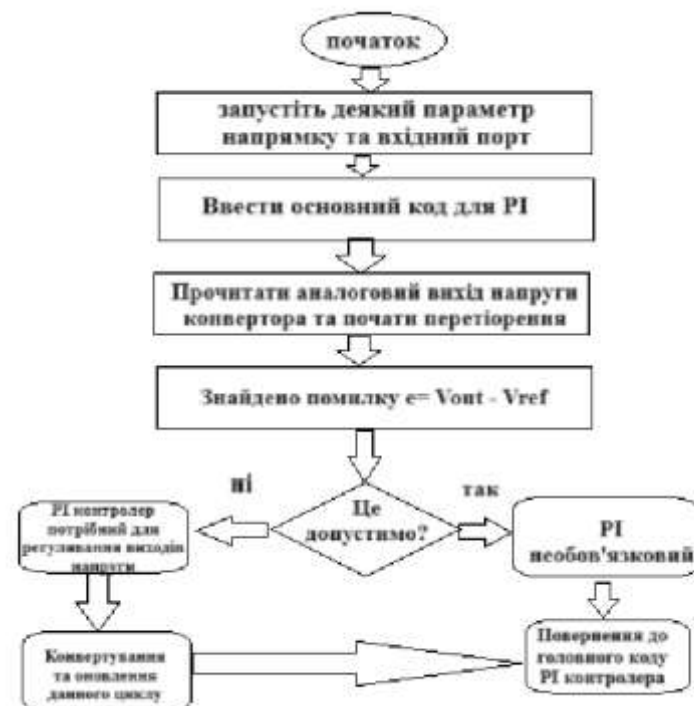


Рисунок 2.6 - Блок-схема запропонованого перетворювача

2.3 З'єднання модулів наявних мікроінверторів

Через природні відмінності між фотоелементами, а також умови затінення, не існує напруги, яка б оптимізувала всі модулі. Таким чином, більша індивідуалізація в оптимізації фотоелектричних модулів завжди призведе до збільшення ефективності MPPT. Дослідження 2013 року, проведене компанією Solar Edge, показало, що в різних умовах затінення їхній оптимізатор постійного струму - центральна інверторна система відшкодувала 24,8% енергії, втраченої через затінення,

мікроінвертори Enphase - 23,2%, а стрінгова інверторна система SMA - 0%. Розробка різних схем підключення, обладнання для моніторингу та методів MPPT в інтересах зменшення ефекту часткового затінення є предметом багатьох досліджень. Завдяки сучасним технологіям, окремі сонячні модулі можна контролювати через їхні перетворювачі. Якщо модуль працює з низькою ефективністю, власник/оператор може бути повідомлений про необхідність ремонту/заміни. Однак, додаткові перетворювачі призводять до збільшення ціни. Крім того, у великомасштабних електричних системах необхідно враховувати складність проводки та схем з'єднання. Існує чотири найпоширеніші топології: Центральні інвертори, каскадні DC/DC перетворювачі з центральним інвертором, стрінгові інвертори та мікроінвертори.

2.3.1 Центральні інвертори

Центральний інвертор - найпростіша з топологій. Як показано на рис. 2.7 а), всі окремі модулі з'єднуються разом у ланцюжки, достатньо великі для досягнення потрібної вхідної напруги на центральному інверторі, а потім з'єднуються паралельно між собою. Діоди використовуються для запобігання проблемам невідповідності напруги та струму між модулями та ланцюжками. Центральний інвертор виконує інвертування DC/AC для підключення до електромережі, а також MPPT на рівні масиву. Перевагою цієї топології є простота і низька вартість. Для всієї топології необхідний лише один перетворювач. Однак, це є компромісом з ефективністю. Як зазначалося раніше, якщо модулі з'єднані між собою напряму, це призводить до значного зниження ефективності через затінення та неузгодженість.

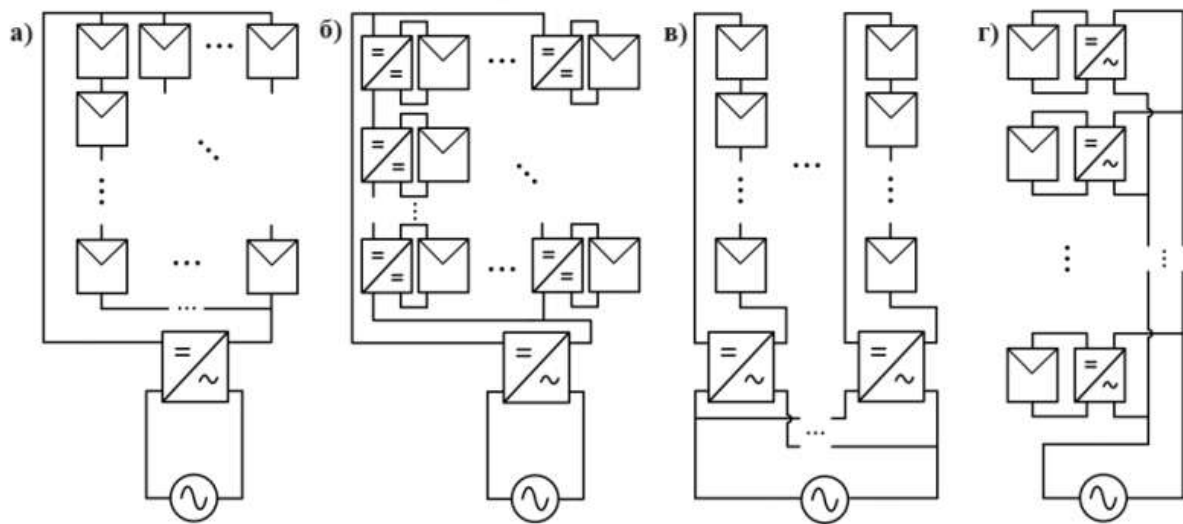


Рисунок 2.7 - Топології підключення фотоелектричних модулів : а - центральний інвертор; б - каскадний DC інвертор; в- послідовний інвертор; г - мікроінвертор.

Крім того, з точки зору надійності, є очевидний недолік: вся електроенергія проходить через одну точку - центральний інвертор. У разі виходу з ладу центрального інвертора, весь масив втрачає живлення до тих пір, поки перетворювач не буде відремонтовано. Інші проблеми, як зазначено в, включають наявність високовольтних кабелів постійного струму, значні втрати на діодах і негнучку конструкцію. Важливо, що питання негнучкої конструкції було розкрито. Вхід центрального інвертора - це шина постійного струму. Напруга на шині диктується інвертором. Тому ланцюжки модулів повинні бути налаштовані так, щоб вони працювали в діапазоні вхідної напруги інвертора якомога частіше. Занадто низька потужність може призвести до того, що ці ланцюжки не зможуть забезпечити необхідну напругу на шині, що вимагатиме відключення блокувальних діодів і призведе до нульової генерації енергії на всій ланцюжку. Крім того, підключення цих ланцюгів може виявитися складним, оскільки послідовне з'єднання

певної кількості модулів може не підійти для різних форм/розмірів даху, що створює проблеми при монтажі. У минулому найпоширенішою схемою був центральний інвертор. Однак вартість перетворювачів електроенергії знизилася, а їх ефективність - на користь стрінгових інверторів, мікроінверторів і каскадних DC/DC-перетворювачів.

2.3.2 Каскадні DC/DC перетворювачі з центральним інвертором

Як показано на рис. 2.7,б, каскадні DC/DC перетворювачі використовуються для індивідуальної оптимізації фотоелектричних модулів. Потім їхні виходи з'єднуються у великий масив і, нарешті, підключаються до мережевого інвертора. Ця схема використовує економічні та надійні DC/DC перетворювачі, які називаються DC-оптимізаторами, для виконання MPPT на рівні модуля, а потім використовує великий, високоефективний інвертор, розрахований на весь масив, для виконання DC/AC перетворення. Ця топологія часто розглядається як найкращий варіант, оскільки вона має найвищу загальну ефективність і низьку вартість. Однак, все ще існує ряд проблем: питання надійності, наявність високовольтних кабелів постійного струму та негнучкий дизайн. Таким чином, оптимізатори постійного струму створюють значні проблеми з реалізацією для застосування сонячної черепиці.

2.3.3 Послідовний інвертор

При використанні послідовних інверторів фотомодулі з'єднуються послідовно, так званими "стрінгами", а потім до послідовного інвертора. Топологія послідовного інвертора показана на рис. 2.7, в. Обмеженням послідовних інверторів є те, що вони залишаються схильними до проблем часткового затінення. Оптимізація на рівні модулів у цій схемі не виконується. [18, 19] Таким чином, ефективність MPPT знижується порівняно з DC-оптимізаторами та мікроінверторами.

