

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри

_____ /Д. О. Босий/

«_____» _____ 20____ р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Дослідження режимів роботи сонячних електричних станцій в системах електропостачання**

Theme **Research of modes of operation of solar power plants in power supply systems**

Керівник дипломної роботи

доц. _____ В. О. Дьяков

Нормоконтролер

доц. _____ Т. М. Міщенко

Студент групи ЕС1926

_____ М. О. Мудрак

Student

Mudrak Maksym

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. зав. кафедри

Босий Д.О.

(підпис)

«17» вересня 2020р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студента групи ЕС1926

(номер групи)

Мудрак М.О.

(ПІБ)

1 Тема дипломного проекту (роботи) Дослідження режимів роботи сонячних електричних станцій в системах електропостачання.

затверджена наказом по університету від «16» 09 2020 р. № 494 ст.

2 Термін подання студентом закінченої роботи «7» грудня 2020р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту (роботи): типові схеми сонячних електростанцій.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): Дослідження режимів роботи сонячних електричних станцій в системах електропостачання.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
ВСТУП	17.09	5
АНАЛІЗ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, СТАНУ ПРОБЛЕМИ	12.10	25
АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РОБОТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ	11.11	30
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	25.11	30
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	2.12	5
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	6.12	5

Дата видачі завдання: « 17 » вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи

_____ к.т.н., доц. Дьяков В.О.
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ Мудрак М.О.
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 104 сторінки, складається з 3 розділів та містить 76 ілюстрацій, 6 таблиць, 18 бібліографічних джерел.

Мета роботи – дослідити роботу сонячних електростанцій (СЕС) в автономному режимі роботи та в режимі роботи з мережею.

У даній роботі вирішувалося завдання застосування смарт-технологій, одним із переваг яких є забезпечення якості електричної енергії, пониження матеріаломісткості електроенергетичних систем та збільшення їх надійності. Основною задачею було дослідження аналізу впливу СЕС на показники якості електроенергії, надійність функціонування системи та виявлення чинників, що впливають на показники якості електроспоживання, енергетичні залежності, що характеризують надійність та енергоефективність при автономному режимі роботи СЕС та в режимі роботи з мережею. При вирішенні поставлених завдань у роботі виконані узагальнення і аналіз матеріалів науково - технічної літератури, використані методи математичного аналізу та імітаційного моделювання в програмних пакетах Matlab / Simulink, методи обробки статистичних даних, методи теоретичних та експериментальних досліджень.

Ключові слова: СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ІНВЕРТОРА, СМАРТ-ТЕХНОЛОГІЯ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, СТАНУ ПРОБЛЕМИ	9
1.1 Загальна характеристика розвитку ринку альтернативної енергетики України.....	9
1.2 Аналіз ринку сонячної енергетики в Україні.....	11
1.3 Ціни на ринку СЕС.....	15
1.4 Оператори на ринку.....	16
1.5 Державне регулювання ринку.....	17
1.6 Сонячна інсоляція в Україні.....	18
1.7 Потенціал сонячної енергетики в Україні.....	19
1.8 Аналіз досліджень.....	20
1.9 Постановка задачі.....	23
2. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РОБОТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ.....	24
2.1 Аналіз та дослідження електромагнітних перехідних процесів при паралельній роботі сонячної електростанції з енергосистемою.....	24
2.2 Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в енергосистемі.....	32
2.2.1. Аналіз особливостей існуючих контролерів інверторів СЕС.....	33
2.2.2 Особливості пропорційно-інтегрального контролера інверторів СЕС.....	35
2.2.3 Особливості пропорційно-резонансного контролера інвертора СЕС.....	37
2.2.4 Особливості прогнозуючого (DB) контролера інвертора СЕС.....	39
2.3 Вибір програмного забезпечення для імітаційного моделювання.....	41
2.4 Моделювання режимів роботи.....	42
2.5 Теоретичні відомості про трифазних АІН.....	43

02.15:ЕС1926:ПД:2020-ПЗ							
З	Ар	№ докум.	Підпи	Да	Дослідження режимів роботи сонячних електричних станцій в		
м	к.	Мудрак М.О.	с	та			
Використані:		Дьяков В.О.			ДНУЗТ, ICE, гр.ЕС1926		
сзроб.	Н.	Мищенко Т.					
наглядопр.	М.						
Затверд.							

2.5.1 Реалізація силового ключа.....	49
2.5.2 Регулювання вихідної напруги АІН.....	50
2.5.3 Опис режимів роботи інвертора.....	53
2.6 Імітаційне моделювання роботи СЕС в різних режимах електроживлення на базі трифазного інвертора.....	55
2.6.1 Опис моделі інвертора при роботі у веденому та ведучому режимі	55
2.6.2 Моделювання мережі.....	56
2.6.3 Моделювання акумуляторної батареї.....	62
2.6.4 Моделювання трифазного інвертора.....	63
2.6.5 Моделювання блоку керування інвертором.....	66
2.6.6 Перетворення для створення контурів напруги і струму.....	71
2.6.7 Моделювання навантаження.....	72
2.7 Моделювання підстанції.....	74
2.7.1 Моделювання ланцюгів споживачів.....	74
2.7.2 Розрахунок силового активного фільтру.....	79
2.7.3 Система управління.....	79
2.7.4 Розрахунок конденсатора.....	86
2.8 Результати моделювання.....	87
2.8.1 Підтримка напруги в режимі веденого.....	88
2.8.2 Підтримка напруги в режимі ведучого.....	89
2.8.3 Підтримка напруги з переходом з режиму ведучого в режим веденого.....	91
2.8.4 Результати моделювання і порівняльний аналіз технічних засобів по покращенню якості електроенергії.....	94
3. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	98
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	103

ВСТУП

Сонячна енергетика - одна з найперспективніших галузей відновлюваної енергії. Про це свідчать високі темпи її розвитку як в Україні, так і у світі.

В сучасних електричних мережах є проблеми з підвищеною втратою електроенергії за рахунок використання напівпровідникових приладів, які в свою чергу викликають появлення вищих гармонік. У розвитку науки і техніки, створені новітніх технологій, підвищення енергетичної безпеки України, суттєва роль тут належить надійної та якісної поставки електричної енергії (ЕЕ) споживачам.

Актуальність роботи. В даний час зростає вплив відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) на розвиток електроенергетики. Застосування фотоелектричних модулів (ФЕМ) в процесі перетворення сонячної енергії в електричну відкриває новий етап у розвитку сонячних електростанцій (СЕС).

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електроспоживання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Мета і завдання роботи.

Метою роботи є розробка моделей режимів роботи сонячної електростанції (СЕС), дослідження режимів роботи СЕС в децентралізованих мережах електропостачання та дослідження впливу СЕС на роботу електроенергетичних систем, тому слід вирішити наступні завдання:

- Створити комп'ютерну модель СЕС в MatLab спільно з Simulink для дослідження режимів роботи мережі.
- Дослідити аналіз впливу СЕС на показники якості електроенергії та надійність функціонування системи.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в електрообладнанні сонячної електростанції. **Предмет дослідження** – визначення параметрів

режимів роботи обладнання сонячної електростанції. **Методи дослідження** – обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ. Імітаційне моделювання виконувалось у середовищі MatLab.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист

В роботі було створено різні режими роботи сонячних електростанцій. Наукова новизна полягає в покращенні показників якості електроенергії застосовуючи сонячну електростанцію як активний фільтр, тому для покращення показників якості електроенергії в мережі було розроблено модель блоку керування інвертора з фільтром від гармонійних складових. Результати моделі позитивні.

Практична цінність роботи. Набуті результати у ході моделювання дозволяють розширити межі знань науковців та дізнатись більше про роботу сонячних електростанцій у різних режимах.

Отримані результати можна використати при дослідженні реального устаткування та при його створенні.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи та результати досліджень були представлені здобувачем на III Міжнародній научно-практичній конференції «PRIORITY DIRECTIONS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT» (Київ, 2020 р.)

Публікація: Мудрак М.О. Дослідження режимів роботи сонячних електричних станцій в системах електропостачання / М.О.Мудрак, // III Міжнародна научно-практична конференція «PRIORITY DIRECTIONS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT», 22-24 листопада 2020 р. – Київ. 2020, с. 352-355.

1 АНАЛІЗ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Загальна характеристика розвитку ринку альтернативної енергетики України

Сонячна енергетика - одна з найперспективніших галузей відновлюваної (нетрадиційної) енергії. Про це свідчать високі темпи її розвитку як в Україні, так і у цілому світі.

Сучасний стан на ринку сонячної енергетики можна охарактеризувати так: кожні два дні в Україні з'являється по одній потужній сонячній електростанції і приблизно 25 малих станцій для забезпечення енергією сонця домогосподарств.

Наочна ступінь розвитку та потенціал сонячної енергетики в Україні відображає той факт, що у середньому в країнах Євросоюзу на одного жителя приходить 33,7 м² поверхні колекторів, а в Україні – 0,001 м²

Оскільки держава зобов'язалась до 2020 р. досягти частки відновлюваної енергетики 11% у енергобалансі країни – можна спостерігати продовження всебічної підтримки галузі.

Частка електроенергії, виробленої з альтернативних джерел є незначною, проте її розмір стабільно збільшується: з 1% у 2016 року до 1,7% у 2019 році. Порівняно з показником 2017 року збільшилось на 736,1 млн. кВт·год або на 38,8% та становило 2 632,4 млн. кВт·год.

У піврічному вимірі 2020 року частка енергії, виробленої з альтернативних джерел ставить вже 3% (плановий показник становив 2,5%). Порівняно з показником за півріччя 2019 року виробництво електроенергії збільшилося на 93,4%. (рис. 1.1).

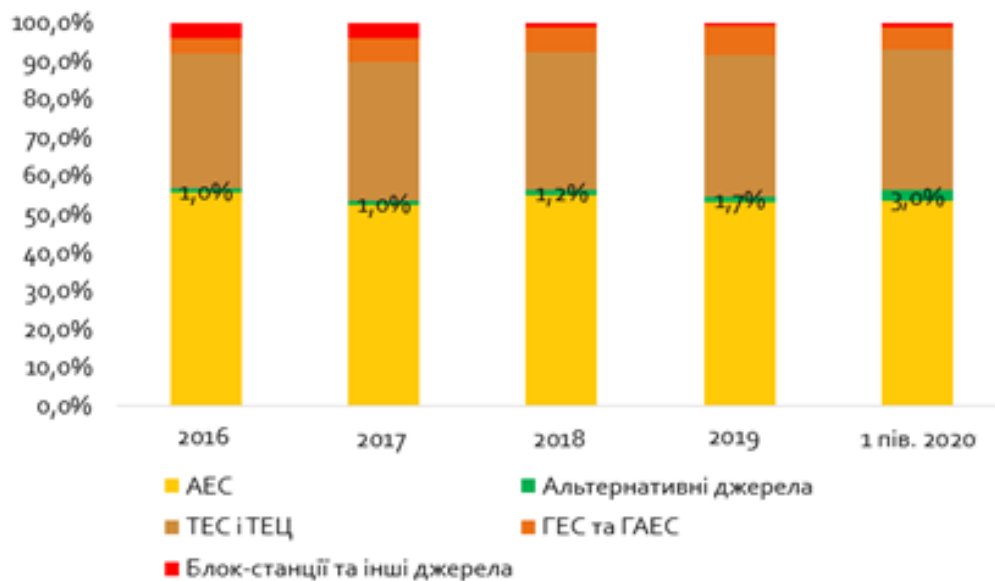


Рисунок 1.1 Структура виробництва електроенергії за видами джерел у 2016-2020 рр. в натуральному виразі, %

Порівняно з іноземними країнами альтернативна енергетики України займає незначну частку у виробництві електроенергії, проте показники інших країн показують значний потенціал для вітчизняної відновлюваної енергетики (рис. 1.2)[1].

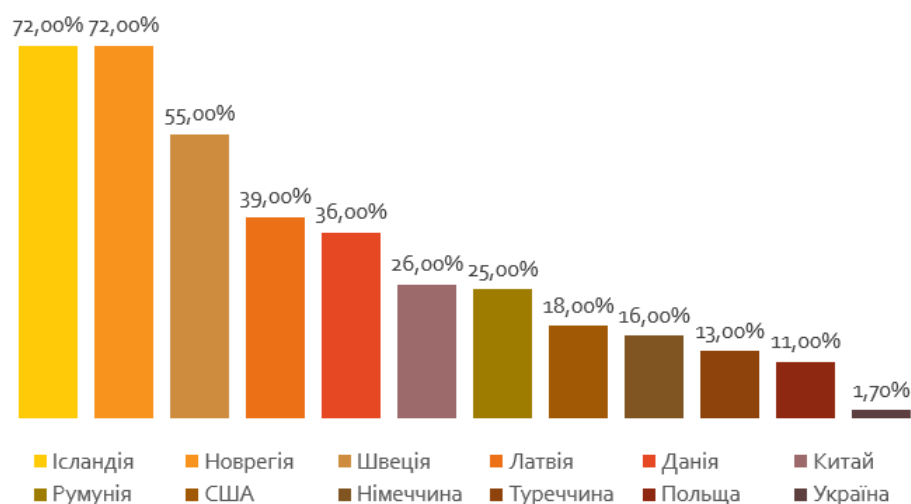


Рисунок 1.2 Частка альтернативної енергетики у виробництві електроенергії країн світу

1.2 Аналіз ринку сонячної енергетики в Україні

З 2015 по 1 півріччя 2020 року потужність об'єктів відновлюваної енергетики, яким встановлено зелений тариф збільшилась більше ніж в **4 рази** (з **967 МВт до 3910 МВт**). З початку 2016 року залучено близько **2,5 млрд. євро інвестицій**.

Станом на 01.07.2020 року в Україні працює 514 СЕС загальною потужністю 2 640 МВт та 11 888 СЕС приватних домогосподарств 276 МВт (рис.1.5). При цьому, лише за 6 місяців поточного року було введено 156 об'єктів сонячної енергетики загальною потужністю 1252 МВт. Кількість СЕС домашніх господарств за цей період зросла на 60% (+4438 домогосподарств) (рис. 1.3)[1].

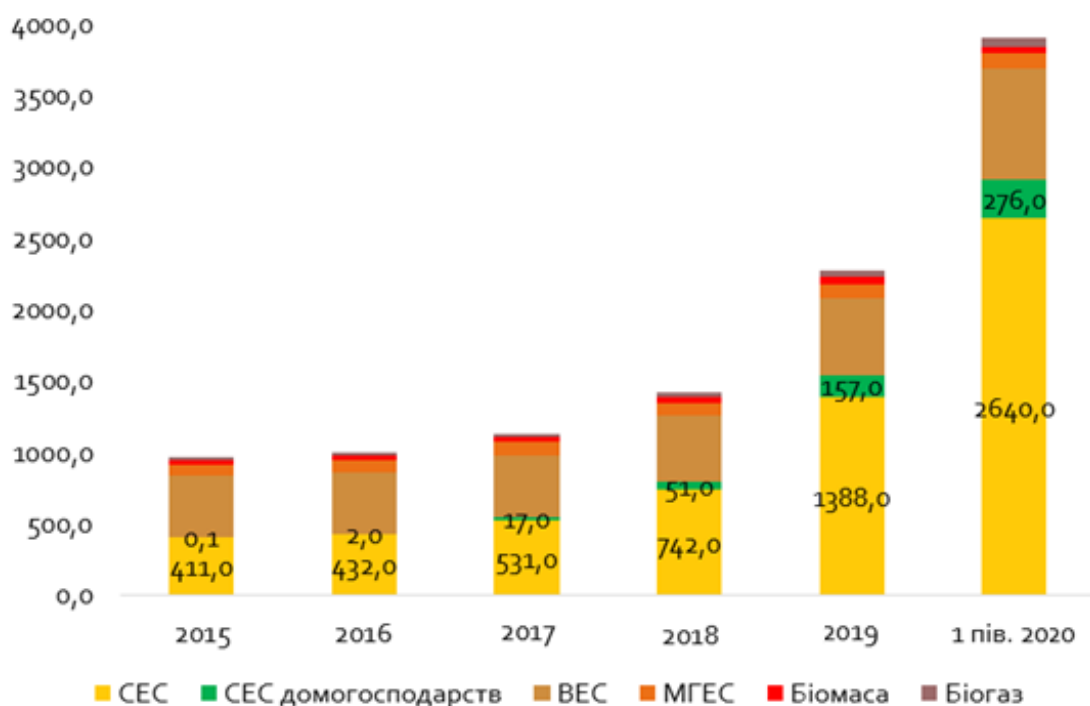


Рисунок 1.3 Потужність об'єктів відновлюваної електроенергетики, яким встановлено «зелений» тариф

Згідно наступної діаграми більше половини всього обсягу електроенергії (54%), виробленої відновлюваними джерелами є продуктом функціонування сонячних електростанцій (49% - з промислових та 5% - з станцій домогосподарств).(рис.1.4)

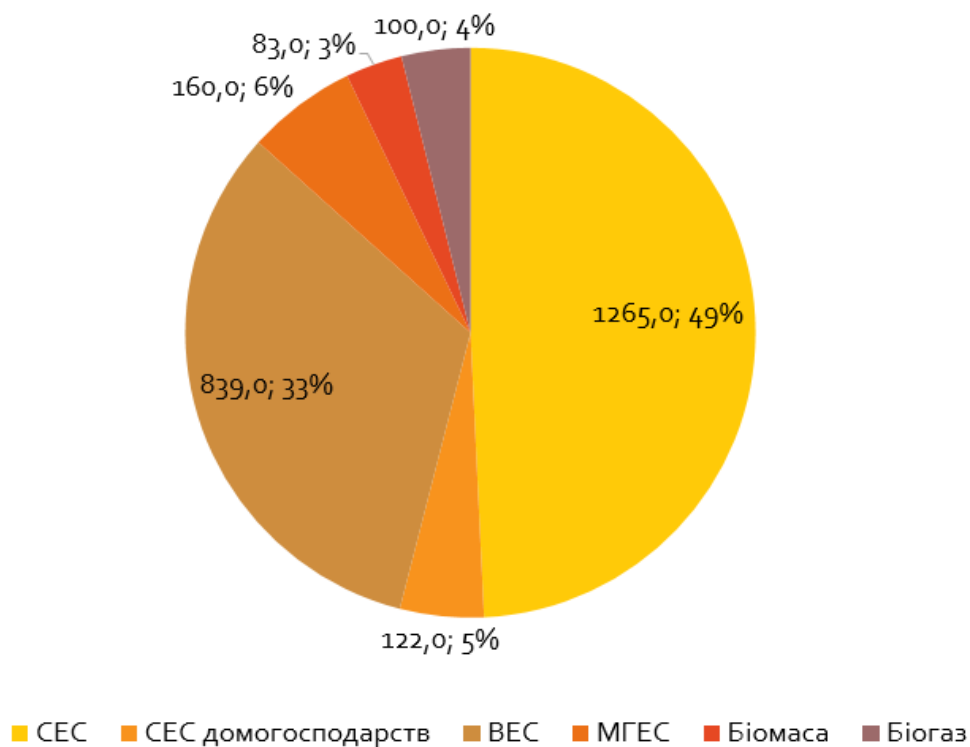


Рисунок 1.4. Структура виробництва електроенергії об'єктами відновлюваної енергетики, яким видано «зелений» тариф, за 6 місяців 2020 році

Порівняно з 1 півріччям 2019 року обсяг електроенергії, виробленої на промислових та домашніх СЕС зріс на **16%**.