Однак ці ефекти значно менші, ніж у центральних інверторів. Послідовні інвертори є дуже популярною топологією серед сонячних інсталяторів, оскільки вони пропонують низьку вартість і просту установку на будь-якому даху. Проекти часто описуються для клієнтів з точки зору встановленої потужності та початкових витрат. Цей аналіз схиляє шалки терезів на користь послідовних інверторів для багатьох клієнтів. З іншого боку, мікроінвертори стають більш порівнянними за вартістю із послідовними інверторами, а клієнти стають більш освіченими, цікавлячись загальною ефективністю своїх сонячних модулів. Таким чином, галузева тенденція рухається від послідовних інверторів до більш ефективних варіантів.

2.3.4 Мікроінвертор

Мікроінвертори виконують оптимізацію та інвертування для кожного модуля, підключаючи їх до мережі окремо. Масив, підключений до мережі через мікроінвертори, показаний на рис. 2.7, г. У разі виходу з ладу інвертора ця топологія призводить до найменшого зниження потужності, оскільки всі інші мікроінвертори продовжують виробляти енергію. Ця топологія також пропонує найбезпечнішу і найпростішу схему підключення. Потрібна лише шина змінного струму, яка вже є в будинку. Найбільшою проблемою мікроінверторів є їхня електрична ефективність. Загалом, зі збільшенням різниці в напрузі між входом і виходом електронного перетворювача або трансформатора ефективність знижується. Мікроінвертори повинні перетворювати напругу модуля в напругу мережі. Ця проблема найбільш виражена в малопотужних модулях, таких як використовується для невеликих сонячних батарей.

Існує велика різноманітність форм і розмірів дахів, і конструкція не обов'язково оптимізована для послідовно з'єднаних сонячних модулів. Мікроінвертори мають найбільшу гнучкість і можуть бути адаптовані до

існуючої конструкції.

На сучасному ринку доступно багато мікроінверторів, однак для сонячної черепиці, як правило, потрібен спеціальний перетворювач, оскільки не існує стандартизованих потужностей або напруг. [16, 17, 18] Крім того, компанії, що виробляють сонячну черепицю, максимізують свої прибутки, якщо продають її разом з індивідуальним перетворювачем. У випадку, що розглядається в цій дипломній роботі, перетворювач повинен вміщуватися в круглий корпус, призначений для змінних круглих сонячних модулів для використання на сонячному даху. Таким чином, додаткові обмеження з точки зору фізичної висоти і розмірів корпусу усувають наявні на ринку перетворювачі.

2.4 Етапи обробки електроенергії

Згідно з топології мережевих мікроінверторів можна умовно розділити на два типи. Вони визначаються кількістю каскадів формування потужності, присутніх у перетворювачі. Два потоки - це однокаскадні топології та багатокаскадні топології. На рисунку 2.8 а) і б) показані загальні форми топологій. На рисунку 2.8,а показана загальна форма одноступеневої топології. В одноступеневих топологіях фотомодуль підключений до інвертора, а інвертор підключений до мережі. На рисунку 2.8, б показано загальний вигляд багатоступеневої топології. У цьому випадку фотоелектричний модуль спочатку підключений до DC/DC перетворювача, який живить шину постійного струму, потім шина підключена до інвертора і, нарешті, до мережі. [25]

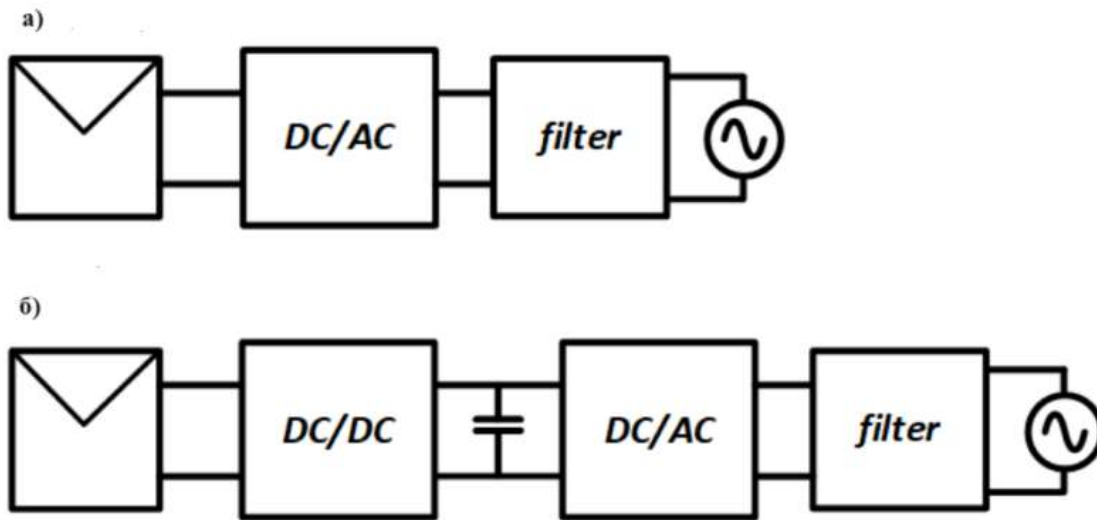


Рисунок 2.8 - Топологія мікроінверторів: а - одноступенева топологія; б - багатоступенева топологія

2.4.1 Одноступінчастий мікроінвертор

В однокаскадній конфігурації один і той самий каскад використовується як для виконання MPPT, так і для AC/DC перетворення та синхронізації з мережею. На відміну від багатокаскадної конфігурації, яка виконує MPPT за допомогою DC/DC перетворювача, а окремий каскад інвертора виконує інвертування DC/AC. [21, 20, 22] Таке поєднання завдань призводить до спрощення схеми і зменшення кількості необхідних деталей. Крім того, оскільки зменшується кількість комутаційних елементів, можна зменшити втрати на комутацію перетворювача. Керування одноступінчастим мікроінвертором може бути складним завданням, оскільки система керування повинна керувати двома процесами одночасно за допомогою одного перетворювача.

2.4.2 Багатоступінчастий мікроінвертор

Додавання додаткового каскаду має ще один дуже важливий ефект: він відокремлює MPPT від процесу інвертування DC/AC. Кожним каскадом можна керувати окремо для оптимального виконання своїх завдань. Це запобігає втручанню систем керування одна в одну, що призводить до швидшого керування, а також до кращої ефективності

MPPT. Багатоступеневий перетворювач зазвичай має кращу загальну ефективність, ніж одноступеневий. Однак багатоступеневі перетворювачі мають більшу питому вартість через збільшення кількості необхідних компонентів схеми.

Зростання ціни, пов'язане з багатоступеневими перетворювачами, з лишком компенсується перевагами спрощеного управління і підвищеної ефективності. З цієї причини багатоступеневі перетворювачі більш поширені в сонячних мікроінверторах. Таким чином, найбільш бажано розглядати тільки багатоступінчасті топології.

2.5 Топології багатоступеневих мікроінверторів

Існує багато різних багатоступеневих топологій фотоелектричних мікроінверторів. Крім того, існують варіанти всередині кожної з топологій. Багатокаскадні перетворювачі характеризуються своїми каскадами постійного/постійного струму, оскільки їхні каскади постійного/змінного струму рідко відрізняються між топологіями. [14– 16]. Найчастіше використовується повномостовий інвертор. Визначено три найпопулярніші топології однофазних багатокаскадних перетворювачів. Будь-яка з них може підійти для застосування сонячної черепиці. Робота кожного перетворювача підсумована і зважені його переваги та обмеження. Нижче перераховані три конвертери.

1. Підсилювальний напівмостовий перетворювач
2. Перетворювач типу “Push-Pull”
3. Перетворювач зворотного зв'язку

2.5.1 Напівмостовий boost мікроінвертор

На рисунку 2.9 показано підвищувальний напівмостовий мікроінвертор. Підсилювальний напівмостовий перетворювач - це комбінація підсилювального перетворювача і напівмостового перетворювача з використанням мінімальної кількості компонентів.

Типова топологія підвищувального перетворювача модифікується шляхом розділення вихідного конденсатора надвоє. Для досягнення високоефективної роботи зазвичай використовується перемикання нульової напруги (ZVS). Центральний відведення перемикачів (S_a , S_b), а також центральний відведення двох конденсаторів (C_1 , C_2) підключені до первинної сторони трансформатора. Діоди (D_1 , D_2) і конденсатори (C_3 , C_4) на вторинній обмотці утворюють ланцюг подвоєння напруги для подачі підвищеної напруги на інверсний каскад. C_{in} і L_{in} - вхідна ємність і індуктивність підсилювача. Перемикачі (S_a , S_b) доповнюють один одного. Каскад інвертування DC/AC є повномостовим перетворювачем, що працює синхронно з мережею, демонструють сучасні схеми мікроінверторів з використанням підвищувального напівмостового перетворювача. На рисунку 2.10 показано характерні осцилограми роботи підсилювального напівмостового перетворювача. У режимі 1 роботи перетворювача антипаралельний діод S_a проводить, знижуючи i_{Ls}

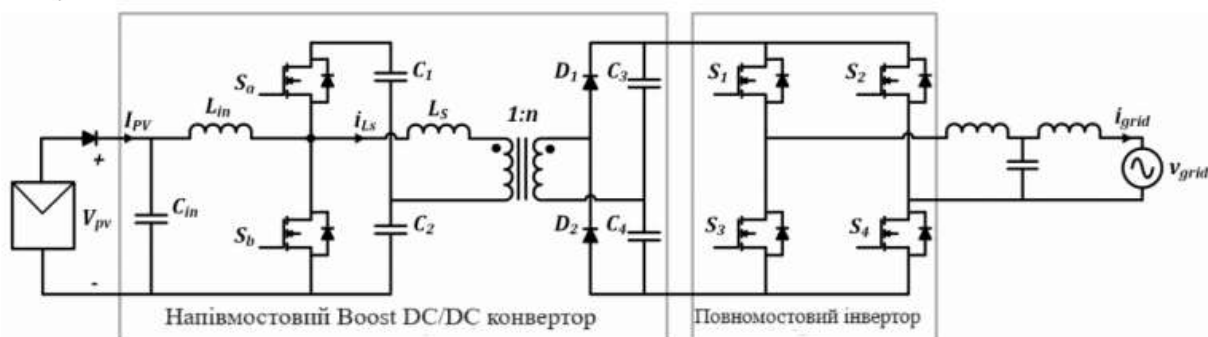


Рисунок 2.9 - Напівмостовий мікроінвертор Boost

до нуля. Режим 2 досягається, коли i_{Ls} досягає нуля. Перемикач S_a вмикається в цей момент для досягнення ZVS. Як на первинній, так і на вторинній стороні напрямок струму змінюється. На вторинній стороні це призводить до того, що протилежний діод, в даному випадку D_2 , починає проводити. На первинній стороні зміна вхідної відбитої напруги

від вторинної викликає зміну швидкості зміни струму. Режими 3 і 4 імітують режими 1 і 2, але з протилежною полярністю, перемикання S_b .

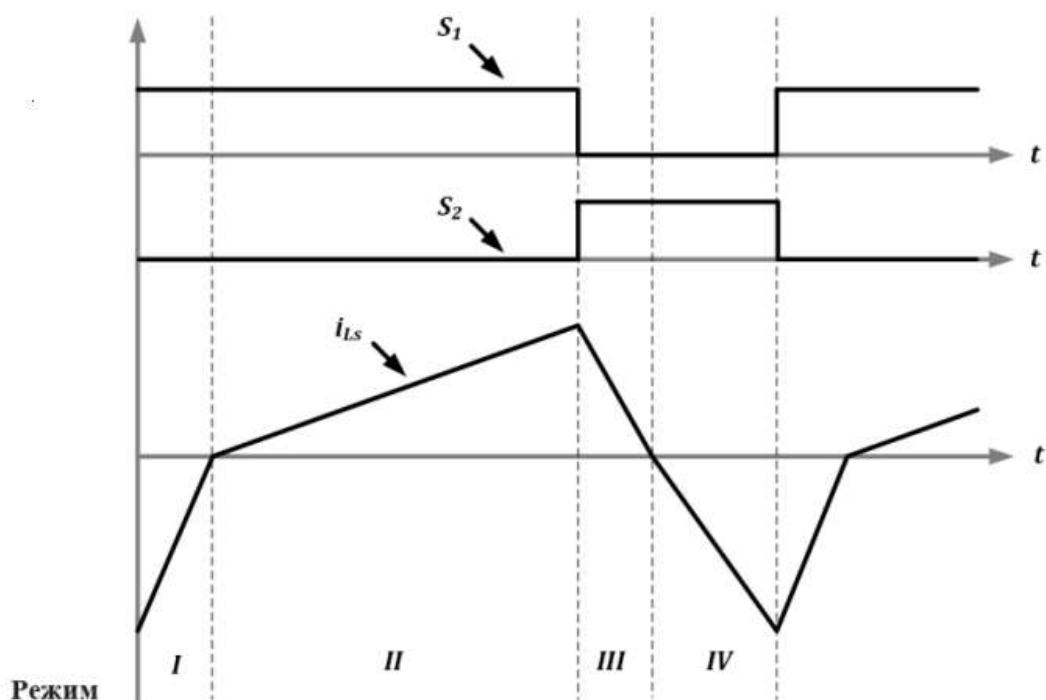


Рисунок 2.10 - Форми сигналів перемикання напівмостового мікроінвертора Boost

Підсилювальний напівмостовий мікроінвертор вирізняється високим коефіцієнтом передачі напруги та високою ефективністю. Однак, порівняно з іншими топологіями, в ньому збільшена кількість компонентів. Додаткові польові транзистори метал оксид-напівпровідник (MOSFET) і котушки індуктивності створюють значні додаткові грошові витрати. [14, 20]

2.5.2 Мікроінвертор Push-Pull

На рис. 2.11 показано топологію схеми мікроінвертора push-pull. Штовхаючий перетворювач - це перетворювач, що працює за схемою Бака. У порівнянні з напівмостовим перетворювачем, push-pull перетворювач не потребує конденсаторів для ділянки

вхідної напруги. Однак, у перемикачах штовхаючого перетворювача спостерігаються вищі струмові напруги.

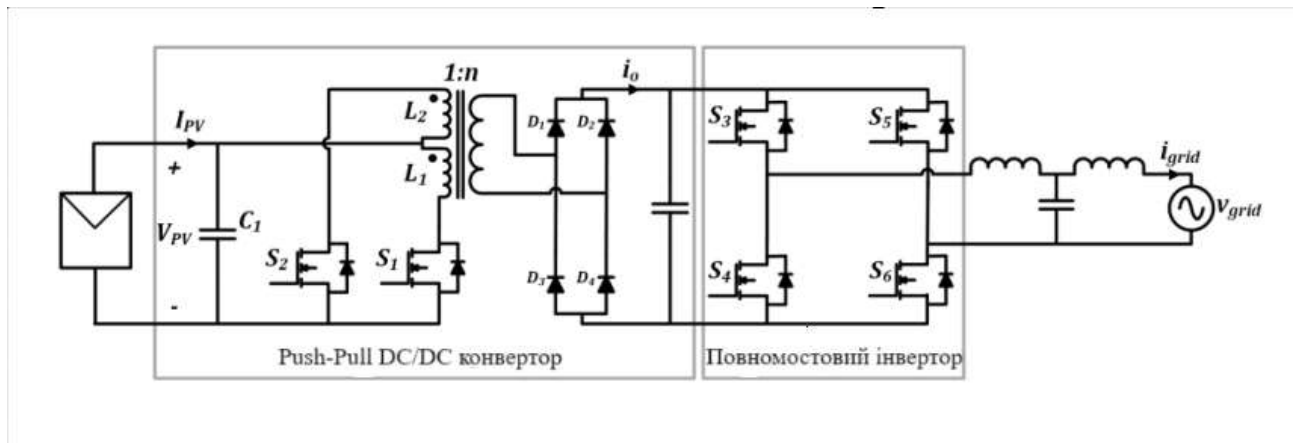


Рисунок 2.11 - Мікроінвертор push-pull

Однак, у перемикачах штовхаючого перетворювача спостерігаються вищі струмові напруги. На рисунку 2.12 показані осцилограми роботи штовхаючого перетворювача. Керування перетворювачем може здійснюватися за допомогою регулювання робочого циклу або частоти. В обох випадках час увімкнення перемикачів S_1 та S_2 однаковий. Коли вмикається S_1 , струм протікає через L_1 і прямі зсуви D_1 і D_4 . Коли вмикається S_2 , струм протікає через L_2 і прямі зсуви D_2 і D_3 . Під час вимкнення обох вимикачів струм індуктора падає.