Такі показники свідчать про визначальну роль об'єктів сонячної енергетики у виробництві електроенергії з відновлюваних джерел. Як наслідок можна очікувати посилену увагу до реалізації проектів у цій галузі, інформаційну підтримку тощо.

Починаючи з 2016 року на встановлення сонячних електростанцій приватними домогосподарствами інвестовано близько 240 млн. євро.

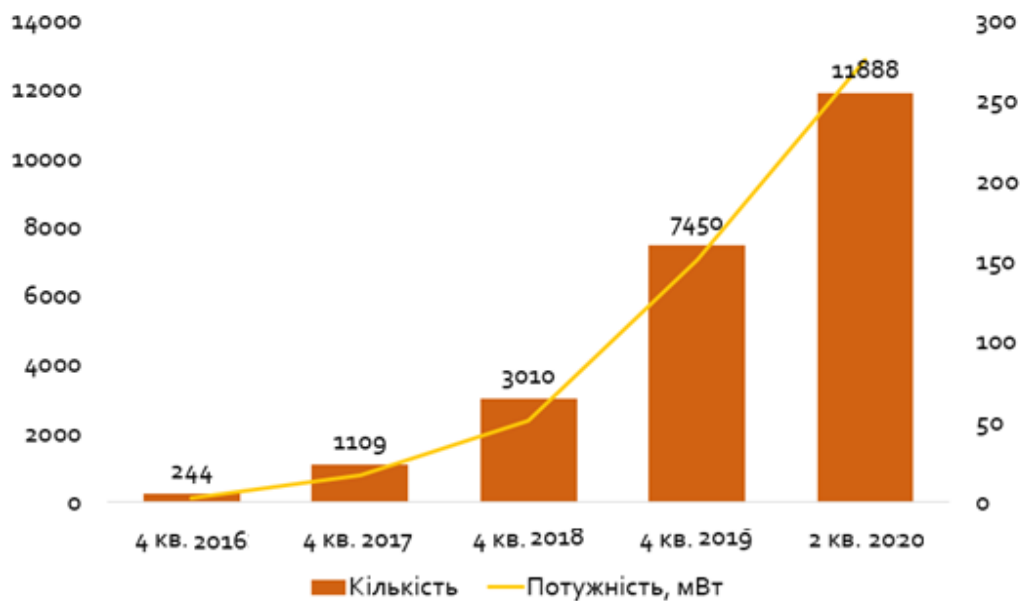


Рисунок 1.5 Кількість домогосподарств, що встановили сонячні електроустановки та їх встановлена потужність, МВт

Лідерами серед регіонів України з загальної кількості приватних домогосподарств, що встановили сонячні електростанції, є:

Дніпропетровська область – 1546 домогосподарства;

Тернопільська область – 1211 домогосподарства.

Київська область – 1082 домогосподарств. (рис. 1.6 та рис.1.7)

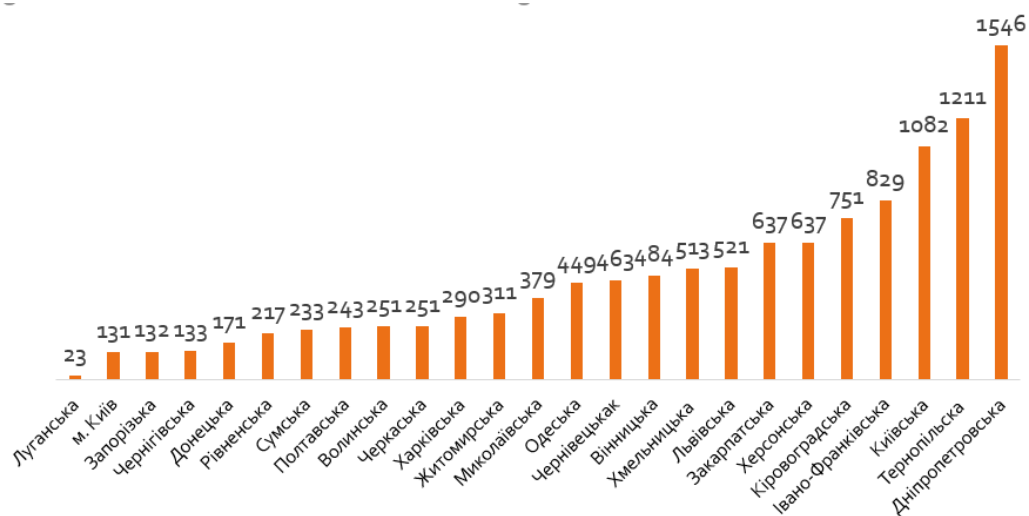


Рисунок 1.6. Кількість сонячних установок домогосподарств

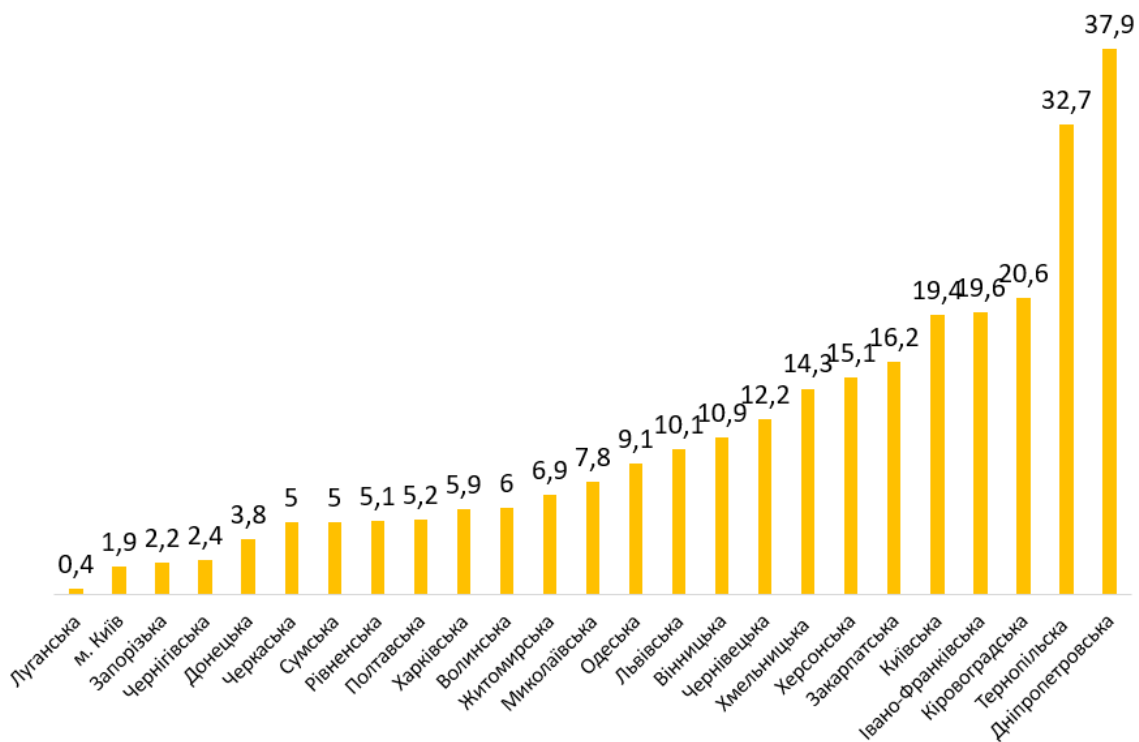


Рисунок 1.7. Потужність сонячних установок домогосподарств

Всього СЕС, яким встановлено зелений тариф: 365 шт.

Встановлена потужність: 2640 МВт

Виробіток енергії з 01.2020 до 07.2020: 382,6 млн кВт*год.

1.3 Ціни на ринку СЕС

Ціна на сонячні панелі в Україні щороку зменшується. Якщо у 2014 році 10-ти кіловатна домашня сонячна станція обходилася до \$18 000, то зараз аналогічна станція коштуватиме в 2 рази дешевше (рис. 1.9).



Рисунок 1.9. Динаміка вартості сонячних панелей в Україні, \$/Вт

Причини зниження цін на сонячні панелі в Україні:

- знизилася вартість панелей у Китаї;
- покращилася логістика постачання в Україну;
- скасовано ПДВ на імпорт панелей в Україну;
- зменшилася маржа компаній-інсталяторів.

Загалом експерти у сфері технологій відновлюваної енергетики вважають, що в найближчі 5 років вартість фотоелементу знизиться в 2-3 рази. Але вартість панелі у відомому нам вигляді впаде на 40...50%. Головним чином завдяки зниженню витрат в процесах виробництва кремнієвих кристалічних пластин, збільшенню ККД фотокомірок до 24%, використанню графена.

Також вагомо, що через велику конкуренцію, інсталятори сонячних станцій значно знизили свою маржу на сонячні панелі. Деякі компанії, при замовленні сонячної станції “під ключ”, продають панелі з мінімальною

націнкою, при цьому заробляють саме на монтажних роботах та на комплектуючих. Вартість сонячних електростанцій вказано в табл.1.1.

Таблиця 1.1 - Вартість сонячних електростанцій, євро/кВт

	2015	2020	2030	2050
Наземні електростанції	1300	750	700	475
Дахові електростанції	1700	800	750	510

1.4 Оператори на ринку

Низка сильних гравців сформувалася навколо будівництва і введення в експлуатацію СЕС. Вони є основними операторами комплексних (генпідрядних) послуг. До таких гравців часто застосовується термін ЕРС-контрактор (Engineering, procurement and construction). Це компанія, яка реалізує «від А до Я» будівництво електростанцій.

Станом на середину 2020 року до найбільших генеральних підрядників відносяться: KNESS, Helios Strategia, ТР-інжиніринг, СоларТек, Rener, Рентехно, Родина, ДТЕК, Технобуд [1](рис.1.10).

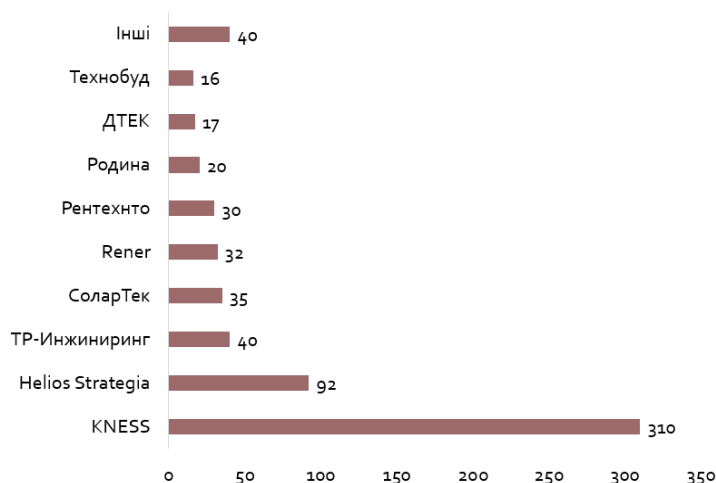


Рисунок 1.10. Будівельники сонячних електростанцій в Україні, МВт (1 півріччя 2020 р.)

1.5 Державне регулювання ринку

Основними інструментами стимулювання розвитку відновлюваної енергетики в Україні є:

- встановлення «зеленого» тарифу на електричну енергію, вироблену з альтернативних джерел (для цього підприємству або ДГ потрібно отримати ліцензію, вартість якої відповідає мінімальній заробітній платі на день прийняття рішення про її видачу);
- надання митних та податкових пільг тощо.

Ставки зеленого тарифу для сонячних електростанцій приведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2 - Ставки зеленого тарифу для сонячних електростанцій, євроцентр/1кВт

Рік	Ставка для приватних сонячних електростанцій потужністю до 30 кВт	Ставка для промислових сонячних електростанцій
1	2	3
2017-2019	18	15
2020-2024	16,3	13,5
2025-2030	14,5	12

Розмір надбавок до зеленого тарифу, за використання обладнання українського виробництва приведені в табл.1.3

Таблиця 1.3 - Державне регулювання: надбавка за українське обладнання

Розмір надбавки до зеленого тарифу, %	Рівень використання обладнання українського виробництва, %
1	2
5	30
10	50

1.6 Сонячна інсоляція в Україні

Оскільки в Україні сонячна енергія - досить популярне ВДЕ, можна спостерігати, що регіональний розподіл встановлених об'єктів ВДЕ корелює з рівнем інсоляції. Основна увага приділяється регіонах з високою сонячною активністю, як показано на карті (рис.1.11).

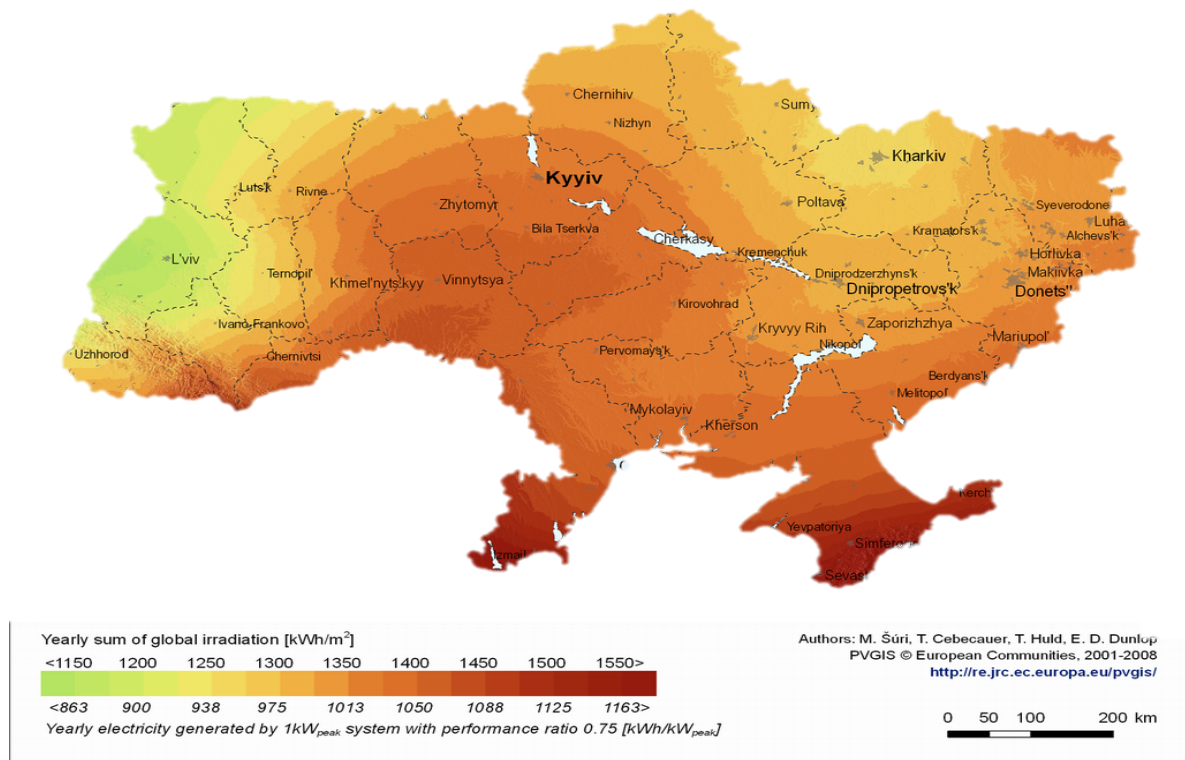


Рисунок 1.11. Регіональні показники сонячної інсоляції кВт·год/м²/день

Ознайомившись з картою, ви можете дізнатися, скільки сонячної енергії припадає на поверхню землі у вашій місцевості. Чим південніше регіон України, тим доцільніше користуватися сонячною електростанцією для отримання електрики і сонячними геліоколекторами для нагріву гарячої води.

На карті видно, що на території України інсоляція нерівномірна і її значення коливаються в межах від 1150 до 1550 кВт*год/м кв. на рік. Столиця

України перебуває «посередині» і відхилення по країні складають не більше 10 % в більшу і меншу сторони.

Загалом, на південні регіони – Одеська, Миколаївська, Херсонська, Кіровоградська, Запорізька та Дніпропетровська області припадає 30,3% від всього доцільно-економічного потенціалу сонячної енергії в Україні. Детальніше можна подивитись в табл.1.4 [2].

Таблиця 1.4 – **Інтенсивність сонячного випромінювання**

Регіони/ Місяці	Січ.	Лют.	Бер.	Кв.	Тр.	Чер.	Лип.	Сер.	Вер.	Жов.	Лис.	Гр.	Серед. показ.
Вінниця	1,07	1,89	2,94	3,92	5,19	5,3	5,16	4,68	3,21	1,97	1,10	0,9	3,11
Луцьк	1,02	1,77	2,83	3,91	5,05	5,08	4,94	4,55	3,01	1,83	1,05	0,79	2,99
Дніпро	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,70	5,08	3,66	2,27	1,20	0,96	3,36
Донецьк	1,21	1,99	2,94	4,04	5,48	5,55	5,66	5,09	3,67	2,24	1,23	0,96	3,34
Житомир	1,01	1,82	2,87	3,88	5,16	5,19	5,04	4,66	3,06	1,87	1,04	0,83	3,04
Ужгород	1,13	1,91	3,01	4,03	5,01	5,31	5,25	4,82	3,33	2,02	1,19	0,88	3,16
Запоріжжя	1,21	2,00	2,91	4,20	5,62	5,72	5,88	5,18	3,87	2,44	1,25	0,95	3,44
Івано- Франківськ	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	2,94
Київ	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86	3,10
Кропивни- цький	1,20	1,95	2,96	4,07	5,47	5,49	5,57	4,92	3,57	2,24	1,14	0,96	3,30
Луганськ	1,23	2,06	3,05	4,05	5,46	5,57	5,65	4,99	3,62	2,23	1,26	0,93	3,34
Львів	1,08	1,83	2,82	3,78	4,67	4,83	4,83	4,45	3,00	1,85	1,06	0,83	2,92
Миколаїв	1,25	2,10	3,07	4,38	5,65	5,85	6,03	5,34	3,93	2,52	1,36	1,04	3,55
Одеса	1,25	2,11	3,08	4,38	5,65	5,85	6,04	5,33	3,93	2,52	1,36	1,04	3,55
Полтава	1,18	1,96	3,05	4,00	5,40	5,44	5,51	4,87	3,42	2,11	1,15	0,91	3,25
Рівне	1,01	1,81	2,83	3,87	5,08	5,17	4,98	4,58	3,02	1,87	1,04	0,81	3,01
Суми	1,13	1,93	3,05	3,98	5,27	5,32	5,38	4,67	3,19	1,98	1,10	0,86	3,16
Тернопіль	1,09	1,86	2,85	3,85	4,84	5,00	4,93	4,51	3,08	1,91	1,09	0,85	2,99
Харків	1,19	2,02	3,05	3,92	5,38	5,46	5,56	4,88	3,49	2,10	1,19	0,9	3,26
Херсон	1,30	2,13	3,08	4,36	5,68	5,76	6,00	5,29	4,00	2,57	1,36	1,04	3,55
Хмельниць- кий	1,09	1,86	2,87	3,85	5,08	5,21	5,04	4,58	3,14	1,98	1,10	0,87	3,06
Черкаси	1,15	1,91	2,94	3,99	5,44	5,46	5,54	4,87	3,40	2,13	1,09	0,91	3,24
Чернігів	0,99	1,80	2,92	3,96	5,17	5,19	5,12	4,54	3,00	1,86	0,98	0,75	3,03
Чернівці	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	2,94

1.7 Потенціал сонячної енергетики в Україні

Згідно з даними Держенергоефективності, теоретично-можливий потенціал енергії сонця на території України складає більше 730 млрд кВт·год на рік, а технічно-можливий складає лише 34,2 млрд кВт·год на рік. Однією з

головних перешкод для інтенсивного розвитку відновлюваної електроенергетики є погано розвинена мережа і її застаріла централізована концепція.