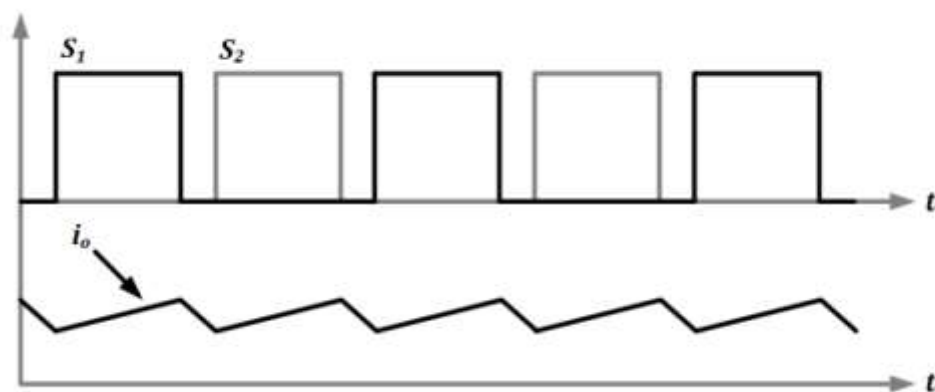


Рисунок 2.12 - Форми сигналу push-pull перетворювача

2.5.3 Мікроінвертор Flyback

На рисунку 2.13 показано топологію мікроінвертора зі зворотним зв'язком. Ця топологія є найпростішою з трьох, що вимагають лише одного перемикаючого елемента на первинній стороні, а також лише одного вхідного каналу. Схема зі зворотним зв'язком - це перетворювач, що працює за схемою підвищувального каскаду. Високе співвідношення напруг і компактна конструкція роблять зворотний перетворювач підходящим кандидатом для мікроінвертора малої потужності.

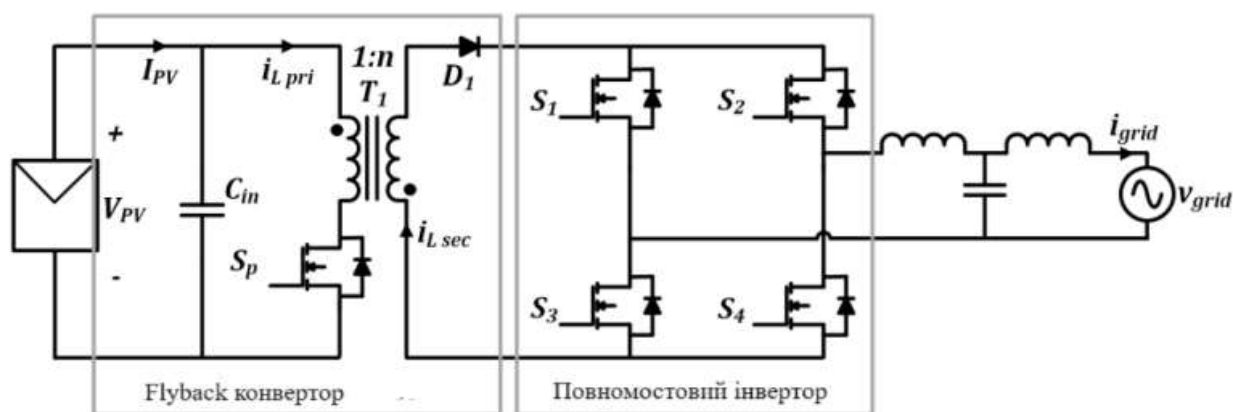


Рисунок 2.13 - Мікроінвертор із зворотним зв'язком

На рисунку 2.14 показані осцилограми перемикання мікроінвертора з флайбеком. Під час роботи, коли перемикач S_p вмикається, через первинну обмотку трансформатора протікає струм. [18, 19]

У цей час струм на вторинній обмотці не протікає через полярність діода D_1 . Коли вимикач вимикається, струм на вторинній обмотці протікає, оскільки розмагнічується зворотний трансформатор T_1 . Піковий струм на вторинній обмотці - це піковий струм на первинній обмотці, поділений на коефіцієнт витків.

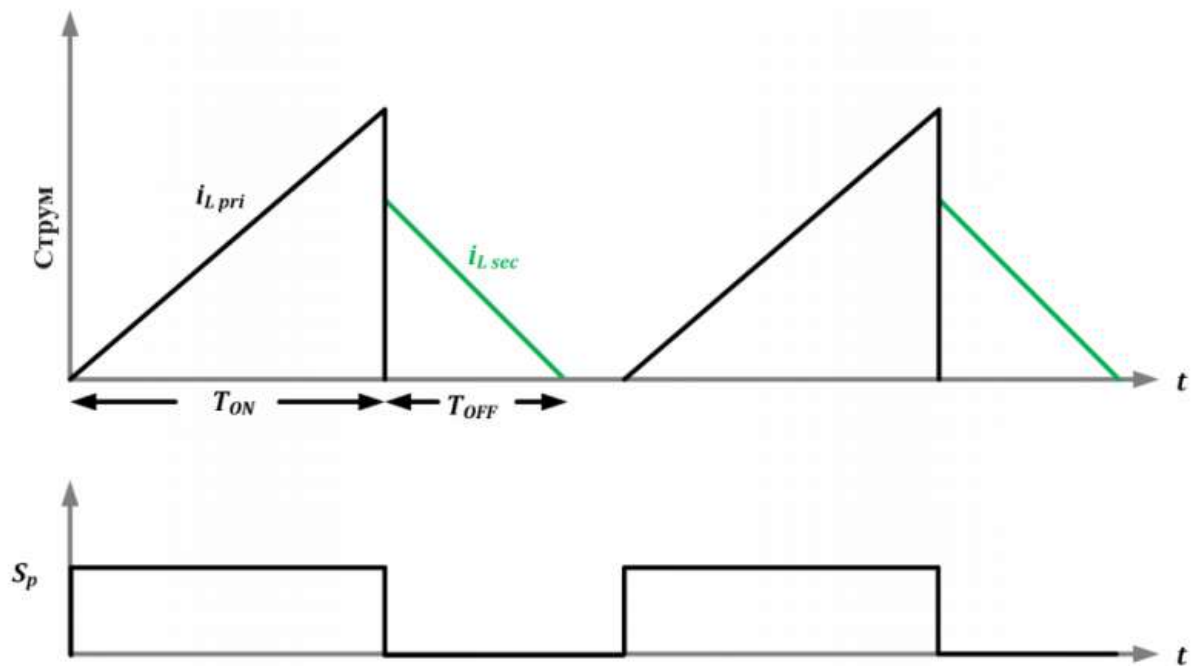


Рисунок 2.14 - Форма сигналу струму мікроінвертора з флайбеком

Оскільки основна увага приділяється високоефективному малопотужному перетворювачу, мікроінвертор зі зворотним зв'язком має найкращі характеристики. Крім того, він вимагає найменшої кількості компонентів, що призводить до менших економічних витрат. Однак, існують і певні труднощі. У перетворювача зі зворотним зв'язком спостерігається високий піковий струм на первинній обмотці, що призводить до великих середньоквадратичних струмів. Крім того, на первинній стороні перетворювача спостерігається велика пульсація напруги, що може знизити ефективність МРРТ.

3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Моделювання системи

Найпоширенішими інструментами моделювання силових електронних схем є PSIM, MATLAB і SPICE. PSIM був розроблений для інтегрованого моделювання силових електронних схем та систем керування. Він включає графічний інтерфейс користувача зі спрайтами, що представляють більшість компонентів схем і блоків систем управління. PSIM спеціально розроблений для проектування силових електронних схем, систем перетворення енергії та моторних приводів. MATLAB - це програмне забезпечення для чисельних обчислень, яке спеціалізується на аналізі великих математичних моделей. У силовій електроніці MATLAB широко використовується для проектування та аналізу систем керування. SPICE розшифровується як Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (програма моделювання з акцентом на інтегральні схеми). Це надзвичайно точна і найбільш широко використовувана комп'ютерна програма для моделювання електричних схем та електроніки.

Для моделювання схеми та системи керування в цій роботі було використано PSIM. Використовуючи велику бібліотеку PSIM, можна повністю змодельовати схему, а також повний контур керування. При моделюванні PSIM виконує обчислення з кроком, який можна вибрати для оптимізації швидкості або точності. Крім того, PSIM можна використовувати як надбудову для введення SPICE-моделей. Точна симуляція необхідна для повної перевірки схеми перетворювача.

PSIM дозволяє моделювати відповідну систему керування перед тим, як будувати схему або писати код. При правильній реалізації PSIM добре переводить симуляцію в код на VHDL, полегшуючи процес налагодження.

На рисунку 3.1 показано змодельовану схему. У таблиці 3.1 наведено параметри схеми, що використовується в роботі.