За оцінками експертів компанії Rentechno48, за сьогоdnішнього розвитку технологій ВДЕ в Україні здатні покрити до 80% попиту на електроенергію. Використання сонячних панелей на дахах серед приватних домогосподарств до 2050 року може досягти 40-50%. Крім того, використання сонячних колекторів для нагріву води ставатиме дедалі більш економічно вигідним. Ці технології дозволять забезпечити попит на гарячу воду в приватних домогосподарствах на 70-100%впродовж літа та на 15% взимку. У сфері послуг потенціал використання сонячної енергії є меншим, однак є також перспективним.

Зростання потенціалу сонячної енергетики та зниження вартості обладнання в Україні показують досліджень Майкла Чайлда, та консультацій із вітчизняними експертами.

1.8 Аналіз досліджень

Інтеграція СЕС в існуючі системи електропостачання поряд з широким застосуванням пристроїв силової електроніки змінює характер енергообмінних та перехідних процесів, що призводить до зміни балансу електричної енергії, виникнення потужностей спотворення та пульсацій, зміни рівнів напруги та погіршення якості електричної енергії.

Необхідно приймати до уваги той факт, що силові інвертори, через які приєднуються СЕС, чутливі до рівнів напруги і при неналежному підключенні в залежності від конфігурації мережі, її хвильових властивостей, складу та стану застосовуваного обладнання це може привести до порушення стійкості паралельної роботи діючої системи електропостачання та СЕС. Значний вплив на характер паралельної роботи має потужність взаємодіючих систем.

В Україні для перетворення електричної енергії, виробленої СЕС, застосовуються енергоефективні інвертори провідних світових виробників.

Зокрема, на досліджуваній СЕС, приєднаній до шин 10 кВ підстанції встановлені інвертори виробника Huawei, технічні характеристики див. табл.-1.5.

SUN2000 є трифазний фотоелектричний мережевий інвертор, який перетворює енергію постійного струму, що генерується фотоелектричними ланцюгами, в енергію змінного струму і подає енергію в електричну мережу.

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики серії інверторів Huawei

Technical Specifications	SUN2000-60KTL-HV-D1-001
Efficiency	
Max. Efficiency	99.0%
European Efficiency	98.8%
Input	
Max. Input Voltage	1,500 V
Max. Current per MPPT	22 A
Max. Short Circuit Current per MPPT	30 A
Start Voltage	650 V
MPPT Operating Voltage Range	600 V ~ 1,450 V
Rated Input Voltage	1,080 V
Number of Inputs	8
Number of MPP Trackers	4
Output	
Rated AC Active Power	60,000 W
Max. AC Apparent Power	66,000 VA
Max. AC Active Power ($\cos\phi=1$)	66,000 W
Rated Output Voltage	800 V, 3W + PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
Rated Output Current	43.3 A
Max. Output Current	48 A
Adjustable Power Factor Range	0.8 LG ... 0.8 LD
Max. Total Harmonic Distortion	< 3%
Protection	
Input-side Disconnection Device	Yes
Anti-islanding Protection	Yes
AC Overcurrent Protection	Yes
DC Reverse-polarity Protection	Yes
PV-array String Fault Monitoring	Yes
DC Surge Arrester	Type II
AC Surge Arrester	Type II
DC Insulation Resistance Detection	Yes
Residual Current Monitoring Unit	Yes
Communication	
Display	LED Indicators, Bluetooth + APP
RS485	Yes
USB	Yes
Power Line Communication (PLC)	Yes
General	
Dimensions (W x H x D)	930 x 600 x 270 mm (36.6 x 23.6 x 10.6 inch)
Weight (with mounting plate)	62 kg (136.7 lb.)
Operating Temperature Range	-25°C ~ 60°C (-13°F ~ 140°F)
Cooling Method	Natural Convection
Max. Operating Altitude	4,000 m (13,123 ft.)
Relative Humidity	0 ~ 100%
DC Connector	Amphenol UTK
AC Connector	Waterproof PG Terminal + OT Connector
Protection Degree	IP65
Topology	Transformerless
Standard Compliance <i>(more available upon request)</i>	
Certificate	EN 62109-1/-2, IEC 62109-1/-2, EN 50530, IEC 62116, IEC 60068, IEC 61683
Grid Code	IEC 61727, G59/3, PEA, Resolution No. 07

В роботі розглянуто СЕС двох типів:

- мережеві, які є більш потужними, вони підключаються до зовнішньої електричної мережі, більшість виробляємої ними електричної енергії передається в мережу через окремий лічильник, величина навантаження власного споживання незначна;

- автономні, які призначені в першу чергу покривати потреби навантаження власного споживання, тому вони розраховуються на меншу потужність (що визначається переліком власних електроприймачів), вони також підключаються до зовнішньої електричної мережі і лише надлишки електричної енергії передаються в мережу через окремий лічильник.

Фотоелектрична система, підключена до мережі, економічно вигідніше, оскільки не вимагає використання батарей для накопичення електричної енергії. У таких системах застосовують алгоритм пошуку точки відбору максимальної потужності, що підвищує ефективність системи. Для формування вихідної змінної напруги в якості узгоджувальних пристроїв велику популярність отримали багаторівневі мережеві інвертори напруги.

Багаторівневі інвертори напруги при роботі в сонячних електростанціях мають дві основні задачі: формування синусоїдального струму і напруги на свій вихід для віддачі в мережу, зменшення рівня гармонік.

Недоліком автономних СЕС є необхідність використання акумуляторних батарей, що працюють в циклічному режимі. Число робочих циклів поширених кислотно-свинцевих акумуляторів невелике (1500-2000), що вимагає їх приватної заміни. Застосування промислових акумуляторів з великим терміном служби, наприклад, нікель-кадмієвих або літій-іонних, вимагає значного збільшення фінансових вкладень на будівництво СЕС. Крім того, необхідно враховувати, що в акумуляторах ефективність процесів заряду-розряду становить 90% з подальшим зниженням у міру експлуатації.

1.9 Постановка задачі

Для дослідження режимів роботи сонячної електростанції в децентралізованих мережах електропостачання та дослідження впливу СЕС на роботу електроенергетичних систем слід вирішити наступні завдання:

- Створення комп'ютерної моделі в програмних комплексі (ПК) MatLab спільно з Simulink для дослідження режимів роботи мережі.
- Дослідити аналіз впливу СЕС на показники якості електроенергії / надійність функціонування системи.

2 АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СЕС. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РОБОТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ

2.1 Аналіз та дослідження електромагнітних перехідних процесів при паралельній роботі сонячної електростанції з енергосистемою

Як уже було зазначено, що в даний час зростає вплив відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) на розвиток електроенергетики. Застосування фотоелектричних модулів (ФЕМ) в процесі перетворення сонячної енергії в електричну відкриває новий етап у розвитку сонячних електростанцій (СЕС).

Використання СЕС при паралельній роботі з енергосистемою (ЕС) дозволяє підвищити надійність в електропостачанні споживачів.

ЕС може приймати вироблювану СЕС потужність і компенсувати її роботу при відсутності сонячного випромінювання.

Важливим компонентом на СЕС є перетворювач, який має в своєму складі підвищуючий перетворювач напруги (DC / DC-перетворювач) від 200 до 700 В, трифазний інвертор, виконаний на основі IGBT-модулів за трифазною мостовою схемою, пропорційно-інтегральні регулятори струму і напруги (ПІ). Час відкриття і закриття IGBT-модулів становить кілька мілісекунд, що дозволяє ефективно використовувати принцип широтно-імпульсної модуляції для отримання синусоїдальних напруг на виході інвертора.

У складі перетворювача трифазні інвертори виконують такі основні завдання:

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

Комутація тиристорів і транзисторів спотворює форму кривих струмів і напруг в примикає мережі змінного струму, що призводить до появи вищих гармонік в мережі.

Якість електричної енергії (ЯЕ) характеризується показниками, що визначають ступінь відповідності напруги і частоти їх нормованим значенням. На сьогоднішній день в Україні вимоги до якості електричної енергії в точках, до яких приєднуються електроприймачі в мережах загального призначення змінного трифазного струму з частотою 50 Гц, встановлюють два діючі стандарти:

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

Положення зазначених стандартів є обов'язковими для виконання і це потребує оцінки впливу сонячної електростанції на такі показники якості електричної енергії (ПЯЕ) в електричній мережі: коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги K_U ; коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$.

Значення коефіцієнту n -ої гармонійної складової напруги у відсотках визначається за виразом:

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

де $U_{ном}$ – номінальна напруга електричної мережі.

Збільшення гармонік при роботі сонячної електростанції в мережі призводить до збільшення значень і коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги, і коефіцієнтів n -ої гармонійної складової напруги. Отже ці ПЯЕ

в мережі з сонячними електростанціями слід контролювати та за необхідності вживати заходи до нормалізації якості електроенергії в такій мережі.

Підключення сонячної електростанції до електричної мережі буде впливати на стійкість роботи ЕЕС, в яку дана електростанція видає потужність. Запас статичної стійкості для режиму роботи енергосистем визначається його близькістю до границі області стійкості, яка може бути обумовлена аперіодичним або коливальним порушенням стійкості. Запас статичної стійкості характеризується коефіцієнтами запасу по активній потужності в перетинах енергосистеми і за напругою у вузлах навантаження. Значення коефіцієнта запасу за активною потужністю в перетині визначається за формулою:

$$K_p = \frac{P_{np} - P - \Delta P}{P}, \quad (2.2)$$

де P_{np} – активна потужність, яка передається з розглядуваного перерізу (перетік в перетині) в граничному по стійкості режимі;

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

ΔP – амплітуда нерегулярних коливань активної потужності в перетині в розглянутому режимі. Допускається, що внаслідок нерегулярних коливань перетік P змінюється в діапазоні $P \pm \Delta P$.

Для визначення коефіцієнта запасу статичної стійкості за активною потужністю в перетині схеми виконуються обтяження режиму шляхом збільшення перетоку потужності в перетині до отримання граничного по стійкості режиму.

Значення коефіцієнта запасу за напругою у вузлах навантаження визначаються за формулою:

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

де U – напруга у вузлі в розглянутому режимі;

$U_{кр}$ – критична напруга в цьому ж вузлі, яка відповідає межі, нижче якої має місце порушення статичної стійкості двигунів.

Для контролю дотримання нормативних запасів по напрузі в експлуатаційній практиці можна використовувати напругу в будь-яких вузлах енергосистеми.

За умовами статичної стійкості енергосистем нормують мінімальні коефіцієнти запасу за активною потужністю в перетинах і мінімальні коефіцієнти запасу за напругою у вузлах навантаження, значення яких показано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – **Мінімальні значення коефіцієнтів запасу статичної стійкості**

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

Для аналізу статичної стійкості при підключенні сонячної електростанції до ЕЕС розглянемо схему, представлену на рис. 2.1. В якості перетину виступає лінія електропередачі (ЛЕП).

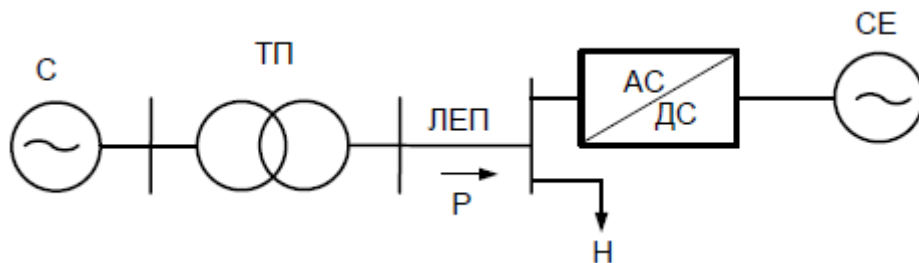


Рисунок 2.1 – Схема підключення сонячної електростанції до ЕЕС

При підключенні сонячної електростанції до ЕЕС потужність, що передається по ЛЕП з надлишкової частини ЕЕС до дефіцитної, зменшується за рахунок покриття навантаження власних споживачів електростанції. Це призводить до збільшення значення коефіцієнта запасу статичної стійкості за активною потужністю в перетині. Стосовно загального балансу активної потужності в ЕЕС, слід відмітити збільшення потужності генеруючих джерел, що також сприяє збільшенню обертаючого резерву та підвищенню запасу статичної стійкості [2].

Аналіз процесів, що відбуваються між СЕС та ЕС починає проводитися на основі аналізу ЕМПП на інверторі.

Система управління інвертором складається з наступних компонентів:

- алгоритм синхронізації з мережею;
- ПІ - регулятори струму;
- ПІ - регулятори напруги;
- система управління точкою максимальної потужності СЕС (Maximum Power Point Tracking System (MPPT)).

Математична модель інвертора будується на підставі фізичних процесів, що протікають в інверторі, яка описується наступними рівняннями [3];

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

де L_a, L_b, L_c ,- індуктивності вихідного фільтра інвертора (Гн);

i_a, i_b, i_c - лінійні струми трифазного системи (А);

R_a, R_b, R_c - активні опори вихідного фільтра (Ом);

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

C_{imk} - ємність конденсатора ланки постійного струму (мкФ);

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

i_{Clink} - струм на конденсаторі ланки постійного струму (А);

i_{cc} - струм на вході автономного інвертора (А).

Лінійні струми і напруги виражаються системою рівнянь (2.5):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{ca} = E_m \cos \omega t \\ U_{cb} = E_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ U_{cc} = E_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_a = I_m \cos(\omega t + \phi) \\ i_b = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \\ i_c = I_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{array} \right. , \quad (2.5)$$

де E_m - амплітуда фазної напруги (В);

I_m - амплітуда фазного струму (А);

ω - кутова частота (рад / сек);

ϕ - фазовий зсув (градус), при цьому в трифазній системі струмів.

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

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

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

Математична модель інвертора в двофазній системі координат.

В симетричній двофазній системі осі обмоток взаємно перпендикулярні, що дає можливість не враховувати взаємоіндуктивний зв'язок між ними і дозволяє зменшити число рівнянь що описують перехідні процеси.

Перехідні процеси в трифазних мережах, при яких зберігається симетрія фаз доцільно досліджувати в двофазній обертовій системі координат d-q [4].

Просторове уявлення перетворення координат пояснюється на рис. 2.2; Перехід до системи координат d-q проводиться таким чином:

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

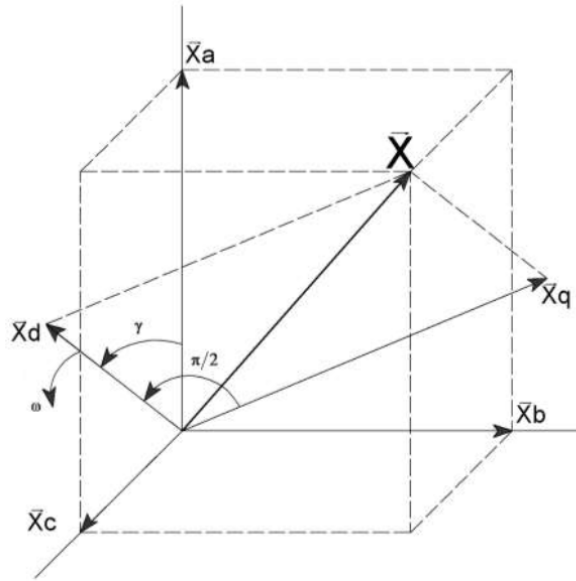


Рисунок 2.2 - Геометрична інтерпретація перетворення координат:

$X_a \rightarrow$, $X_b \rightarrow$, $X_c \rightarrow$ - вектори, що зображують фазні струми, напругу і потокозчеплення в трифазній системі;

X - результуючий вектор;

$X_d \rightarrow$, $X_q \rightarrow$ - вектори, що зображують фазні струми, напругу і потокозчеплення в двофазній обертовій системі координат d-q;

γ - кут зсуву осей щодо магнітної осі фази;

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

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

(2.9)

де $f_0 = \frac{1}{3}(f_a + f_b + f_c)$ - вектор нульової складової.

Рівність (2.4) і (2.5) встановлюють пряму і зворотний зв'язок між дійсними струмами, напругами і потокозчеплення в трифазній системі і новими змінними в осях d-q.

Система диференціальних рівнянь в двофазній обертається системі координат, при загальноприйнятих припущеннях, використовуючи формулу Парка-Горева [6] має вигляд:

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

де

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} U_{ca} \\ U_{cb} \\ U_{cc} \end{bmatrix} \end{cases}. \quad (2.11)$$

2.2 Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЕС

У мережах, де активно встановлюються та експлуатуються СЕС, має місце погіршення показників якості електричної енергії. Це понад нормоване

відхилення напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ, та такого показника якості електричної енергії, як коефіцієнт спотворення синусоїди напруги K_u (рис.2.3).

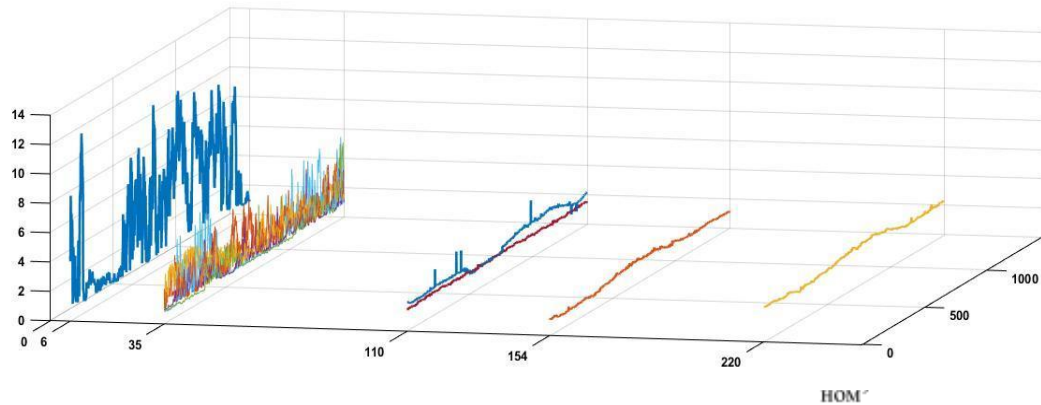


Рисунок. 2.3 - Регістрограми коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги в первинній мережі підстанцій

2.2.1 Аналіз особливостей існуючих контролерів інверторів СЕС

Технологічна схема СЕС показана на рис. 2.4. Основними елементами СЕС є сонячні панелі, інвертор, збірна трансформаторна підстанція та розподільний пункт.



Рисунок 2.4 - Технологічна схема СЕС

Важливим пристроєм СЕС є інвертор, основне призначення якого – перетворення постійної напруги в змінну трифазну напругу, відслідковування точки максимальної генерації (maximum power tracking point – MPPT), автоматичної синхронізації напруги інвертора з напругою мережі (phase-locked loop-PLL) та інші.

В інверторах на СЕС реалізуються різні закони керування, серед яких такі, як:

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



Рисунок 2.5 - Класифікація законів керування інверторами СЕС

Кожен з інверторів СЕС має свої переваги та недоліки.

Відомо, що якість електричної енергії в ЕС залежить від параметрів, стану, режиму РДЕ взагалі і СЕС, як одного з видів РДЕ. Водночас на показники якості електричної енергії значний вплив мають інвертори цих станцій і контролери. В експлуатації знаходяться СЕС, багатьох виробників у яких реалізуються різні закони керування їх інверторами. Тому актуальною є задача дослідження впливу конструктивних особливостей та законів керування інверторами СЕС на показники якості електричної енергії в ЕС [5].

2.2.2 Особливості пропорційно-інтегрального контролера інверторів СЕС

В пропорційно-інтегральному (PI) контролері інверторів СЕС зазвичай реалізовується перетворення напруг і струмів з abc системи координат в dq систему координат. Передатна функція системи керування інвертором, яка працює за PI законом керування, визначається за виразом (2.12):

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

де K_p , K_i – пропорційний та інтегральний коефіцієнти підсилення контролера;

S – оператор Лапласа.

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

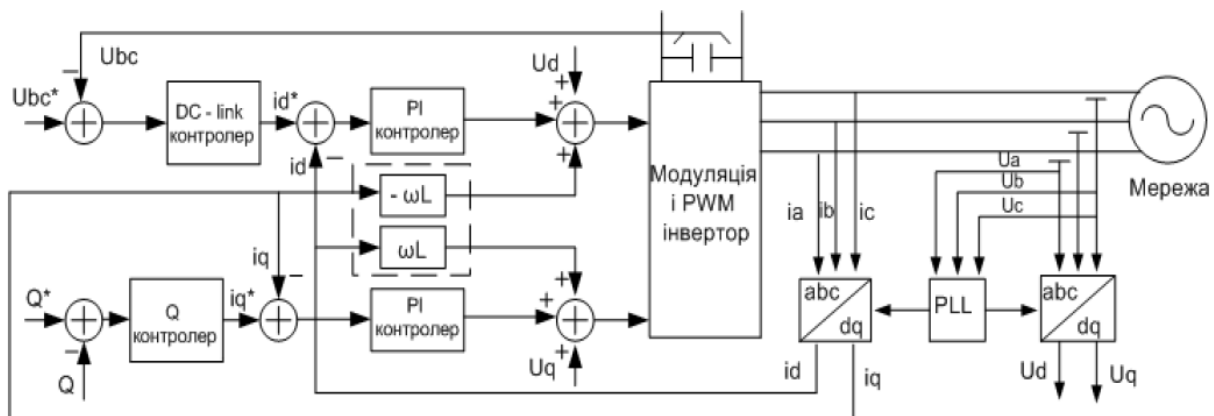


Рисунок 2.6 - Структурна схема керування інвертором СЕС з використанням PI контролера

З метою покращення характеристик СЕС програмне забезпечення контролера, який керує інвертором СЕС вдосконалюється. Так, зокрема

передатна функція (в abc координатах) системи керування інвертором СЕС, в якій застосовується РІ закон керування, знаходиться за виразом (2.13):

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

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

S – оператор Лапласа;

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

f – частота.

На рис. 2.6 показана структурна схема керування інвертором СЕС з РІ контролером, в якому (з використанням перетворення Парка-Горєва) реалізоване перетворення сигналів струмів і напруг з трифазної abc системи координат в обертову dq систему координат. Контролер інвертора СЕС здійснює узгоджене з напругою ЕС на шинах СЕС керування інвертором, таким чином, що увімкнення СЕС стає неможливим за відсутності напруги на шинах. В схемі керування інвертором струмові сигнали після їх перетворення з abc системи координат в dq систему координат, надходять на блоки, які працюють за РІ законами керування.

Далі перетворені сигнали подаються на входи PWM (pulse width modulation) – широтно-імпульсного модулятора. На виході PWM отримуємо трифазну напругу. Також в схемі (рис. 2.6) використовується пристрій PLL (Phase-Locked Loop) автоматичного фазового підстроювання, за допомогою якого інвертор СЕС синхронізується з напругою в мережі.

Перевага РІ контролера полягає в простоті його реалізації та в найменшому гармонійному спотворенню сигналу на його виході в нормальних режимах роботи ЛЕС.

Недоліком РІ контролера є те, що він є керованим напругою ЕС на шинах СЕС. Отже, якщо в мережі є спотворення синусоїди напруги або струму (наприклад, під час увімкнення та вимкнення інших РДЕ, або потужних навантажень і т.п.), то і на виході інвертора мають місце спотворення синусоїд напруг та струмів фаз [5].

2.2.3 Особливості пропорційно-резонансного контролера інвертора СЕС

Пропорційно-резонансні (PR) контролери інверторів СЕС стали більш поширені у минулому десятилітті, що пов'язано з тим, що в них використовуються фільтри гармонійних складових. Ці контролери реагують на резонансну частоту фільтра ω та усувають сталу похибку при регулюванні синусоїдального сигналу. Вони мають простий гармонійний компенсатор гармонік низького порядку, який не впливає на динамічні характеристики PR контролерів СЕС, які використовується в ЛЕС, що приєднані до ЕЕС (рис. 2.7).

Передатна функція PR контролера GPR визначається за виразом (2.14):

$$G_{PR}(s) = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + \omega^2}, \quad (2.14)$$

де K_p , K_i – пропорційний та інтегральний коефіцієнти підсилення контролера;

S – оператор Лапласа;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – резонансна частота.

Передатна функція фільтра низьких частот GNC знаходиться за виразом (2.15):

$$G_{HC}(s) = \sum_{h=3,5,7} K_i \frac{s}{s^2 + (\omega^2 h)} \quad (2.15)$$

де h – порядковий номер гармоніки.

На рис. 2.7 показана структурна схема керування інвертором СЕС з PR контролером.

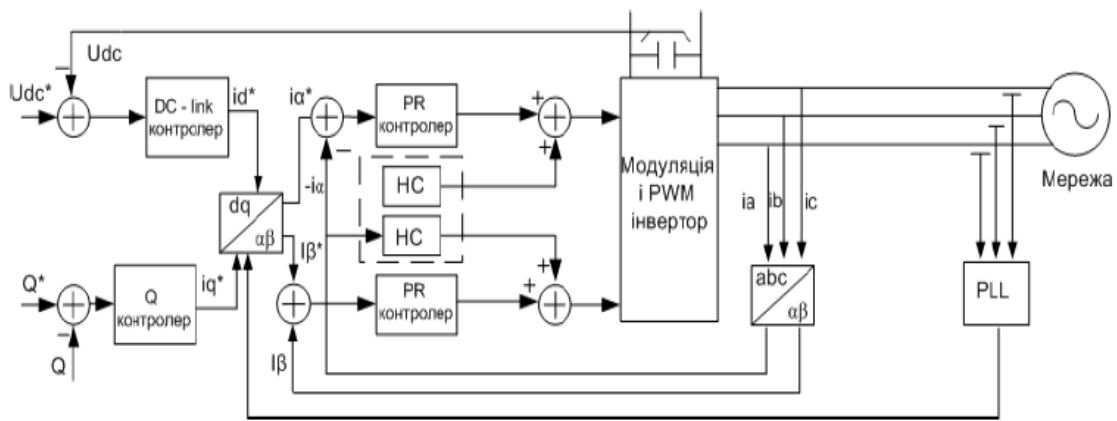


Рисунок 2.7 - Структурна схема керування інвертором СЕС з використанням PR контролера

На відміну від рис. 2.6, на рис. 2.7 використовується блок перетворення струмів з abc трифазної системи координат в $\alpha\beta$ стаціонарну систему координат. Блок PLL (рис. 2.7) дозволяє, використовуючи напруги фаз в трифазній системі координат, знайти кут зсуву на який необхідно скорегувати сигнал на виході інвертора відповідно до опорного сигналу (напруги на ЛЕС на шинах СЕС). У блоці перетворення dq / $\alpha\beta$ струми в dq системі координат перетворюються в струми в $\alpha\beta$ системі координат. Порівняно зі схемою на рис.2.6 в структурній схемі рис.2.7 додатково використовуються блоки HC (harmonic compensator) компенсаторів гармонік, які виконують функції зменшення впливу 3, 5, 7-ї гармонік в напругах на виході інвертора СЕС.

Недоліком PR контролера інвертора СЕС є потреба в складній системі синхронізації інвертора з мережею. Закон керування цього контролера не усуває

вплив гармонік високого порядку (вище 11 гармоніки) на напругу на виході інвертора СЕС.

Передатна функція системи керування інвертором СЕС в якій використовується PR контролер (в abc системі координат) знаходиться за виразом (2.16):

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

2.2.4 Особливості прогнозуючого (DB) контролера інвертора СЕС

Однією з властивостей прогнозуючого DB (deadbeat) контролера інвертора СЕС є те, що в його програмному забезпеченні, для прогнозування сигналу на виході контролера, застосовується математичний апарат нечіткої логіки. Для пояснення передатної функції системи керування інвертором СЕС в якій використовується прогнозуючий контролер на рис. 2.8 показана однолінійна схема з DB контролером.

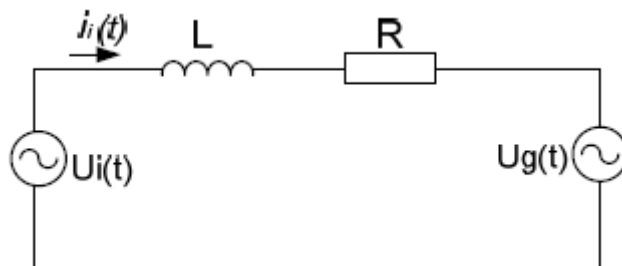


Рисунок 2.8 - Однолінійна схема СЕС з DB контролером

На рис. 2.8 показані: індуктивність $L = L_i + L_g$ та активний опір $R = R_i + R_g$, де R_i , L_i – індуктивний та активний опір інвертора, L_g , R_g – індуктивний та активний опір мережі).

Струм в електричному колі інвертора визначається за виразом (2.17).

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

де i_i – струм в колі інвертора;

R – загальний активний опір;

L – загальна індуктивність;

U_i – напруга на шинах інвертора;

U_g – напруга в на шинах СЕС.

Після перетворення отримаємо вираз (2.18):

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

де T_s – постійна інерції;

R – загальний активний опір;

L – загальна індуктивність.

Передатна функція DB визначається за виразом (2.19):

$$G^{(abc)}_{DB} = \left(\frac{1}{b}\right) \left(\frac{1 - az^{-1}}{1 - az^{-1}}\right), \quad (2.19)$$

де $a = e^{-(R/L)T_s}$, $b = -\frac{1}{R}(e^{-(R/L)T_s} - 1)$, T_s – постійна інерції.

В цьому контролері використовується LCL фільтр та блок, в якому реалізована спрощена розрахункова модель ЕС та параметрів режиму на шинах СЕС. Це дає можливість контролеру бути чутливим до невідповідності параметрів моделі до параметрів поточного режиму ЕС на шинах СЕС.

Недоліком цього контролера є затримка в часі, що значно погіршує його швидкодію та якість реакції на зміну параметрів режиму в ЛЕС [5].

2.3 Вибір програмного забезпечення для імітаційного моделювання

Для імітаційного моделювання режимів роботи сонячної електростанції у системі децентралізованого електропостачання була обрана програма Matlab з наступних причин. Matlab - це високорівнева мова програмування для здійснення інженерних розрахунків в різних галузях науки і техніки. Matlab включає в себе Simulink - інтерактивний інструмент для імітаційного моделювання та аналізу динамічних (лінійних і нелінійних) систем в безперервному або дискретному масштабі часу. Simulink дає можливість будувати графічні блок-діаграми компонентів і створювати їх бібліотеку, імітувати роботу складних технічних систем, досліджувати працездатність систем і вдосконалювати проекти. Simulink повністю інтегрований з Matlab, забезпечуючи негайним доступом до широкого спектру інструментів аналізу даних і моделювання, а також використовує алгоритмічні бібліотеки Matlab. Ці переваги роблять Simulink зручним інструментом для графічного моделювання динамічних систем в різних галузях науки і техніки.

Matlab / Simulink є популярним інструментом моделювання в інженерному та науковому середовищі і знайшов широке застосування для моделювання складних енергетичних та електротехнічних систем. Він має бібліотеку елементів, що виражають моделі реальних пристроїв енергетики, силових напівпровідникових елементів та електротехнічних систем.

Таким чином, Matlab / Simulink вибирається в якості основного засобу моделювання в цій роботі.

2.4 Моделювання режимів роботи

В підрозділі 1.8 було зазначено, що фотоелектричні системи можуть працювати як окремі самостійні системи, так і спільно з мережею. Тому в даній кваліфікаційній роботі ступеня магістра розроблена імітаційна модель в середовищі Simulink для двох видів СЕС на основі функціональних схем (рис. 2.9) і диференціальних рівнянь, які описують електромагнітні процеси в СЕС.

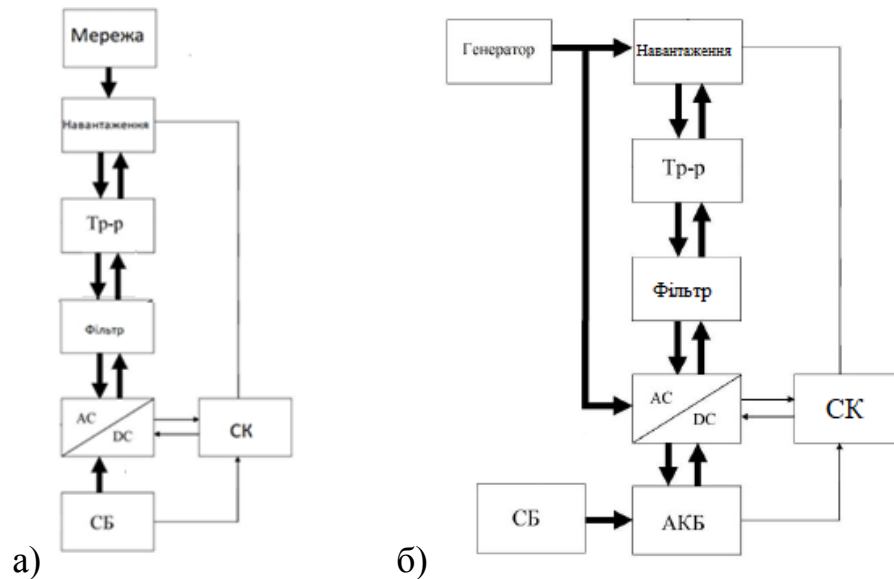


Рисунок 2.9 - Схема досліджуваної енергетичної установки:

а) СЕС спільна з мережею, б) автономна СЕС

де *Тр-р* - силовий трансформатор;

AC / DC - двонаправлений інвертор;

СУ - система керування інвертором;

СБ - сонячна батарея;

АКБ – акумуляторна батарея.

Так як інвертор являється найголовнішим елементом сонячної електростанції, в наступному підрозділі розглянемо процеси, що відбуваються в ньому детальніше.

2.5 Теоретичні відомості про трифазних АІН

Трифазні транзисторні інвертори застосовуються на практиці для створення трифазних мереж змінного струму на об'єктах і для управління електродвигунами змінного струму.

На перший погляд, найпростіший і очевидний варіант побудови трифазного інвертора полягає в використанні трьох однофазних інверторів, керованих із зсувом в 120° . Для реалізації такого інвертора необхідні 6 ключів. Отримувані фазні напруги представляють прямокутні імпульси, зміщені один щодо одного на третину періоду.

Але цей варіант не є ефективним і не застосовується [6]- [7].

З різноманіття схемних рішень трифазних інверторів практичне застосування знаходить лише одна схема - бруківка, представлена на рис.2.10.