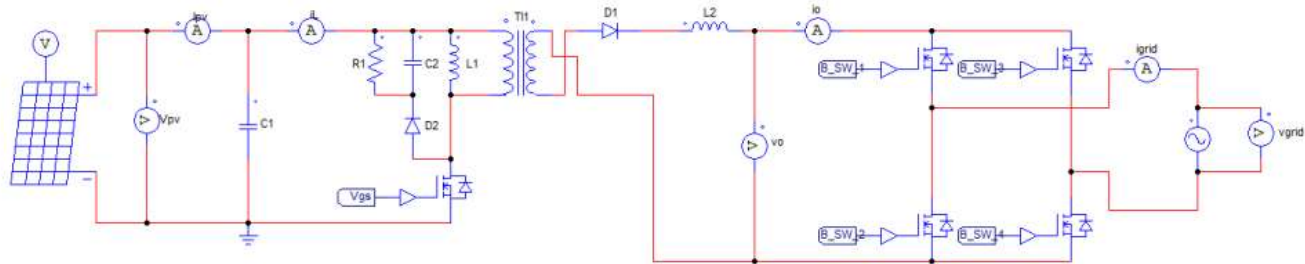


Рисунок 3.1 - Змодельована схема мікроінвертора зі зворотним зв'язком

Таблиця 3.1 - Параметри змодельованої схеми мікроінвертора зі зворотним зв'язком

Перша колонка	Друга колонка	третій
Намагнічувальна індуктивність	L1	6.4uH
Індуктивність витoku	L2	1 мкФ
Вхідна ємність	C1	2000 мкФ
Ємність нагромаджувача	C2	200 пФ
Підсилювальний резистор	R1	30 кОм
Напруга в мережі	vgrid	240 В змінного струму
Частота мережі	f	60 Гц
Коефіцієнт трансформації	T1	16:340
Напруга холостого ходу	V_{oc}	22V
Струм короткого замикання	I_{sc}	0.55A
Напруга МЕС	V_{mpp}	16V
Струм МЕС	I_{mn}	0.5A

Для перевірки схеми за допомогою симуляції були виконані наступні тести:

1. Інвертуєте постійний струм від фотоелектричного модуля для подачі енергії в мережу.
2. Виконайте МРРТ на фотомодулі.
3. Оцініть струм індуктора.
4. Оцініть фотоелектричний струм.

5. Виконайте МРРТ на фотомодулі, використовуючи розрахунковий струм.
6. Виконайте МРРТ на фотоелектричному модулі, використовуючи розрахунковий струм з новою оцінкою індуктивності.
7. Порівняйте результати нового методу оцінки поточного стану з іншими наявними методами в літературі.

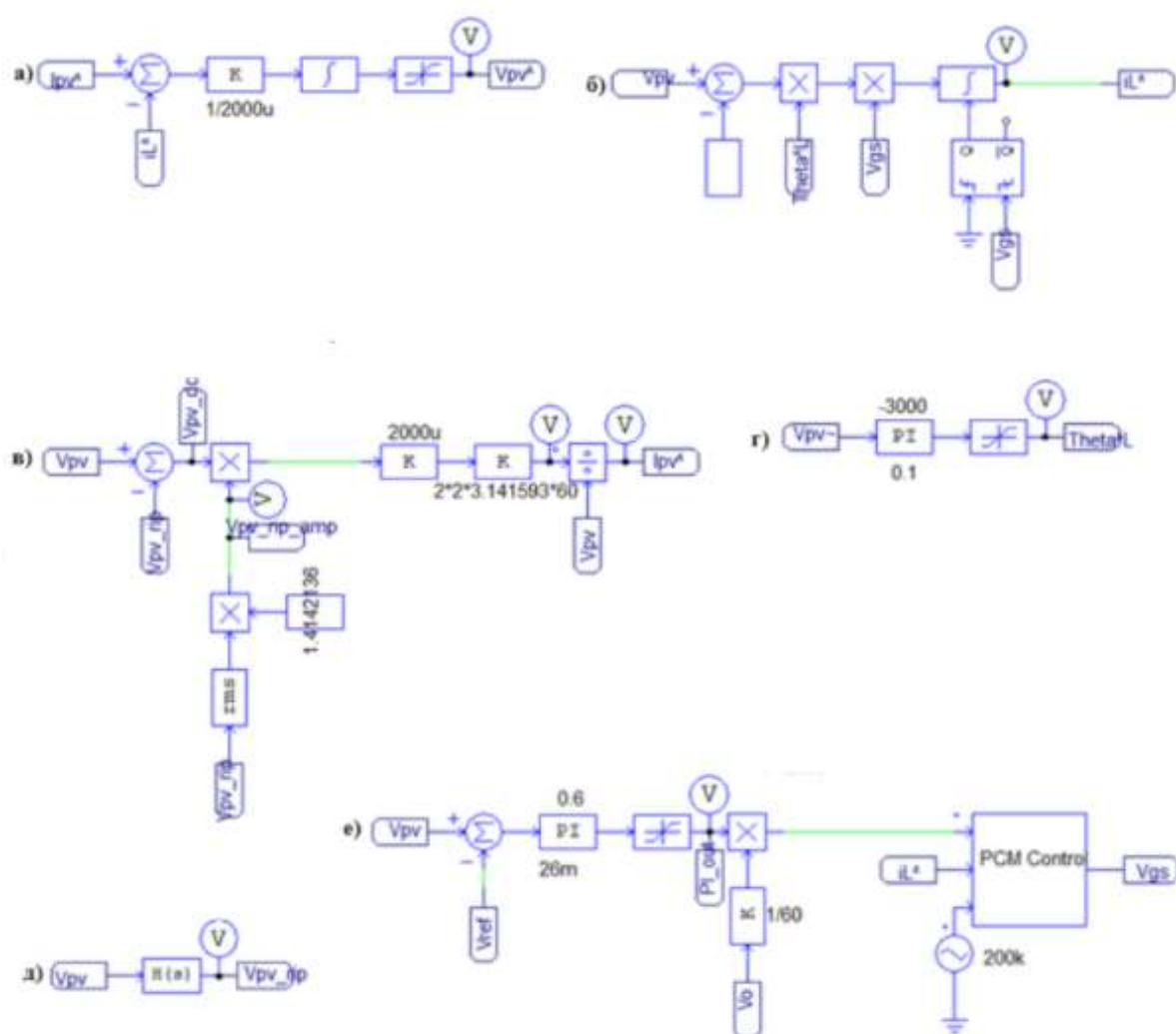


Рисунок 3.2 - Змодельована система керування мікроінвертором із зворотним зв'язком: а - Оцінка PV напруги; б - Оцінка струму індуктора; в - Розрахунок PV струму; г - Оцінка індуктивності; д - Оцінка імпульсної напруги; е - PSC контролер

На рисунках 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 та 3.7 показані деякі результати цих тестів.