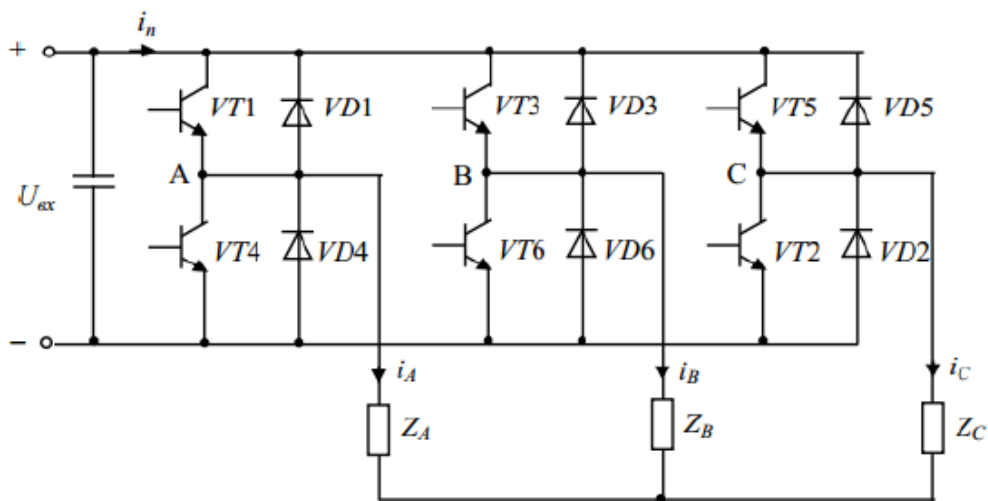


Рисунок 2.10 - Трифазний мостовий інвертор напруги

Тут навантаження з'єднана в зірку і підключена прямо до вихідних затискачів А, В і С інвертора без трансформатора. Навантаження може з'єднуватися і в трикутник, а для узгодження рівнів напруг інвертора і навантаження можуть використовуватися три однофазних або один трифазний трансформатор, як і в звичайних трифазних системах змінного напруги. [9]

Електромагнітні процеси та характеристики інвертора визначаються наступними факторами:

- 1) схемою з'єднання навантаження - в зірку або в трикутник;
- 2) способом управління транзисторами - 180-градусне або 120 градусне управління;
- 3) характером навантаження, який визначається коефіцієнтом:

$$K = \frac{R_n}{\omega} \cdot L_n . \quad (2.20)$$

При 180-градусному управлінні кожен з транзисторів знаходиться в відкритому стані 180 °, пари транзисторів, що утворюють вертикальні стійки, як і в однофазних двотактних схемах, працюють в протифазі, управління вертикальними стійками транзисторів здійснюється із зсувом на 120 °.

Алгоритм управління транзисторами і діаграми напруг в схемі показані на рис.2.11.

Транзистори на схемі пронумеровані відповідно до черговості їх включення. Керуючі імпульси на кожен черговий транзистор подаються через 60 °. В результаті на інтервалі одного періоду вихідної напруги утворюється шість інтервалів I-VI незмінного стану схеми. Наприклад, на інтервалі I відкриті транзистори VT1, VT5 і VT6. Якщо прийняти потенціал негативного затиску джерела живлення за нульовою, то потенціали точок А, В і С для даного інтервалу дорівнюватимуть:

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

Лінійні напруги на інтервалі I:

$$\begin{aligned}
 u_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B = U_{ex}; \\
 u_{BC} &= \varphi_B - \varphi_C = -U_{ex}; \\
 u_{CA} &= \varphi_C - \varphi_A = 0.
 \end{aligned}$$

(2.22)

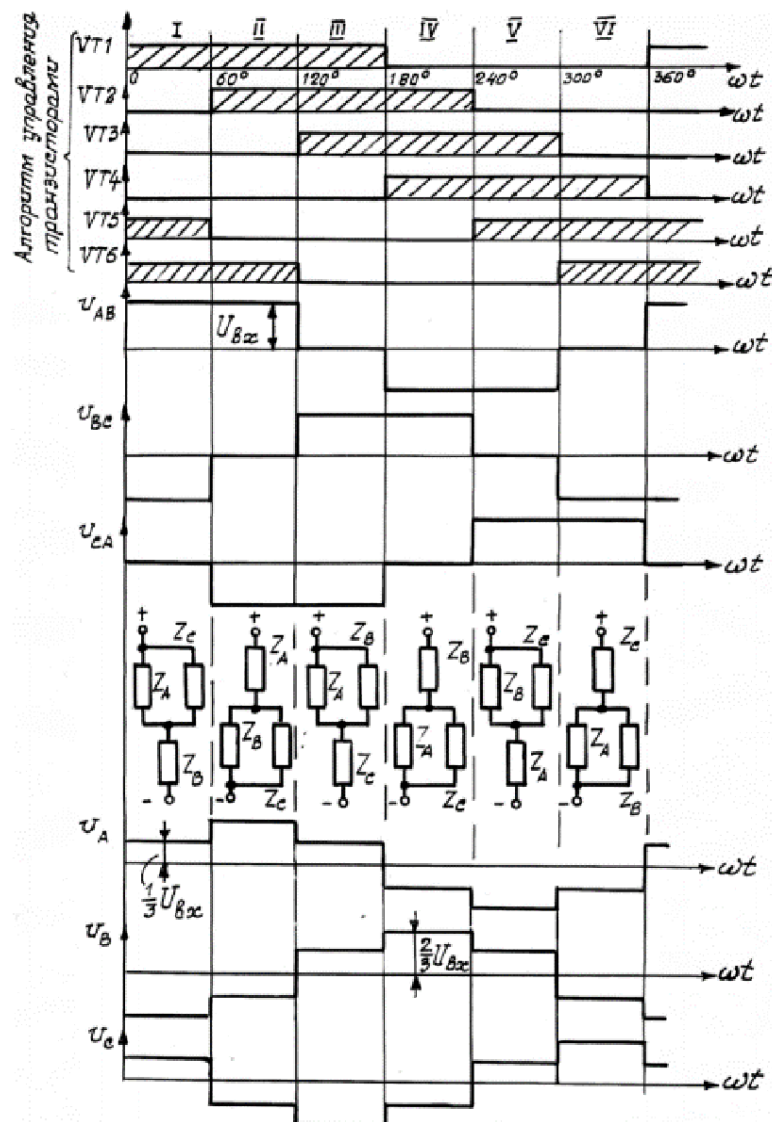


Рисунок 2.11 - Напряга в трифазному мостовому інверторі при 180-градусному управлінні.

Лінійні напруги на інших ділянках формуються аналогічно. В підсумку на виході інвертора з'являються три лінійних напруги (i_{AB} , i_{TT} , i_{ca}) з амплітудою, рівної напрузі U_{vx} , і з паузою на нульовому рівні 60° . Ці напруги взаємно зміщені на 120° . Наявність зазначеної паузи автоматично забезпечує достатньо хорошу якість змінної напруги, так як відсутні третя і кратні їй гармоніки. [8]

Ефективне значення лінійної напруги:

$$U_{L_{\phi}} = \sqrt{\gamma} \cdot U_{\phi} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{\phi} = 0,816 \cdot U_{\phi}. \quad (2.23)$$

Фазні напруги наочно і легко визначаються для симетричній активному навантаження, тобто при $Z_A = Z_B = Z_C = R_H$. Схеми підключення навантажень для кожного з шести інтервалів показані на рис.2.11. На будь-якому інтервалі фазні навантаження підключаються до джерела живлення так, що дві з них включаються паралельно між собою і послідовно з третьою. У зв'язку з цим очевидно, що в умовах рівності опорів навантаження в фазах напруги фаз, навантаження яких включені паралельно, рівні $\pm U_{vx} / 3$, а напруга фази, навантаження якої включена послідовно, так само $\pm 2U_{vx} / 3$. В результаті фазні напруги u_A , u_B , u_C мають двоступеневу форму з амплітудою першої ступені $U_{vx} / 3$ і другого ступеня $2U_{vx} / 3$. Фазні напруги також мають взаємний фазовий зсув в 120° .

Ефективне значення фазної напруги:

$$U_{\phi_{\phi}} = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{\phi}}{3} = 0,471 \cdot U_{\phi}. \quad (2.24)$$

При активному навантаженні криві струмів i_A , i_B , i_C повторюють форму фазних напруг.

При 120-градусному управлінні кожен з транзисторів знаходиться в відкритому стані 120° відповідно до алгоритму управління, показаним на рис.2.12. Якщо при 180-градусному управлінні в будь-який момент одночасно відкриті три ключа, то при 120-градусному - два.

З схем підключення навантажень для кожного інтервалу не змінного стану транзисторів видно, що весь час до джерела підключені послідовно по дві фазні навантаження, а третя знаходиться в відключеному стані. Якщо прийняти опору фаз навантаження однаковими і чисто активними, то вихідні фазні напруги будуть на відповідних інтервалах рівні або $U_{вх} / 2$, або нулю, як показано на рис.2.12.

Ефективне значення фазної напруги:

$$U_{\phi_{\text{эф}}} = \frac{U_{\text{ex}}}{\sqrt{6}} = 0,408 \cdot U_{\text{ex}}. \quad (2.25)$$

Для лінійної напруги, наприклад u_{AB} , можна записати:

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

Рисунок 2.12 - Напруга в трифазному мостовому інверторі при 120-градусному управлінні.

Тоді, прийнявши потенціал загальної точки з'єднання навантажень фаз за нульовою, для інтервалу I отримаємо:

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

Аналогічно для інтервалу II:

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

Для інтервалу III:

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

Лінійна напруга, таким чином, має ступінчасту форму з амплітудою першого ступеня $U_{вх}$ і другий $U_{вх} / 2$.

Ефективне значення лінійної напруги:

$$U_{л\rightarrow\phi} = \frac{U_{ex}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot U_{ex}. \quad (2.30)$$

При активно-індуктивному навантаженні процеси ускладнюються, а форма напруги починає змінюватися. Це є недоліком інвертора при 120-градусному управлінні.

Обчислюючи відносини лінійних і фазних напруг при будь-якому з розглянутих законів управління транзисторами, можна переконатися, що в трифазному інвертор напруги $\frac{U_{л3\phi}}{U_{ф3\phi}} = \sqrt{3}$, як і в звичайних трифазних системах синусоїдальних ЕДС. [9]

Тактність схеми характеризується взаємозв'язком роботи транзисторних ключів. У двотактних схемах завжди можна виділити пари противотактно працюючих ключів (один замикається, інший розмикається). У однотоктних ключі працюють синхронно.

Найбільш важливі характеристики АІН [10] - [11]:

- коефіцієнт перетворення по напрузі K_U (відношення максимально можливого діючого значення основної гармоніки вихідної напруги АІН до середнього напрузі в ланцюзі постійного струму);
- якість вихідної напруги, яке визначається коефіцієнтом гармонік (K_H) для низькочастотної, а також коефіцієнтом компенсаційних гармонік ($K_{Г.К.}$) для високочастотної частини частотного спектра.

2.5.1 Реалізація силового ключа

При реалізації схеми автономного інвертора напруги ключі K повинні мати властивості двосторонньої провідності [12].

У прямому напрямку ключі повинні бути керованими, тобто момент включення ключа повинен визначатися системою управління. Такий ключ може бути реалізований на біполярному або польовому транзисторі, на одноопераційних або двоопераційних тиристорів, на IGBT-транзисторі або на будь-якому іншому приладі, що працює в ключовому режимі і має властивості управління.

Для додання ключу властивості двосторонньої провідності керований вентиль шунтують некерованим діодом, включеним в зустрічному напрямку. Приклади таких ключів наведені на рис.2.13.

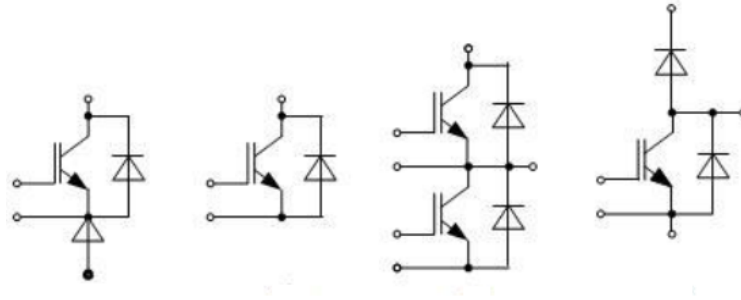


Рисунок 2.13 - Приклади ключів, шунтованих некерованими діодами

Напруга на ключі (ідеальному) дорівнює нулю, якщо вентиль (або зворотний діод), підключений до цього вентиля, проводить струм. Коли транзистор (або його зворотний діод) не проводить струм, то до нього через провідний транзистор (або зворотний діод) цього ж плеча прикладається позитивна напруга джерела живлення E_d . Якщо враховувати, що на транзисторі і зворотному діоді на етапі провідності падає невелика напруга, то на транзисторі на етапі провідності буде деяке позитивне напруга, відмінне від нуля, а до підключеного до нього зворотному діоду на етапі провідності буде негативна напруга, рівне падінню напруги на діоді.

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

Від джерела живлення відбирається струм на етапі провідності транзисторів і струм в джерелі змінює свій напрямок на етапі провідності зворотних діодів. Енергія, накопичена в реактивному елементі навантаження, повертається в джерело живлення. Іншими словами, відбувається енерго обмін (рекуперація електричної енергії) між джерелом і індуктивністю навантаження. Цей енергообмін і забезпечують зворотні діоди.

На вході інвертора повинен стояти елемент, здатний прийняти електричну енергію. При відсутності конденсатора діоди випрямляча не

пропускають струм в зворотному напрямку на етапі рекуперації електричної енергії. [13].

2.5.2 Регулювання вихідної напруги АІН

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

- а) широтно-імпульсне регулювання (ШІР);
- б) метод геометричного підсумовування;
- в) широтно-імпульсна модуляція (ШІМ).

Найбільше застосування на практиці отримали три способи широтно - імпульсного регулювання напруги інверторів:

1. Регулювання по прямокутному закону, коли середнє значення вихідної напруги і ширина імпульсу змінюються по прямокутному ознакою;
2. Регулювання по трапецеїдальному закону - в цьому випадку середнє значення вихідної напруги має вигляд трапеції;
3. Регулювання за синусоїдальним законом, коли ширина імпульсів вихідної напруги регулюється за синусоїдальним законом.

Регулювання кривої вихідної напруги внутрішніми засобами здійснюють, керуючи силовими ключами таким чином, щоб змінювалася ширина імпульсів, формують напругу на навантаженні. Звідси і назва: широтно-імпульсне регулювання.

Якщо передній фронт складових імпульсів зрушувати на кут α в сторону відставання, як показано на рис.2.14 (або задній фронт в сторону випередження, або обидва одночасно), то буде зменшуватися тривалість складових імпульсів λ , а значить, буде змінюватися діюче значення напруги на навантаженні:

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

З отриманого виразу і з тимчасової діаграми виходить, що максимальна напруга відповідає нульовому значенням кута α . Очевидно, що вихідна напруга дорівнює нулю при $\alpha = \pi$. Регульовальна характеристика, побудована за отриманою залежності, має вигляд, показаний на рис.2.15. Цей спосіб регулювання вихідної напруги кращий, так як регулювання напруги на виході силового блоку здійснюють за допомогою системи управління, виключаючи механічні перемикання в схемі силового блоку. Крім того, істотно підвищує динаміка (швидкість) регулювання вихідної напруги інверторів.

Розрізняють два типи широтно-імпульсної модуляції:

1. однополярна ШІМ;
2. двополярного ШІМ.

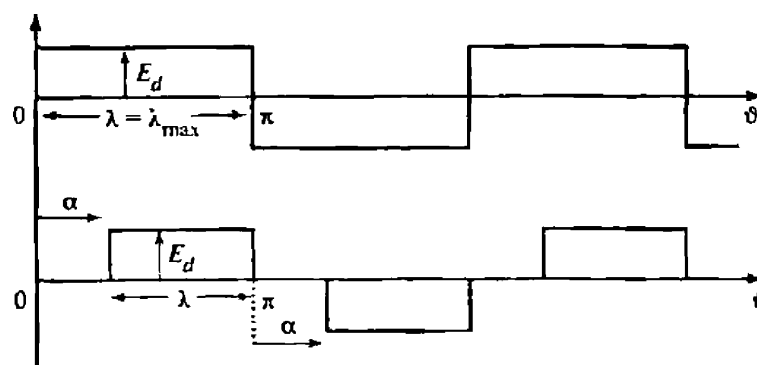


Рисунок 2.14 - Імпульси ШІМ

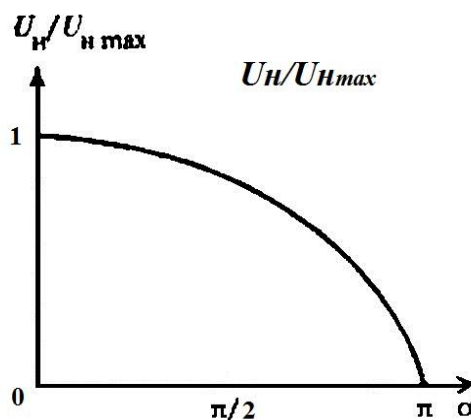


Рисунок 2.15 - Регулювальна характеристика

При однополярній ШІМ вихідна напруга формується з послідовності однополярним імпульсів (рис.2.16, а). Для формування паузи при активно-індуктивному навантаженні схема управління повинна забезпечити протікання струму навантаження через два вентиля, що включають навантаження накоротко до однієї з шин джерела живлення (наприклад, відкрите стан VT1 і VD3).

При двохполярній ШІМ паузи однополярні ШІМ заповнюються імпульсами протилежної полярності (рис.2.16, б).

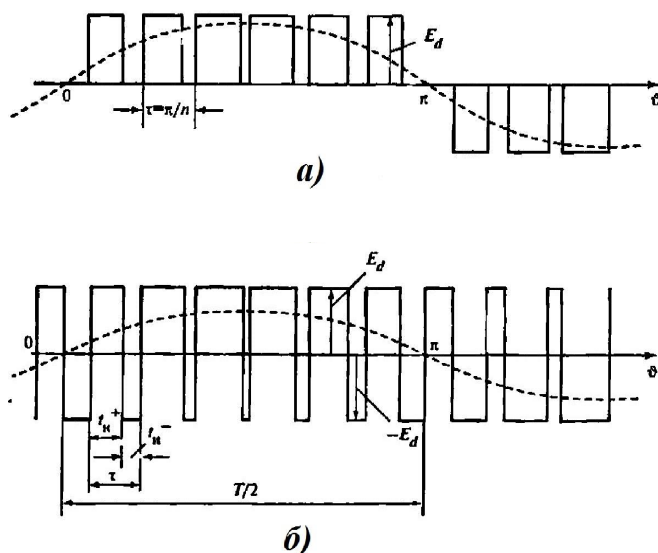


Рисунок 2.16 – ШІМ однополярна(а) та двополярна (б)

При збільшенні частоти високочастотної складової (несучої частоти) в порівнянні з низькочастотної (частоти основної гармоніки), огинає вихідної напруги наближається до синусоїди, відповідно стає легше відфільтрувати високочастотну складову вихідної напруги. [13]

2.5.3 Опис режимів роботи інвертора

В першому розділі було зазначено, що в кваліфікаційній роботі досліджується автономна і мережева СЕС.

Особливістю роботи в автономній системі є наявність двунаправленного автономного інвертора напруги. Цей пристрій призначений для перетворення постійного струму в змінний з протіканням енергії в одному з двох зазначених напрямків відповідно до внутрішнього керуючим сигналом: від ланки постійного струму до ланки змінного струму і навпаки.

Автономний інвертор напруги на стороні змінного струму призначений для роботи в режимі веденого і ведучого інвертора в залежності від керуючого сигналу.

Автономний інвертор напруги застосовується для:

- живлення автономної мережі в режимі ведучого інвертора (в циклічному режимі заряд / розряд);
- живлення автономної мережі в режимі веденого інвертора для стабілізації напруги автономної мережі (при осіданні напруги АІН підкачує потужність в автономну мережу, при перенапруженні споживає потужність з автономної мережі);
- стабілізація напруги при роботі в централізованій мережі;
- забезпечення безперебійним живленням споживачів електричного струму (при наявності мережі працює як стабілізатор, а при відсутності мережі переходить в режим ведучого інвертора).

Автономний інвертор напруги працює в наступних режимах:

- підтримання напруги на навантаженні в режимі веденого;
- підтримання напруги на навантаженні в режимі ведучого;
- підзарядка в режимі веденого (при наявності можливості);
- за допомогою певного блоку керування працює як активний фільтр;

При роботі в **режимі веденого** АІН працює як інвертор, ведений мережею (або іншим джерелом) в циклічному режимі: споживаючи або підкачуючи (рекуперує) потужності на стороні змінного струму. Управління струмом споживання / заряду і рекуперації / розряду здійснюється за

відповідною функції зворотного зв'язку. Основною функцією зворотного зв'язку є підтримка напруги змінного струму в заданому діапазоні: при осіданні напруга АІН підкачує потужність (можливий розряд АКБ), при перевищенні напруги мережі ДНПТ споживає потужність (можливий заряд АКБ).

При роботі в **режимі ведучого** АІН працює як ведуче джерело мережі (інші джерела в мережі відсутні або є веденими) і генерує стабілізованою напруга.

Перехід з ведучого режиму в ведений потрібно в момент введення іншого ведучого джерела в мережу. При цьому АІН повинен відключитися безпосередньо перед підключенням іншого джерела до мережі (по сигналу) і повернутися в мережу в веденому режимі.

Перехід з веденого режиму в ведучий може відбуватися в двох випадках: непередбачене відключення веденого джерела (відсутність мережі), заплановане відключення веденого джерела в автономної мережі.

Особливістю роботи інвертора з мережею є можливість покращення показників якості електроенергії для споживачів шляхом реалізації блоку керування інвертора як силового активного фільтру.

Силові активні фільтри компенсують гармоніки струму шляхом введення рівного, але протилежного гармонійному, струму компенсації. У цьому випадку силовий активний фільтр діє як джерело струму, що вводить гармоніки, які генеруються навантаженням, але із зсувом по фазі на 180° . В результаті компоненти гармонійних струмів, що містяться в струмі навантаження придушуються під дією активного фільтру і струм джерела залишається синусоїдальним і у фазі з відповідною фазною напругою.

2.6 Імітаційне моделювання роботи СЕС в різних режимах електроживлення на базі трифазного інвертора

2.6.1 Опис моделі інвертора при роботі у веденому та ведучому режимі

2 Моделювання мережі

В автономному режимі в я

В денний час територія фотоелектричної станції може отримувати резервне живлення від генерації СЕС, у нічну добу резервним живленням служить дизель-генератор.

Обираю генератор ВДГ 190-600, з такими характеристиками (табл.2.1):

Таблиця 2.1 - Параметри генератора.

Кількість фаз	3
Номинальный момент, Мн	192 Нм
Номинальный ток, Ін	17 А
Номинальная частота обертання, пн	105 об/хв
Число пар полюсів, р	30
Опір фази, R	0,493 Ом
Коэффициент перетворення, См	11,3
Індуктивність, L	8,35 мГн
Вага ротора, G	7,1 кг
Діаметр ротора, D	0,51 м
Момент інерції ротора, J	0,46 кг*м2

Для моделювання генератора в програмному середовищі Simulink використовувався блок Permanent Magnet Synchronous Machine (рис.2.18).

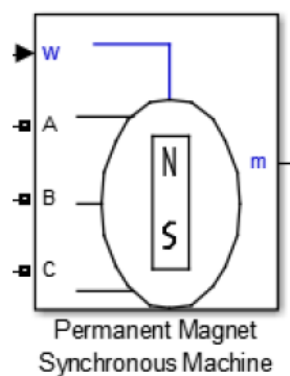


Рисунок 2.18 - Блок генератора

Параметри блоку були приведені у відповідність з характеристиками ВДГ 190-600 (рис.2.19).

Для завдання номінальної частоти обертання на вхід моделі 'w' подається константа 105.

Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)		Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)	
<p>Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.</p> <p>The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.</p> <p>The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor. Preset models are not available for this type of machine.</p>		<p>Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.</p> <p>The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.</p> <p>The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor. Preset models are not available for this type of machine.</p>	
<p>Configuration Parameters Advanced</p> <p>Number of phases: 3</p> <p>Back EMF waveform: Sinusoidal</p> <p>Rotor type: Round</p> <p>Mechanical input: Speed w</p> <p>Preset model: No</p> <p>Measurement output <input type="checkbox"/> Use signal names to identify bus labels</p>		<p>Configuration Parameters Advanced</p> <p>Stator phase resistance Rs (ohm): 0.493</p> <p>Armature inductance (H): 0.00835</p> <p>Machine constant Specify: Voltage Constant (V_peak L-L / krpm)</p> <p>Flux linkage: 1.1762</p> <p>Voltage constant: 640</p> <p>Torque constant: 5.2928</p> <p>Pole pairs p (): 3</p> <p>Initial conditions [wm(rad/s) thetam(deg) ia,ib(A)]: [10,0,0,0]</p>	

Рисунок 2.19 - Параметри блоку генератора.

Модель генератора складається з електричної частини, механічної частини і блоку вимірів (рис.2.20):

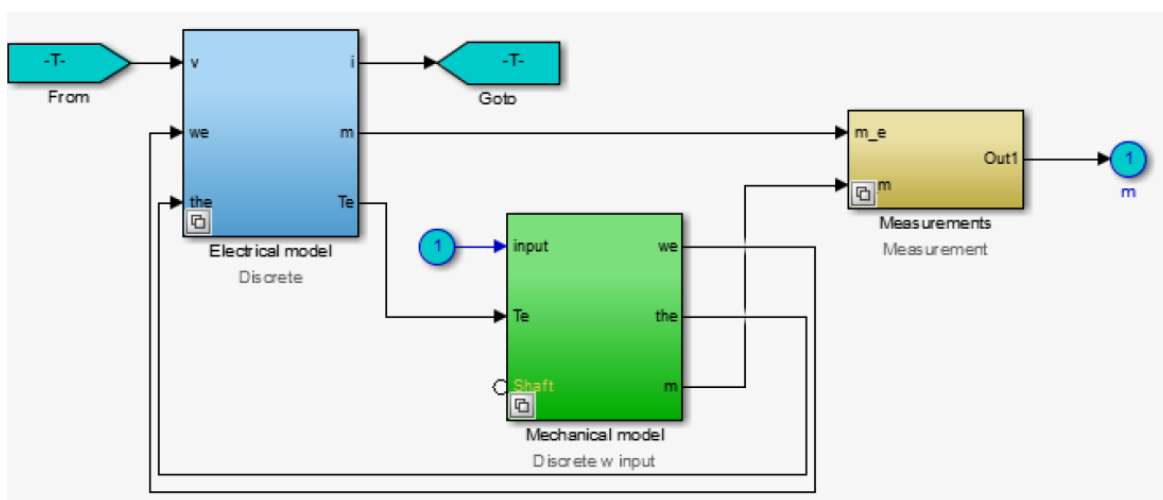


Рисунок 2.20 Структура блоку генератора.

Розглянемо докладніше модель електричної частини на рис.2.21.

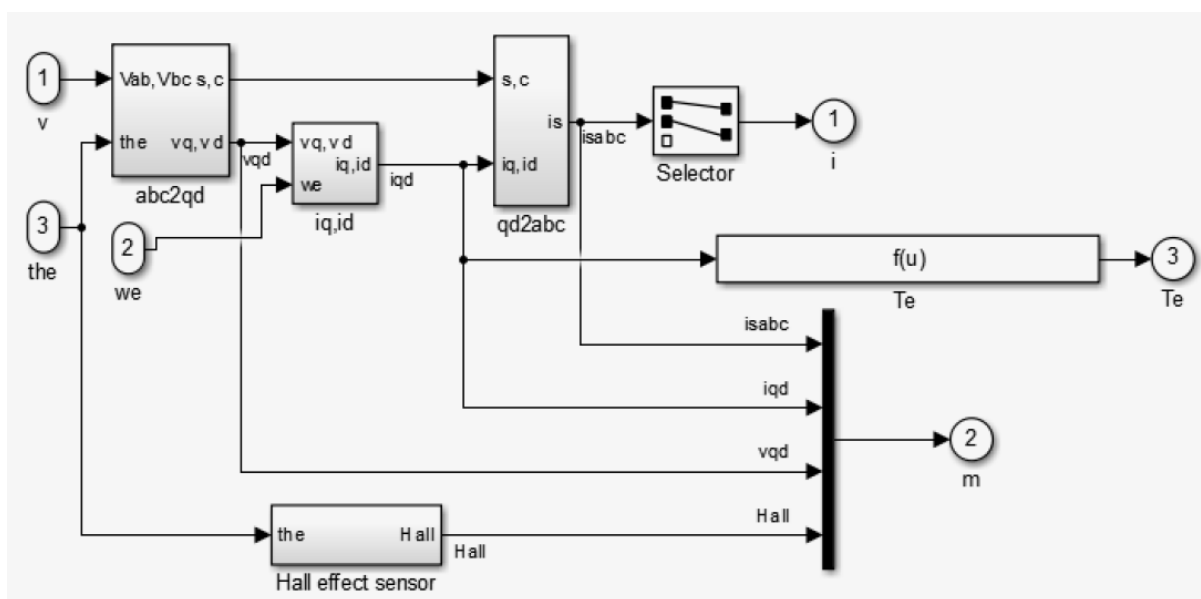


Рисунок 2.21 Модель електричної частини генератора.

Розрахунок векторних складових напруги проводиться із застосуванням прямого перетворення Парка - Кларка. З напружень ми отримуємо векторні складові струму, які і визначають електромагнітний момент.

Перетворення Парку - Кларка виконується в два етапи: спочатку струми наводяться до двох координатної системі (2.29), це можливо, тому що вони всі

лежать в одній площині, далі перетворюються в обертову систему координат, з спрямовану з вектором потокозчеплення (2.30), що дозволяє виділити складову, визначальну електромагнітний момент [14].

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_a(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_e) & \sin(\Theta_e) \\ -\sin(\Theta_e) & \cos(\Theta_e) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Блок abc2qd, див. рис.2.21, виробляє пряме перетворення Парка фазних напруг генератора в напругу поздовжньої і поперечної координат. В аналітичному поданні:

$$U_q = \frac{1}{3} (\cos \Theta_e \cdot (2U_{ab} + U_{bc}) + (\sqrt{3} \cdot U_{bc} \cdot \sin \Theta_e)) \quad (2.31)$$

$$U_d = \frac{1}{3} (\sin \Theta_e \cdot (2U_{ab} + U_{bc}) + (-\sqrt{3} \cdot U_{bc} \cdot \cos \Theta_e)) \quad (2.32)$$

де U_d - q складова напруги;

U_q - d складова напруги.

Лінійні фазні напруги U_{ab} та U_{bc} визначаються за формулами:

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (2.33)$$

$$U_{bc} = U_b - U_c \quad (2.34)$$

У блоці на підставі фазних напруг поздовжньої і поперечної складової фазної напруги розраховуються відповідні складові фазних струмів i_d та i_q .

$$i_q = \int \left(\frac{U_q}{L_q} - \omega_E \cdot \frac{Flux}{L_q} - \frac{L_d}{L_q} \cdot \omega_E \cdot i_d - \frac{R}{L_q} i_q \right) dt \quad (2.35)$$

$$i_d = \int \left(\frac{U_d}{L_d} - \frac{L_d}{L_q} \cdot \omega_E \cdot i_d - \frac{R}{L_q} i_d \right) dt \quad (2.36)$$

де i_q - q складова струму;

i_d - d складова струму;

$Flux$ - магнітний потік ротора;

L_d - d складова індуктивності;

L_q - q складова індуктивності.

Блок Te (див. рис. 2.21) обчислює електромагнітний момент, використовуючи складові струму за такою формулою:

$$1.5 * p * (Flux * i_q(1) + (L_d - L_q) * i_q * i_d) \quad (2.37)$$

Блок $qd2abc$ (див. рис. 2.21) виробляє зворотнє перетворення Парка - Кларка складових струмів поздовжньої і поперечної координат i_d та i_q в амплітуди фазних струмів i_a , i_b , i_c . В аналітичному поданні:

$$i_a = i_q \cdot \cos \Theta_e + i_d \sin \Theta_e \quad (2.38)$$

$$i_b = \frac{1}{2} \left(\cos \Theta_e \cdot (-i_q - \sqrt{3} \cdot i_d) + \sin \Theta_e \cdot (i_d + \sqrt{3} \cdot i_q) \right) \quad (2.39)$$

$$i_c = -(i_a + i_b) \quad (2.40)$$

$$T_3 = \frac{1}{2} \left(PM.p \cdot (Flux \cdot i_q + (PM.L_d - PM.L_q) \cdot i_q \cdot i_d) \right) \quad (2.41)$$

На вхід механічної частини надходить зовнішній і електромагнітний момент, на виході обчислюються значення електричного і фізичного кута і частоти обертання ротора.

$$\omega_e = PM.p \cdot \int \left(\frac{1}{J} \cdot (T_3 - T_M) \right) dt \quad (2.42)$$

$$\theta_e = \int (\omega_e) \quad (2.43)$$

$$\omega = \frac{\omega_e}{PM.p} \quad (2.44)$$

$$\theta = \frac{\theta_e}{PM.p} \quad (2.45)$$

2.6.3 Моделювання акумуляторної батареї

Блок акумуляторної батареї в середовищі Matlab \ Simulink представлений на рис. 2.22.

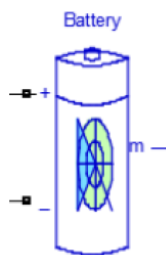


Рисунок 2.22 - Блок АКБ

Для акумуляторної батареї використовуються свинцево-кислотний акумулятори з номінальною напругою 48В і сумарною місткістю 1250А * год. Параметри блоку АКБ представлені на рис.2.23.

Parameters		Discharge	
Type:	Lead-Acid		
Nominal voltage (V)	48		
Rated capacity (Ah)	250		
Initial state-of-charge (%)	50		
Battery response time (s)	3		
		<input type="checkbox"/> Determined from the nominal parameters of the battery	
		Maximum capacity (Ah)	275
		Cut-off Voltage (V)	35
		Fully charged voltage (V)	55
		Nominal discharge current (A)	2
		Internal resistance (Ohms)	2
		Capacity (Ah) at nominal voltage	255
		Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[49 100]

Рисунок 2.23 - Параметри блоку АКБ

Структура блоку АКБ представлена на рис.2.24.

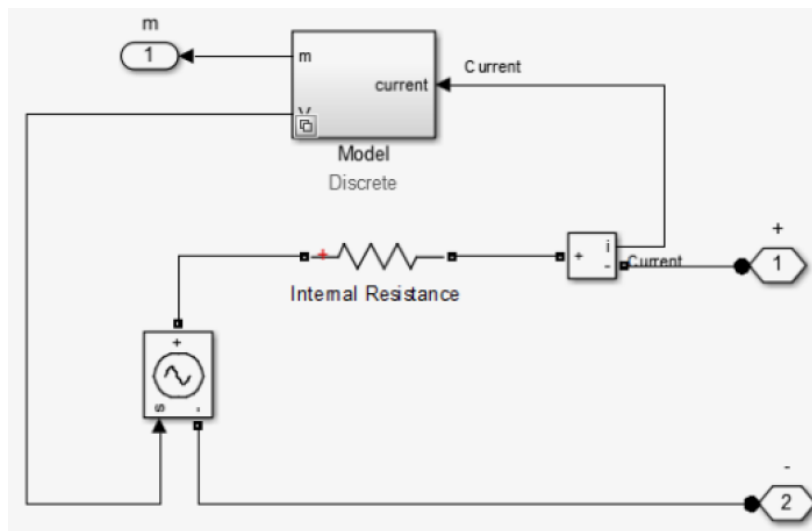


Рисунок 2.24 - Структура блоку АКБ

Вихід m блоку Model дозволяє отримати дані про рівень акумуляторної батареї, напругу і струм зарядки \ розрядки і рівні акумуляторної батареї.

2.6.4 Моделювання трифазного інвертора

Інвертор (DC / AC converter) - пристрій для перетворення постійного струму в змінний зі зміною величини частоти або напруги. Зазвичай являє собою генератор періодичної напруги, за формою наближеного до синусоїди, або дискретного сигналу. Блок генератора приведений на рис.2.25.



Рисунок 2.25 - Блок інвертора.

Робота інвертора напруги заснована на перемиканні джерела постійної напруги з метою періодичної зміни полярності напруги на затискачах навантаження. Частота перемикання «задається» сигналами управління, які формувались керуючою схемою (контролером). Контролер також може вирішувати додаткові завдання:

- регулювання напруги;
- синхронізація частоти перемикання ключів;
- захистом їх від перевантажень; та ін.

Інвертори з синусоїдальною формою вихідної напруги (рис.2.26).

Принцип побудови такого інвертора полягає в тому, що за допомогою попереднього високочастотного перетворення отримують напругу постійного струму, значення якого близько до амплітудному значенням синусоїдальної вихідної напруги інвертора. Потім цю напругу постійного струму за допомогою, як правило, мостового інвертора перетворюється в змінну напругу за формою, близьке до синусоїдальному, за рахунок застосування відповідних принципів управління транзисторами цього мостового інвертора. Ідея цієї «багаторазової» ШІМ полягає в тому, що на інтервалі кожного напівперіоду вихідної напруги інвертора відповідна пара транзисторів мостового інвертора комутується на

високій частоті (багаторазово) при широтно-імпульсному управлінні. Причому тривалість цих високочастотних імпульсів комутації змінюється за синусоїдальним законом. Потім за допомогою високочастотного фільтра нижніх частот виділяється синусоїдальна складова вихідної напруги інвертора [14].

Інвертор побудований на 6 IGBT транзисторах, з'єднаних зустрічно паралельно з діодами. Падіння напруги на IGBT транзисторах у відкритому статки становлять 2 Вольт, на діодах 0.8 Вольт.