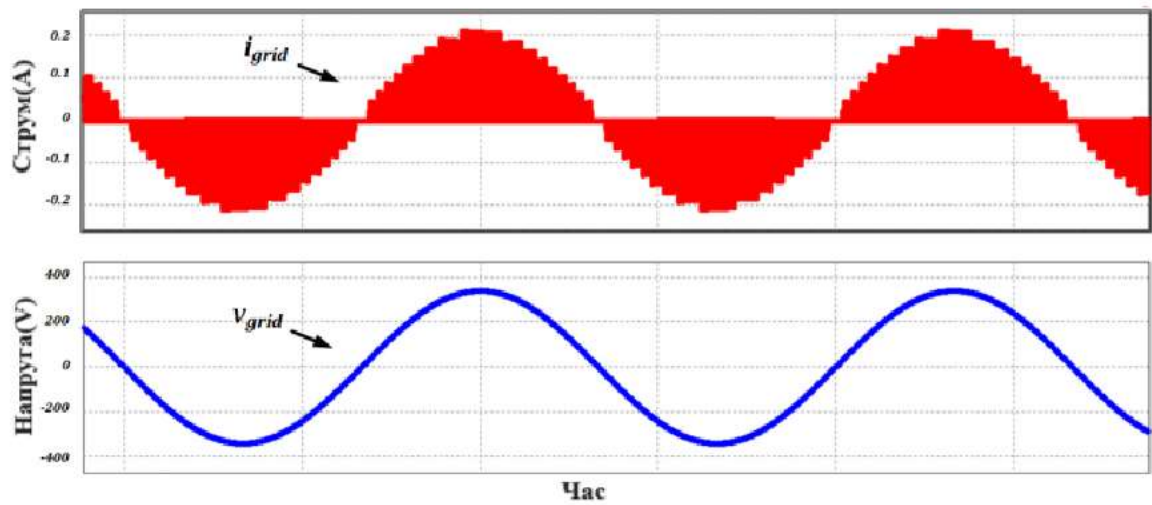


Рисунок 3.3 - Форми вихідної напруги та струму з моделювання

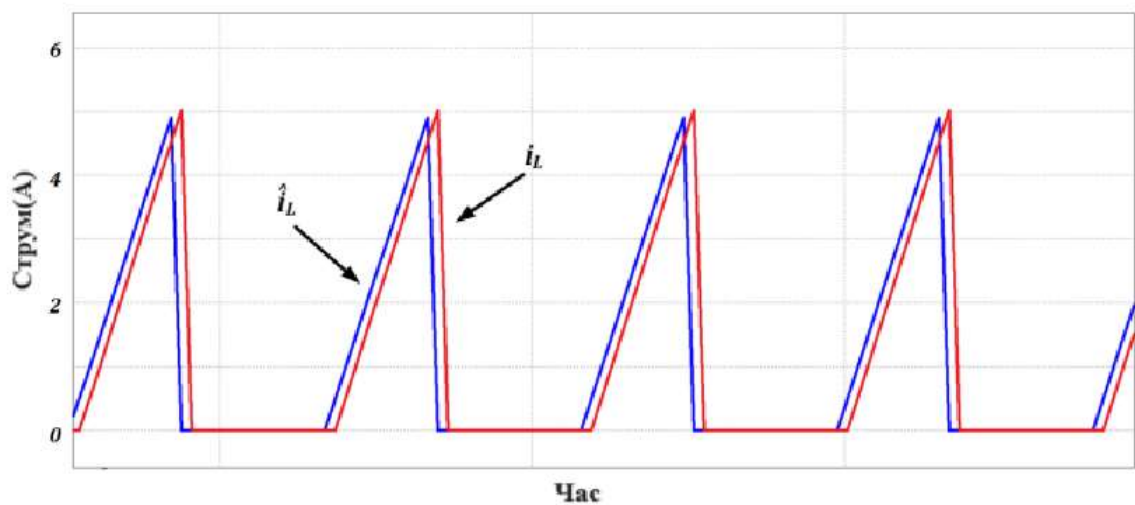


Рисунок 3.4 - Фактичний та розрахунковий струм індуктора з моделювання

На рисунку 3.3 показано напругу мережі та струм мережі. Очевидно, що інвертор працює правильно, інжектуючи струм у фазі з мережею.

На рисунку 3.4 струм індуктора порівнюється з розрахунковим струмом індуктора. Розрахунковий струм індуктора, очевидно, добре

відображає фактичний струм індуктора. Цікаво, що оцінка випереджає фактичний струм на один часовий крок. Це пов'язано з тим, що вимикачу потрібен певний час, щоб увімкнутись або вимкнутись. Цей розрив зменшується при моделюванні з вищою роздільною здатністю, однак, менші часові кроки призводять до значного збільшення тривалості моделювання..

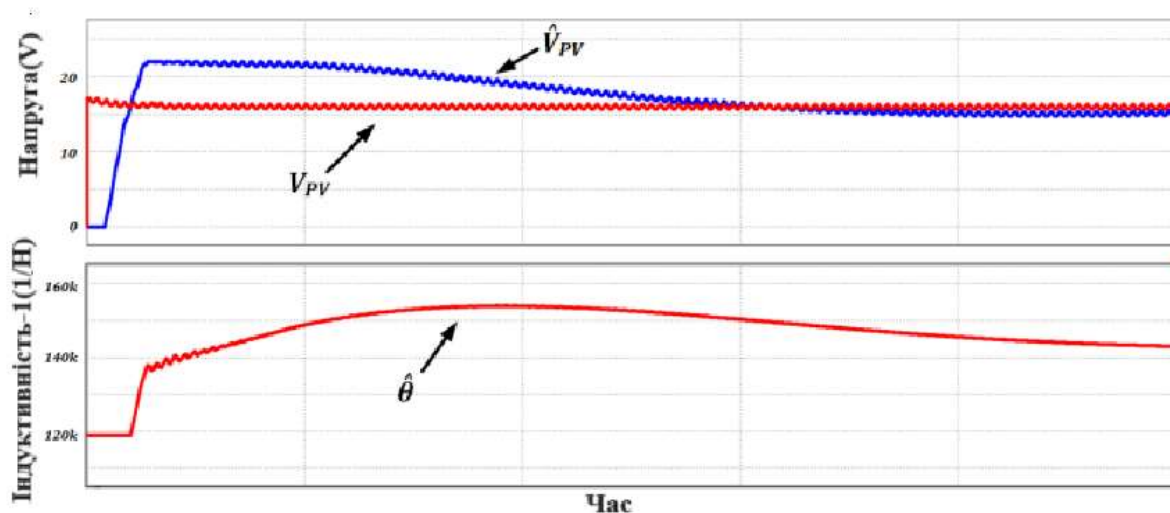


Рисунок 3.5 - Напруга, розрахункова напруга та розрахункова тета
зрезультатами моделювання

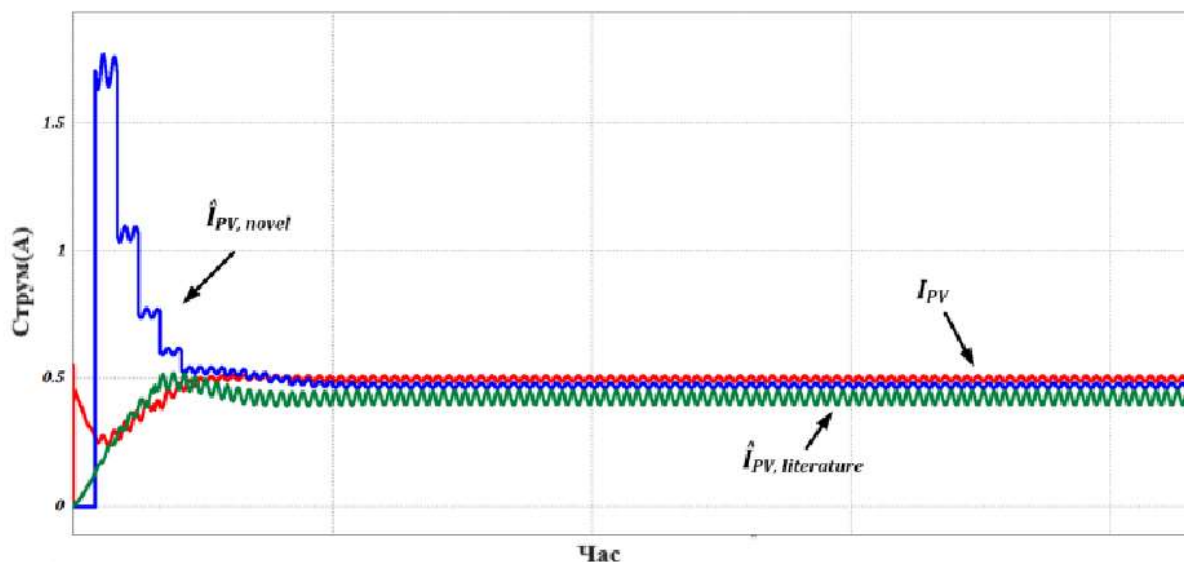


Рисунок 3.6 - Порівняння поточних методів оцінки на основі
моделювання

Індуктивність зменшує похибку між фотоелектричною напругою та розрахованою фотоелектричною напругою, як і передбачалося. ПІ-регулятор для індуктивності розроблено дуже повільним, щоб зменшити перешкоди для МРРТ. На рисунках 3.6 і 3.7 струм фотоелектричних перетворювачів порівнюється з оцінками, отриманими за допомогою нового методу і методу. Як і передбачалося, новий метод може краще оцінити фотоелектричний струм, ніж попередній метод. Новий метод був використаний без петлі спостерігача, щоб порівняти методи за допомогою однієї і тієї ж симуляції.