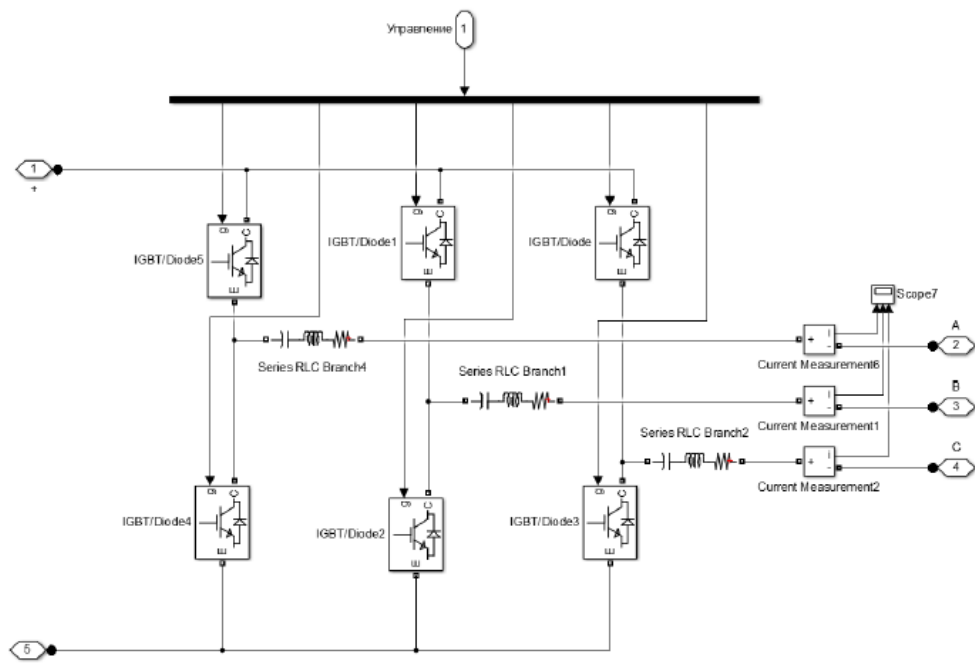


Рисунок 2.26 - Структура блока інвертора.

Широтно-імпульсний сигнал, що керує роботою інвертора приходить на кожен з шести транзисторів і реалізується блоком управління. Параметри транзисторів представлені на рис. 2.27.

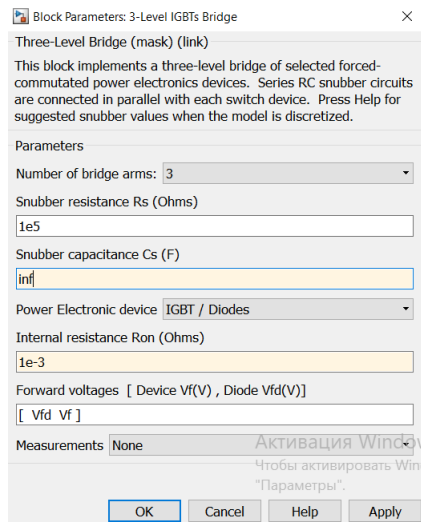


Рисунок 2.27 - Параметри транзисторів.

2.6.5 Моделювання блоку керування інвертором

Блок управління (рис.2.28) необхідний для забезпечення керуючих сигналів. В ньому генерується широтно-імпульсний сигнал, і відбувається перемикання між режимами ведучого і веденого.

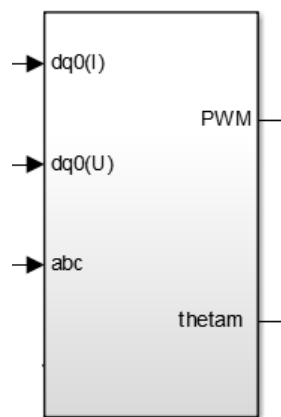


Рисунок 2.28 - Блок керування інвертором

Структурна схема блоку керування інвертором представлена на рис.2.29.

Перемикання між режимами ведучого і веденого проводиться при відсутності і наявності напруги в мережі відповідно.

Даний блок служить для синхронізації з мережею в режимі веденого, визначення наявності напруги на ньому для перемикання між режимами, а також для завдання кута в режимі ведучого.

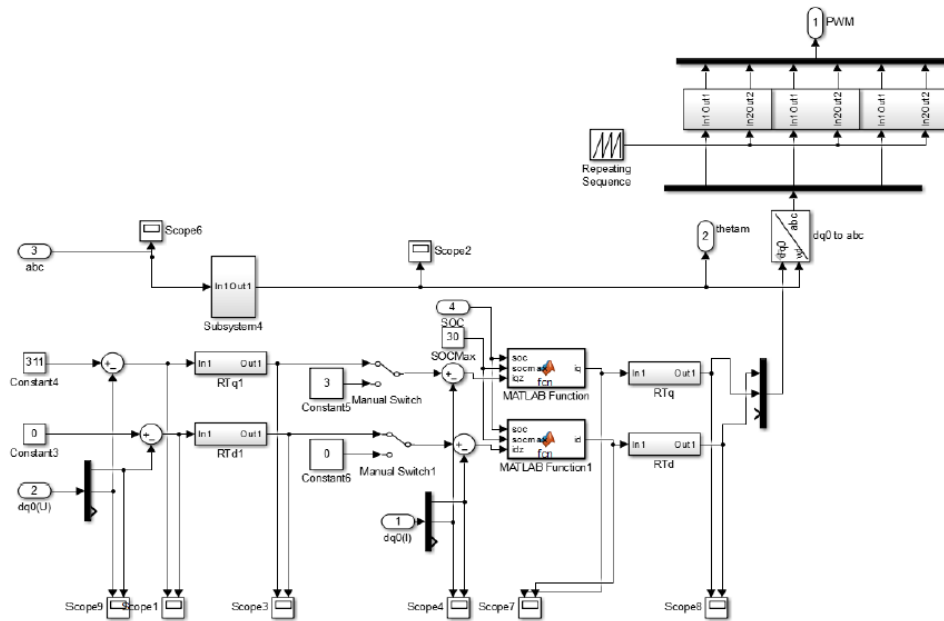
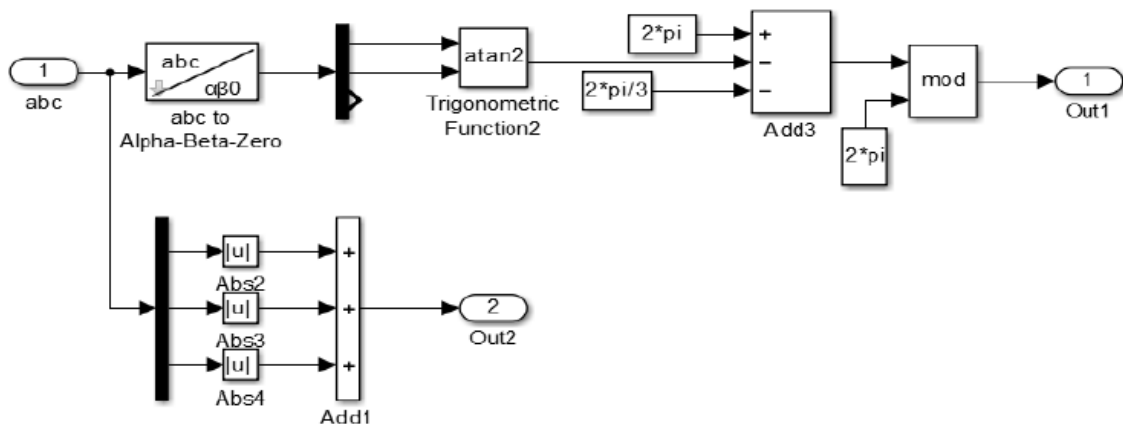


Рисунок 2.29 - Структурна схема блоку керування інвертором

Розглянемо детальніше складові елементи блоку керування (рис.2.30).



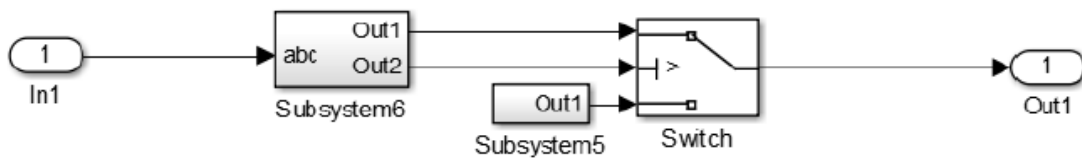


Рисунок 2.30 - Структурна схема блоку синхронізації з мережею

На рис.2.31 представлений контур завдання напруги і обчислення помилки.

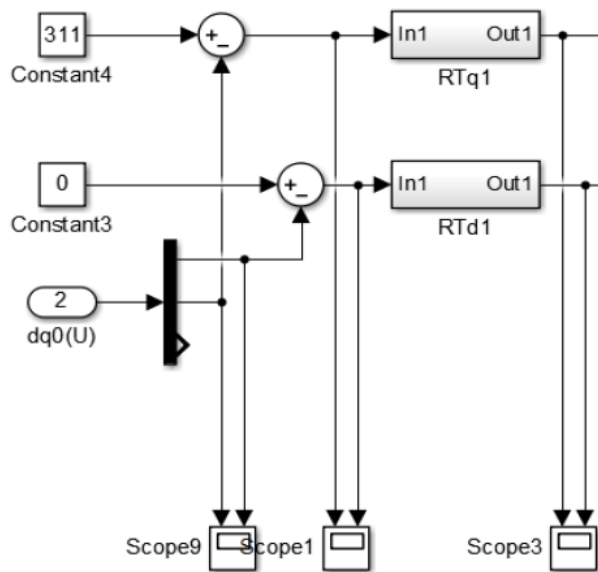


Рисунок 2.31 - Регулятор контуру напруги

Параметри регулятора контуру напруги представлені на рис 2.32.

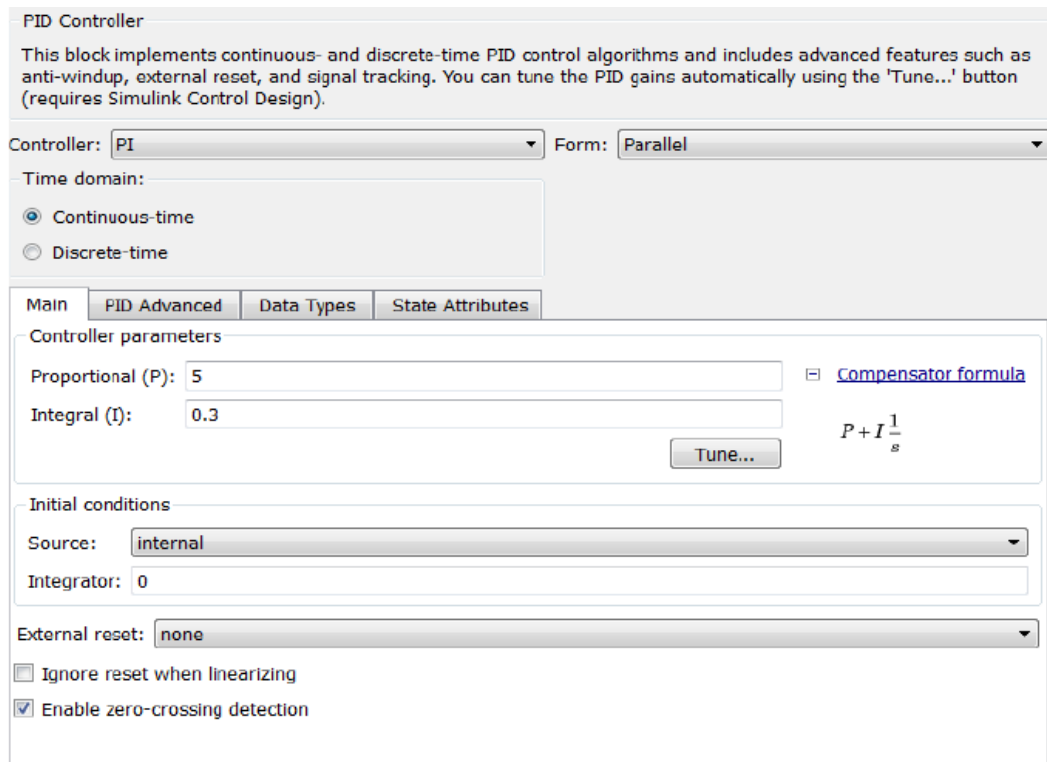


Рисунок 2.32 - Параметры регулятора контуру напруги

На рис. 2.33 представлений контур завдання струму.

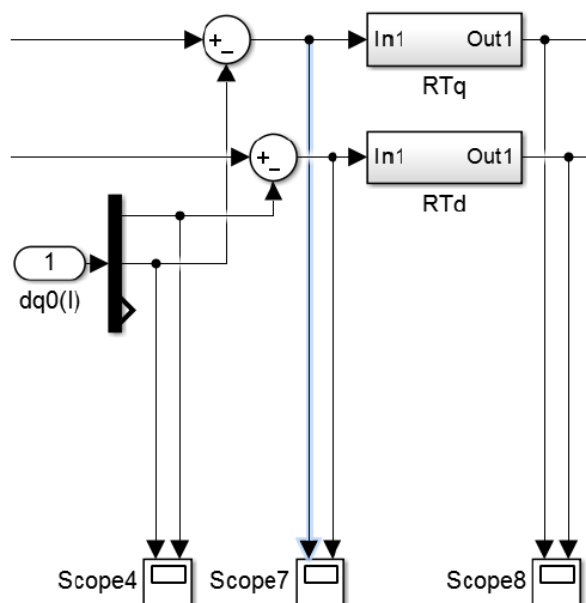


Рисунок 2.33 – Регулятор контуру струму

Параметри регулятора контуру напруги представлені на рис.2.34

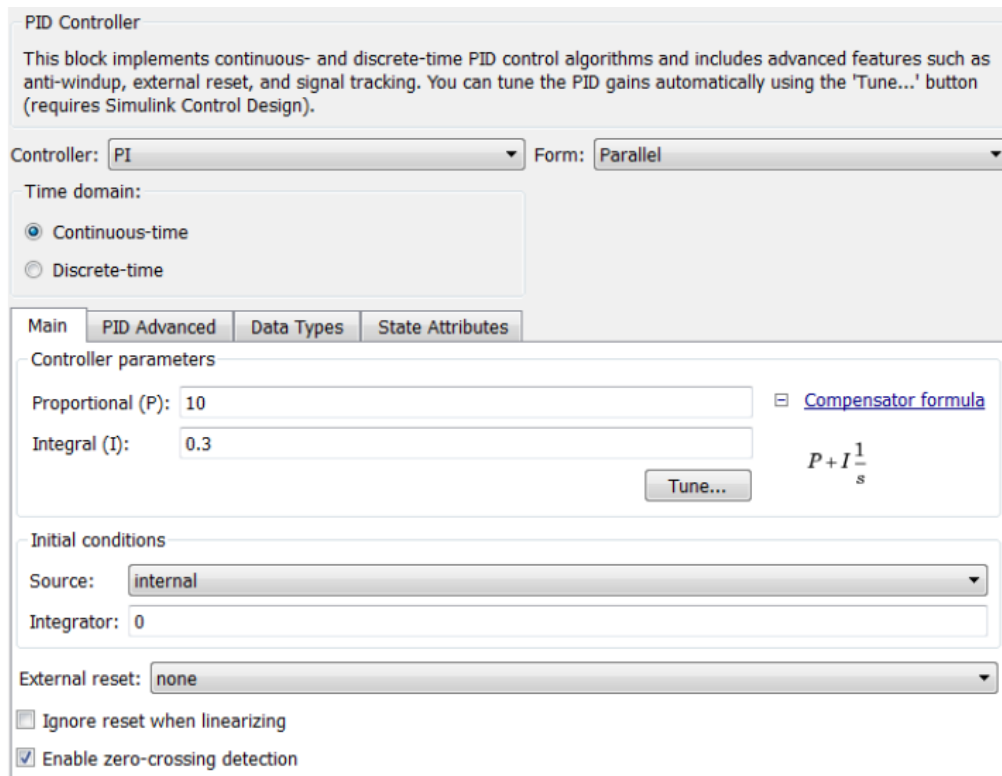


Рисунок 2.34 - Параметри регулятора контуру напруги

Для того, щоб задані значення струму трансформувались в трифазну мережу потрібно застосувати блок зворотного перетворення Парка-Кларка (рис.2.35).

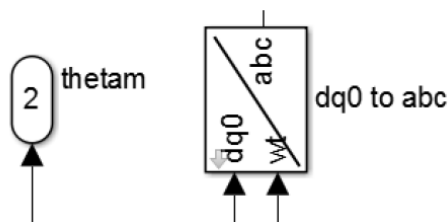


Рисунок 2.35 - Зворотнє перетворення Парка-Кларка

Блоки зворотного перетворення Парка-Кларка надходять на блоки, що генерують ШІМ сигнал (рис.2.36).

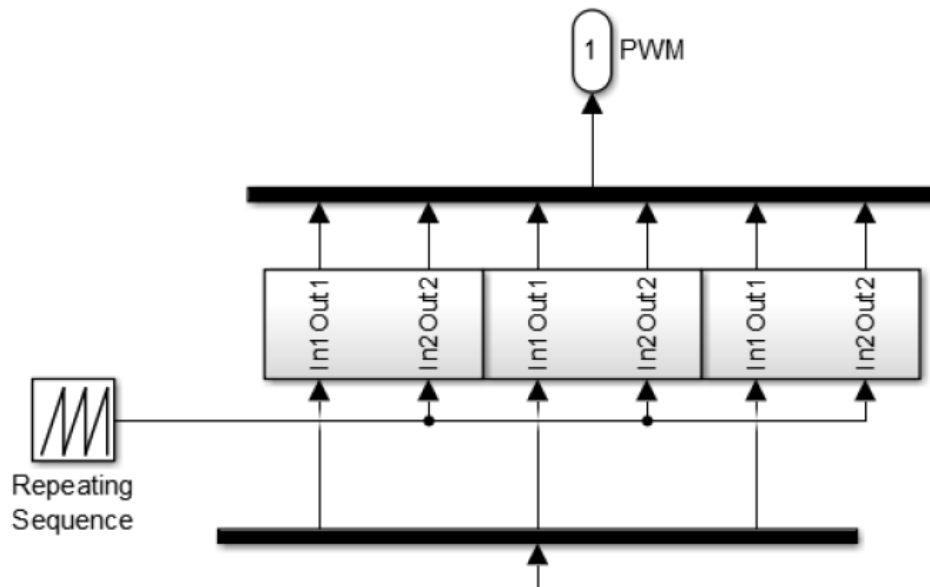


Рисунок 2.36 - Блок, що генерує ШІМ сигнал

Генерація ШІМ сигналу представлена на рис.2.37

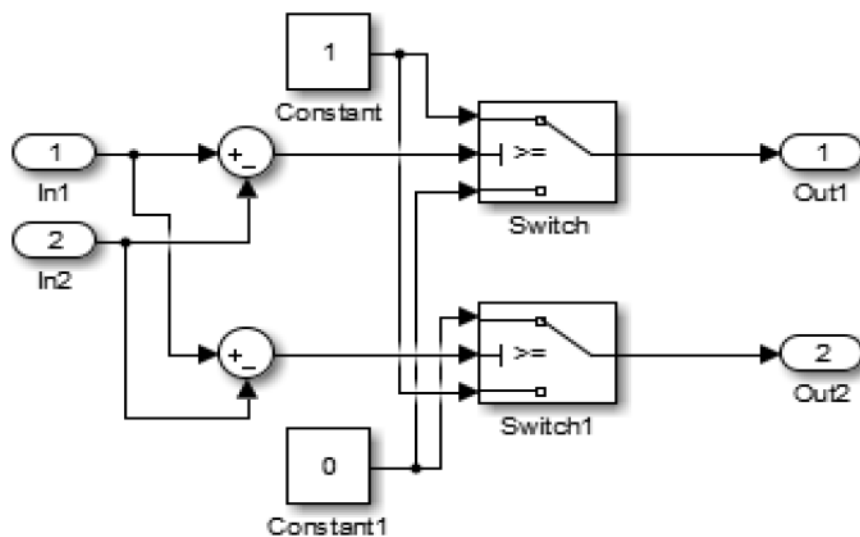


Рисунок 2.37 - Генерація ШІМ сигналу

2.6.6 Перетворення для створення контурів напруги і струму

Для створення контурів напруги і струму, а так само для синхронізації інвертора з мережею, нам знадобляться декілька видів перетворень. Блоки представлені на рис.2.38.