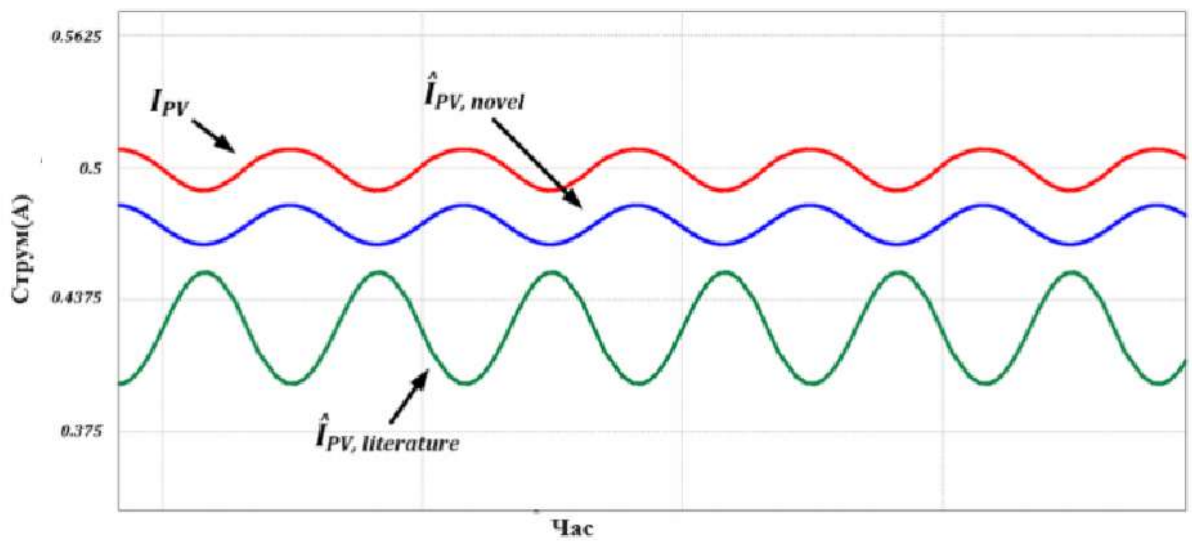


Рисунок 3.7 - Порівняння фаз поточних методів оцінки з результатами моделювання

Новий метод починає з набагато більшої похибки оцінки фотоелектричного струму, але швидко збігається. Ця початкова похибка пов'язана з використанням пульсацій напруги для розрахунку струму. Смуговий фільтр вловлює початковий сплеск напруги від запуску фотоелектричного модуля, що призводить до надзвичайно високої оцінки струму. Розриви в оцінці виникають через те, що вихід пікового детектора оновлюється лише один раз за коливання. В експериментальних тестах це число зменшується до одного разу за половину коливання.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Організація безпеки праці на підприємстві

Безпека праці – це система заходів та положень, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності працівників під час виконання їх трудових обов'язків. [23, 24]

Законодавство щодо безпеки праці застосовується до всіх підприємств та працівників, незалежно від їх форми власності та видів діяльності.

Відповідальність за організацію управління безпекою праці належить власнику або керівнику підприємства. Це включає створення необхідних служб та призначення керівників, які відповідають за вирішення питань безпеки праці.

Основні функції служби безпеки праці включають:

1. Керівництво роботою з безпеки праці.
2. Встановлення стандартів та інструкцій з безпеки.
3. Аналіз нещасних випадків та професійних захворювань.
4. Участь у розслідуванні нещасних випадків.
5. Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту.
6. Проведення навчання та інструктажів з безпеки праці.

Навчання та інструктаж з безпеки праці проводяться як для нових працівників, так і для тих, хто вже працює на підприємстві. Інструктажі можуть бути вступними, первинними, повторними, позаплановими та цільовими, залежно від обставин та потреб.

Важливо зафіксувати проведення кожного інструктажу та навчання у відповідному журналі з обов'язковими підписами учасників.

Керівник підприємства повинен забезпечити працівників інструкціями з безпеки праці та раціонально облаштованими робочими місцями для підвищення їх ефективності та зниження ризику травм.

4.2 Процедури безпеки при обслуговуванні електроустановок

Під час перевірки систем живлення електроустановок трансформаторних підстанцій, напруга зберігається, а огляд виконується на безпечній відстані від струмоведучих деталей. Виявлення дефектів проводиться візуально та за допомогою слуху. Право одноособового огляду має черговий або адміністративно-технічний працівник з відповідною кваліфікацією.

Під час огляду активних електроустановок заборонено переходити через огороження, видаляти їх або заходити в камери без бар'єрів. У випадках, коли потрібно зайти за огороження, це може бути зроблено лише в присутності іншої особи з відповідною кваліфікацією та за умови, що струмоведучі деталі не доступні.

Вимкнення та зміни в електричних схемах проводяться лише за відома або під розпорядженням чергового персоналу, керуванням або підпорядкуванням якого знаходиться устаткування. У випадках пожеж, аварій або негараздів вимкнення електрообладнання потрібно проводити без затримок, з подальшим фіксуванням у журналі.

Контроль за виконанням розпоряджень здійснюється черговим, який повідомляє особам, що вказані в розпорядженні. Перевірка операцій проводиться згідно з оперативною схемою, і усі дії фіксуються.

Бланки переключень заповнюються та підписуються черговим, що виконав операції, та контролюючим старшим черговим. Виконавець повторює операції перед виконанням, а контролюючий відзначає їх в бланку після виконання.

Вимикання та включення роз'єднувачів проводяться рішуче, але уважно, і в діелектричних рукавицях. Важливо дотримуватися правил безпеки при виконанні цих операцій, оскільки неправильне виконання може призвести до нещасних випадків.

4.3 Вимоги пожежної безпеки до електросилових установок

Електросилові установки зазвичай розміщуються в електромашинних приміщеннях (ЕМП), де можуть встановлюватись електричні генератори, перетворювачі, електродвигуни, трансформатори, розподільні пристрої, щити й пульти керування, а також допоміжне обладнання, яке обслуговує кваліфікований персонал. За класифікацією НАПБ Б.03.002, ЕМП належать до категорії Г за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

Компонування ЕМП повинно забезпечувати зручне транспортування і монтаж устаткування. При довжині приміщення понад 100 м необхідно передбачити проїзди для електрокарів або транспортних візків. Відстань між елементами устаткування і конструкціями будівлі має бути не менше 0,3 м по вертикалі і 0,5 м по горизонталі.

В ЕМП допускається встановлювати такі пристрої:

1. Оливонаповнені пускові та пускорегулювальні пристрої для електричних машин з напругою до і понад 1 кВ, якщо маса оливи до 600 кг.
2. Трансформатори потужністю до 1,6 МВА з масою оливи до 2 т, що мають підвищену міцність баків і ущільнення, а також газовий захист або реле тиску.
3. Сухі трансформатори або трансформатори, наповнені негорючими рідинами, без обмеження потужності і кількості.
4. Металеві комплектні розподільні установки, підстанції до і понад 1 кВ, батареї конденсаторів або окремі конденсатори.
5. Акумуляторні батареї закритого типу при наявності витяжного пристрою або заряджання у спеціальних приміщеннях чи шафах.
6. Напівпровідникові перетворювачі.
7. Щити керування, захисту, вимірювання і сигналізації.
8. Неізолювані струмопроводи до і понад 1 кВ.
9. Устаткування охолодження електричних машин.

ЕМП повинні бути обладнані телефонним зв'язком, пожежною сигналізацією та іншими видами сигналізації, необхідними за умовами роботи.

Якщо в ЕМП розміщене оливонаповнене обладнання в закритих камерах з викочуванням, маса оливи в одній камері або групі суміжних камер не повинна перевищувати 6,5 т. Відстань між двома камерами або групами камер має бути не менше 50 м. У разі неможливості дотримання цієї відстані, обладнання повинно розміщуватись у камерах з викочуванням назовні або в коридорі, спеціально призначеному для цієї мети.

Електричні світильники не повинні розташовуватись над відкритими шинами розподільних установок і відкритими струмопроводами. Устаткування централізованих систем змащення слід встановлювати поза ЕМП.

Для видалення надлишкової теплоти від електричних машин, резисторів та апаратури в ЕМП повинні бути передбачені відповідні заходи. Температура повітря в ЕМП повинна відповідати санітарним нормам.

Приміщення акумуляторних батарей та конденсаторних установок всередині ЕМП повинні мати окремі системи вентиляції. У вентиляційних камерах і каналах санітарно-технічної вентиляції прокладка кабелів не дозволяється, допускається лише перетинання камер і каналів проводами у сталевих трубах. У каналах вентиляції електричних машин допускається прокладка кабелів з вогнетривких матеріалів і неізольованих шин.

Під час дослідження систем живлення виявлено, що кабелі, прокладені в землі або в трубах, можуть спричинити пожежу при їх пошкодженні. Пожежа може виникнути через нагрівання гарячих матеріалів, електричний розряд у кабелі або під час ремонтних робіт у випадку недотримання заходів пожежної безпеки.

Під час гасіння пожежі в електроустановках необхідно дотримуватися таких вимог:

1. Гасіння пожежі водяними потоками допускається лише на електроустановках напругою до 10 кВ, які відкриті тільки для огляду. При

цьому електромонтер повинен працювати у діелектричних ботах та рукавицях. Гасіння ручними засобами не допускається.

2. Гасіння пожежі усіма видами пін заборонено, оскільки піна має велику електропровідність. Виняток може бути зроблено лише за певних умов з використанням спеціальних піногенераторів та надійного їх заземлення.

3. При гасінні пожежі в трансформаторах необхідно вимкнути їх з обох сторін і негайно приступити до гасіння будь-якими доступними засобами.

4. При загорянні кабелів необхідно включити стаціонарну систему пожежегасіння (повітряно-механічна піна або розпилену воду). Пожежникам, які гасять пожежу у кабельних тунелях, не слід заходити у відсік з горючими кабелями.

5. При гасінні пожежі на щитах управління необхідно зняти напругу, щоб уникнути подальшого поширення вогню на сусідні панелі. Використовуються вуглекислотні вогнегасники або порошкові вогнегасники.

6. В РП і ТП чергова бригада негайно проводить вимкнення горючого обладнання та приступає до гасіння пожежі, викликаючи при необхідності місцеву пожежну команду.

Дотримання цих вимог допоможе уникнути серйозних наслідків пожеж у електроустановках.

4.4 Вплив електричного струму на організм людини

Електрична енергія широко застосовується в промисловості, на транспорті, у сільському господарстві та побуті. Її універсальне використання обумовлено кількома характеристиками:

1. Електричну енергію можна отримувати з інших видів енергії, таких як механічна, теплова, ядерна, хімічна та променева.

2. Велику кількість електричної енергії можна передавати на великі відстані зі швидкістю світла з мінімальними втратами. Сьогодні існують лінії електропередачі довжиною понад тисячу кілометрів.

3. Електричну енергію легко розподіляти між споживачами різними порціями. У зв'язку, автоматизації та вимірювальній техніці використовуються пристрої з потужністю, яка вимірюється в одиницях або навіть десяткових частках ват, тоді як є пристрої з потужністю у тисячі кіловат.

Крім того, електрична енергія відносно легко перетворюється в інші види енергії: механічну, теплову, променеву та хімічну. Використання електродвигунів для перетворення електричної енергії в механічну дозволяє ефективно приводити в рух різноманітні машини та механізми в промисловості, сільському господарстві, транспорті та побуті. Електричні джерела світла забезпечують високоякісне штучне освітлення.

Сьогодні ми не можемо уявити своє життя без електричних приладів, таких як телевізори, радіоприймачі, магнітофони, холодильники, пирососи, пральні машини, електропраски та кухонні прилади. Електрифікація багаторазово збільшила можливості людини, сприяючи всебічній механізації її діяльності. Проте разом з перевагами електрика несе значні небезпеки, які посилюються зі збільшенням її використання. Незважаючи на заходи безпеки, з розвитком електротехніки загрози зростають.

Електричні явища, зумовлені рухом та взаємодією електрично заряджених часток, включають електричний струм, що є упорядкованим рухом цих часток. У металах струм зумовлений вільними електронами, в електролітах – іонами. Струм у провідниках викликає їх нагрівання, зміну хімічного складу та створення магнітного поля. Наявність електричного струму в приладах, установках та обладнанні є великою потенційною небезпекою для людини, оскільки органи чуття не можуть виявити його на відстані. Захисна реакція організму виявляється лише після безпосереднього потрапляння під дію струму.

Особливість дії струму полягає в тому, що він діє не тільки на місця контакту, а й викликає рефлекторні порушення нормальної діяльності органів.

Крім того, електричний струм може завдавати ушкоджень без прямого контакту зі струмопровідними частинами, наприклад, через електричну дугу.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, зумовлює перетворення поглинутої енергії в інші види, спричиняючи термічну, електролітичну, механічну та біологічну дії. Термічний вплив викликає нагрівання тканин аж до опіків, електролітична дія – розкладання органічних рідин, біологічна дія – подразнення та збудження тканин, а механічна дія – розрив тканин через електродинамічний ефект.

Електротравми поділяються на загальні та місцеві. Загальні електротравми, такі як електричні удари, є найбільш небезпечними, оскільки можуть спричинити фібриляцію серця, параліч дихання та інші серйозні наслідки.

Таким чином, незважаючи на численні переваги електричної енергії, її використання пов'язане з високими ризиками, що потребує відповідних заходів безпеки та захисту

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі було розглянуто процес розробки та дослідження Flyback мікроінвертора для сонячної системи резервного електроживлення потужністю 100 Вт. Поставлені завдання успішно виконано, а мета дослідження досягнута, що підтверджується теоретичними розрахунками та експериментальними дослідженнями.

Основною метою роботи було створення ефективного, надійного та економічного мікроінвертора, здатного забезпечувати стабільне резервне електроживлення від сонячних панелей. В результаті дослідження було розроблено схему мікроінвертора, проведено аналіз його компонентів та розрахунок параметрів, необхідних для оптимальної роботи системи.

Висновки роботи підтверджують, що розроблений Flyback мікроінвертор є ефективним рішенням для сонячної системи резервного електроживлення потужністю 100 Вт. Експериментальні дослідження показали високу ефективність та надійність роботи системи, що робить її перспективною для впровадження у промислових та побутових умовах.

Таким чином, дана кваліфікаційна робота робить вагомий внесок у розвиток технологій відновлюваної енергії, зокрема сонячної енергетики, та відкриває нові можливості для подальших досліджень і вдосконалень у цій галузі.

References

Список літератури

1. N. Kasa, T. Iida, and L. Chen, "Flyback інвертор, керований бездатчик струму MPPT для фотоелектричної енергосистеми", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 4, с. 1145-1152, серпень 2005.
2. А. Полман, М. Найт, Е. К. Гарнетт, Б. Ерлер та В. К. Сінке, "Фотоелектричні матеріали: Теперішня ефективність та майбутні виклики", Science, vol. 352, no. 6283, pp. 307-318, Квітень 2016.
3. А. К. Шукла, К. Судхакар, П. Баредар та Р. Мамат, "Сонячні фотоелектричні системи та системи BIPV: Бар'єри, виклики та рекомендації щодо політики в Індії", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 82, pp. 3314-3322, лютий 2017.
4. N. Falconar, D. S. Beyragh, and M. Pahlevani, "A novel control system for solar tile micro-invertors," in 2018 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expro, Сан-Антоніо, березень 2018, с. 375-380.
5. М. Кешані, Е. Адіб, і Х. Фарзанехфард, "Мікроінвертор на основі топології одностороннього первинно-індуктивного перетворювача з активним роз'єднанням живлення затискачів", IET Power Electron., vol. 11, no. 1, pp. 73-81, Груд 2018.
6. М. А. Rezaei, K. J. Lee, and A. Q. Huang, "Високоєфективний мікроінвертор зі зворотним зв'язком з новим адаптивним снаббером для фотоелектричних застосувань", IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 1, pp. 318-327, Січ 2016.
7. Q. Мо, М. Чен, З. Чжан, Ю. Чжан та З. Цянь, "Перетворювачі зворотного зв'язку з цифровим керуванням для підвищення ефективності фотоелектричних мікроінверторів з мережевим

- підключенням", в 2012 Двадцять сьомому щорічнику. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo, Орландо, 2012, с. 555-562.
8. S. Сараванан та Н. Рамеш Бабу, "Алгоритми відстеження точки максимальної потужності для фотоелектричної системи - огляд", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 57, pp. 192-204, травень 2016.
9. А. Лукріз, М. Хаддаді та С. Мессальті, "Моделювання та експериментальна розробка нового вдосконаленого алгоритму MPPT зі змінним розміром кроку інкрементальної провідності для фотоелектричних систем", ISA Trans. vol. 62, pp. 30-38, травень 2016.
10. Бедрій Я.І. Безпека життєдіяльності : навчальний посібник / В.Я.Нечай. Львів : Манголія 2006, 2007. 499 с.
11. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці: підруч. / В. Ц. Жидецький. — 3-тє вид., перероб. і доп. — Львів : Укр. акад. друкарства, 2006. — 336 с. — ISBN 966-8013-11-5
12. ДНАОП 1.1.10 – 1.07. – 01. Правила експлуатації електрозахисних засобів (укр). Введ. 05.06.2001. – Харків: Форт, 2003. – 119 с
13. Панченко С. В., Акімов О. І., Бабаєв М. М. Електробезпека. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 295 с.
14. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 26с.
15. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка ” Модуль 4. «Мікросхемотехніка» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 44с.
16. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні

системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67с.

17. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерноінтегровані технології»./ В.Б. Савків., Ю.Б. Капаціла, Р.І. Михайлишин//:- Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2021, – 46с.

18. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>

19. Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>

20. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. / (Рекомендовано до друку вченою радою Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя протокол № 9 від 4 жовтня 2022 р.

21. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0: навчальний посібник / Коноваленко І.В., Марущак П.О. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2020 – 320 с. /Рекомендовано до друку Вченою радою Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Протокол № 10 від 20 жовтня 2020 року

22. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
23. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
24. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>
25. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.