Рисунок 2.38 - Блоки перетворень

де блок «abc to dq0» – пряме перетворення Парка-Кларка (2.46)

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (2.46)$$

блок «dq0 to abc» – зворотнє перетворення Парка-Кларка (2.47)

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

блок «abc to αβ0» – перетворення трифазної системи в двохфазну (2.48).

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

Для прямого і зворотного перетворення Парка-Кларка потрібно подати на вхід блоку значення ωt . Також варто відзначити наявність налаштувань у даних блоків. У Rotating Frame Alignment at $\omega t = 0$ слід вказувати Aligned with Phase A axis, в іншому випадку інвертор буде генерувати струм, який не збігається за фазою із струмом мережі, що призведе до неправильного їх підсумовування на навантаженні, і, як наслідок, збільшення його видають інвертором струму.

2.6.7 Моделювання навантаження

Блок навантаження представлена на рис. 2.39.

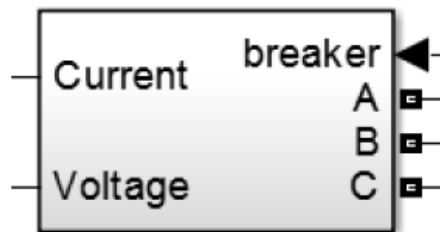


Рисунок 2.39 - Згорнутий блок навантаження.

У даній моделі для демонстрації різних режимів роботи використовувалися різні типи навантаження. Найчастіше навантаження представляла собою набір резисторів з однаковим опором (рис.2.40).

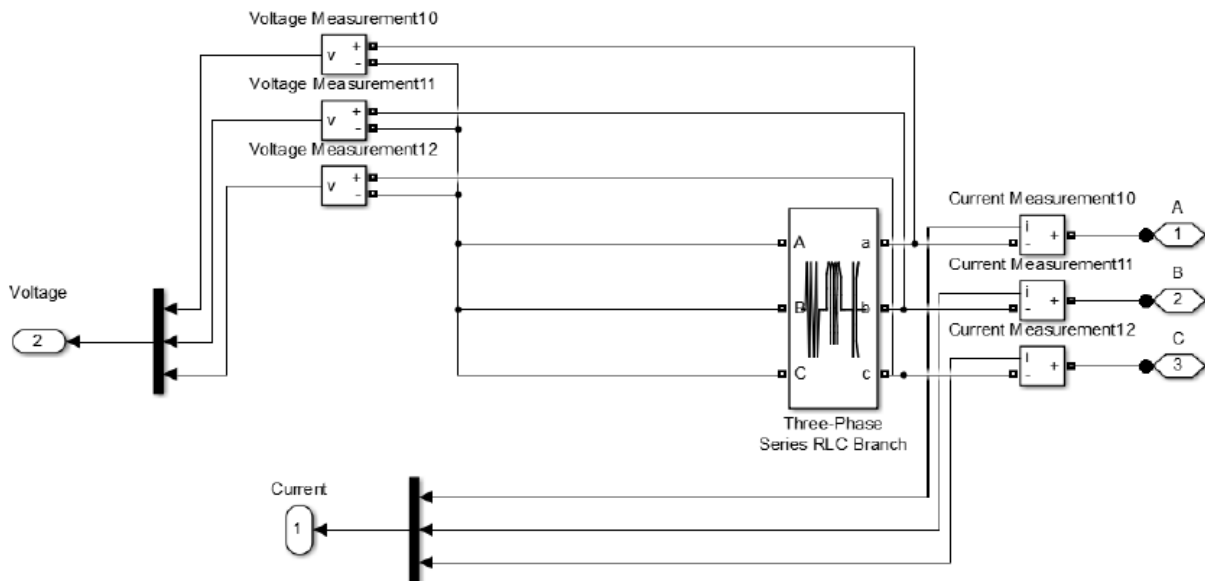


Рисунок 2.40 - Структура блоку навантаження, де резистори з однаковим опором.

В іншому випадку навантаження представляла собою два послідовно з'єднаних резистора на кожен фазу. Другі резистори включаються і відключаються від зовнішнього сигналу, що надходить на вимикач (рис.2.41).

У двох варіантах блок навантаження виходи Current і Voltage - інформаційні канали струму і напруги відповідно.

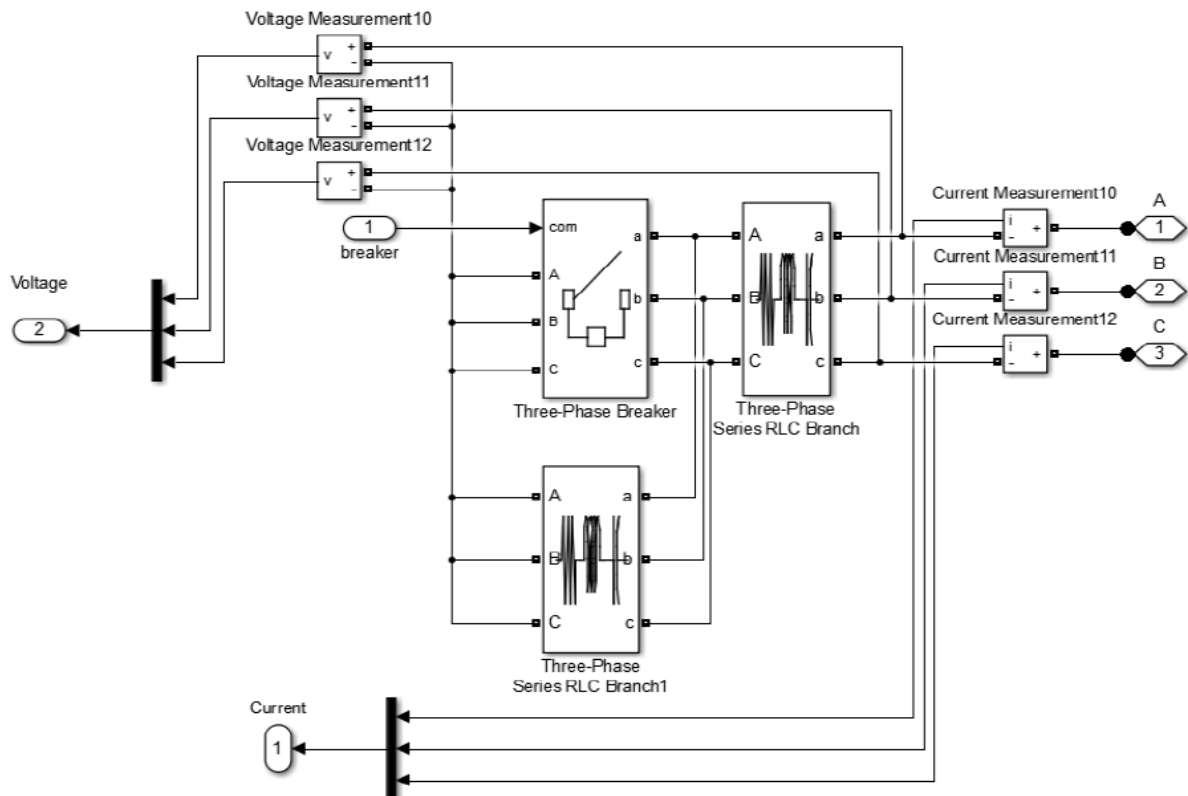


Рисунок 2.41 - Структура блоку навантаження з послідовно з'єднаними резисторами на кожен фазу.

Змодельовано роботу СЕС, що виступає як активний фільтр для мережі

Такого типу СЕС можна підключати до мережі не як джерело живлення, а як фільтр для покращення показників якості електроенергії.

2.7 Моделювання підстанції

За допомогою програмного забезпечення Matlab / Simulink складаємо блок схему моделі мережі та споживачів.

2.7.1 Моделювання ланцюгів споживачів

Розглянемо детальніше схему, зображену на рис.2.42 і розберемо параметри і призначення кожного з елементів.

Блок «Source» - джерело живлення напругою, що заміщує собою лінію.

Блок «Load» - представляє собою електричне навантаження (потужність), що підключається до мережі від інших споживачів.

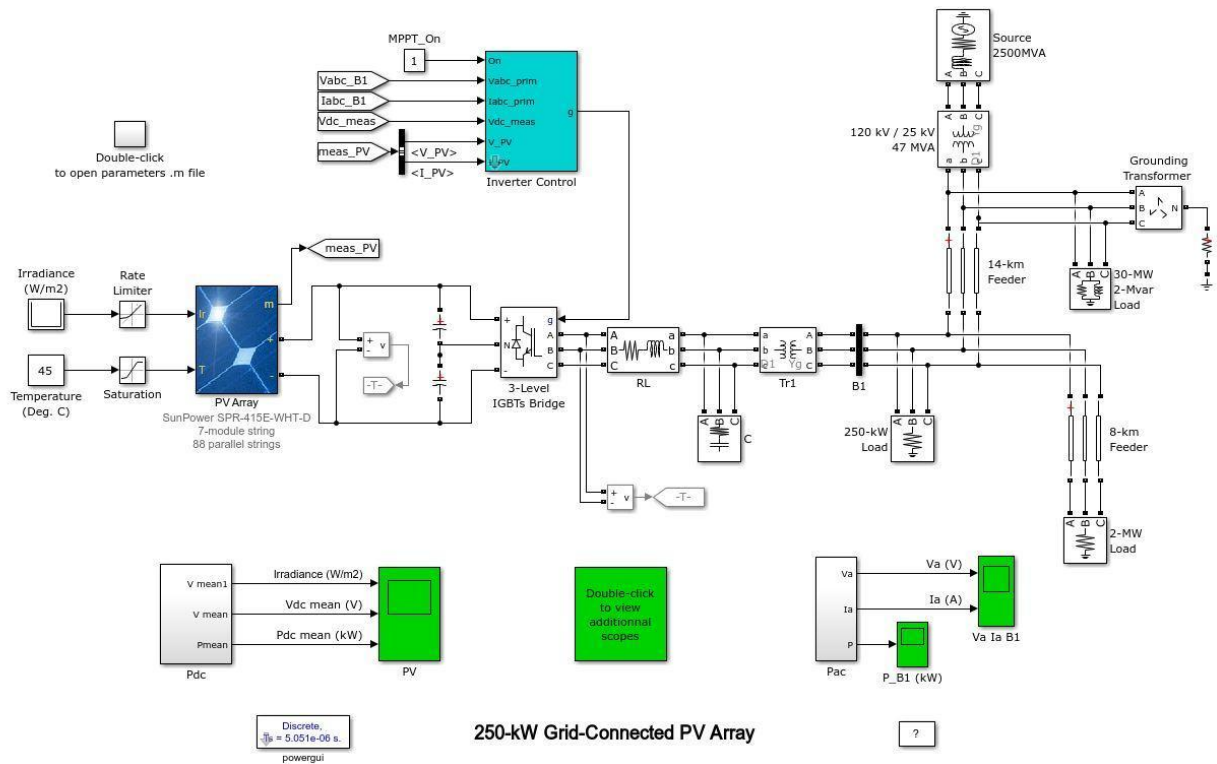


Рисунок 2.42 - Блок-схема моделі споживачів.

Блок «Tr» - представляє понижуючий трансформатор.

Для цілей моделювання активні та індуктивні опори обмоток трансформаторів та їх індуктивності повинні бути розраховані окремо для обмоток високої, низької і, якщо є, середньої напруги. Для цього, напруга короткого замикання $U_k, \%$, має бути знайдено для кожної з обмоток. У двообмоткових трансформаторах, U_k визначається за виразом:

$$u_{k(v)} = u_{k(n)} = 0,5 u_k, \quad (2.49)$$

Опори r_t , Z_t , X_t , O_m , і індуктивність L_t , G_n , кожної з обмоток трансформатора обчислюються за такими формулами [15]:

$$r_T = 3 \cdot \frac{P_K \cdot U_\Phi^2}{(S_{T_НОМ})^2}, \quad (2.50)$$

$$Z_T = 3 \cdot \frac{u_K}{100} \frac{U_\Phi^2}{S_{T_НОМ}}, \quad (2.51)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2}, \quad (2.52)$$

$$L_T = \frac{X_T}{2\pi f}, \quad (2.53)$$

де P_K - втрати потужності при к.з., Bm ;

$S_{T_НОМ}$ - номінальна потужність трансформатора, BA ;

u_K - напруга к.з., приведене до відповідної обмотки, %;

U_Φ - фазна напруга на відповідній обмотці, B .

Блок « 3 Level IGBTs Bridge» - блок трифазного інвертора, виконаного на основі IGBT-модулів.

Блок « PV Array» - блок сонячної панелі.

Блок « Temperature» - блок датчика температури.

Блок « Irradiance» - блок датчика сонячної активності.

Вимірювання в даній схемі виконують за допомогою блоків «Pac, Pdc», що вимірюють фазні струми та напруги, та параметри навколишнього середовища.

Для покращення якості електроенергії в мережі змодельовано СЕС як фільтр від гармонік. Блок схему моделі (див. рис. 2.43) та Блок Grid в розгорнутому вигляді (рис.2.44), Блок SES в розгорнутому вигляді (рис.2.45).

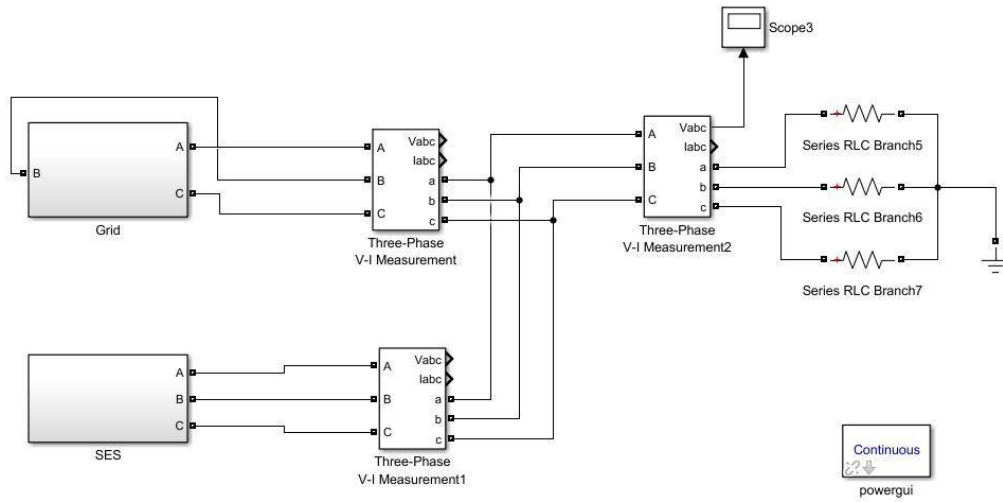


Рисунок 2.43 – Блок схема моделі СЕС для мережі як активний фільтр.

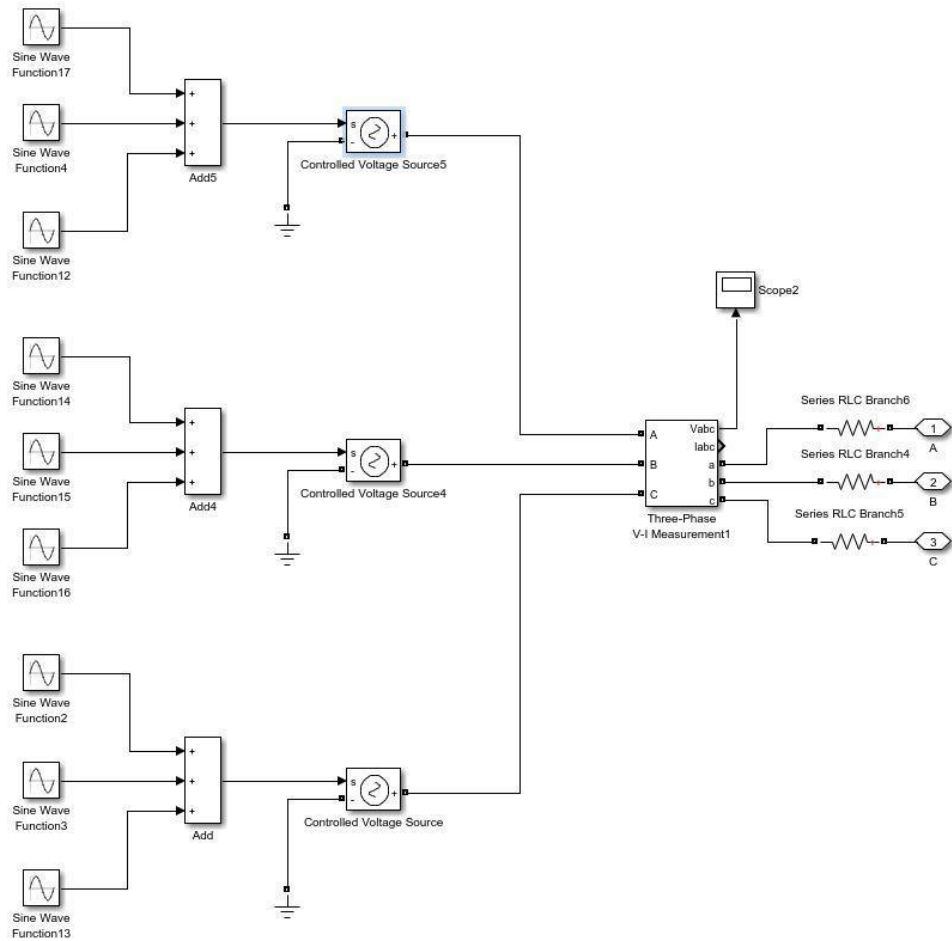


Рисунок 2.44 – Блок Grid в розгорнутому вигляді.

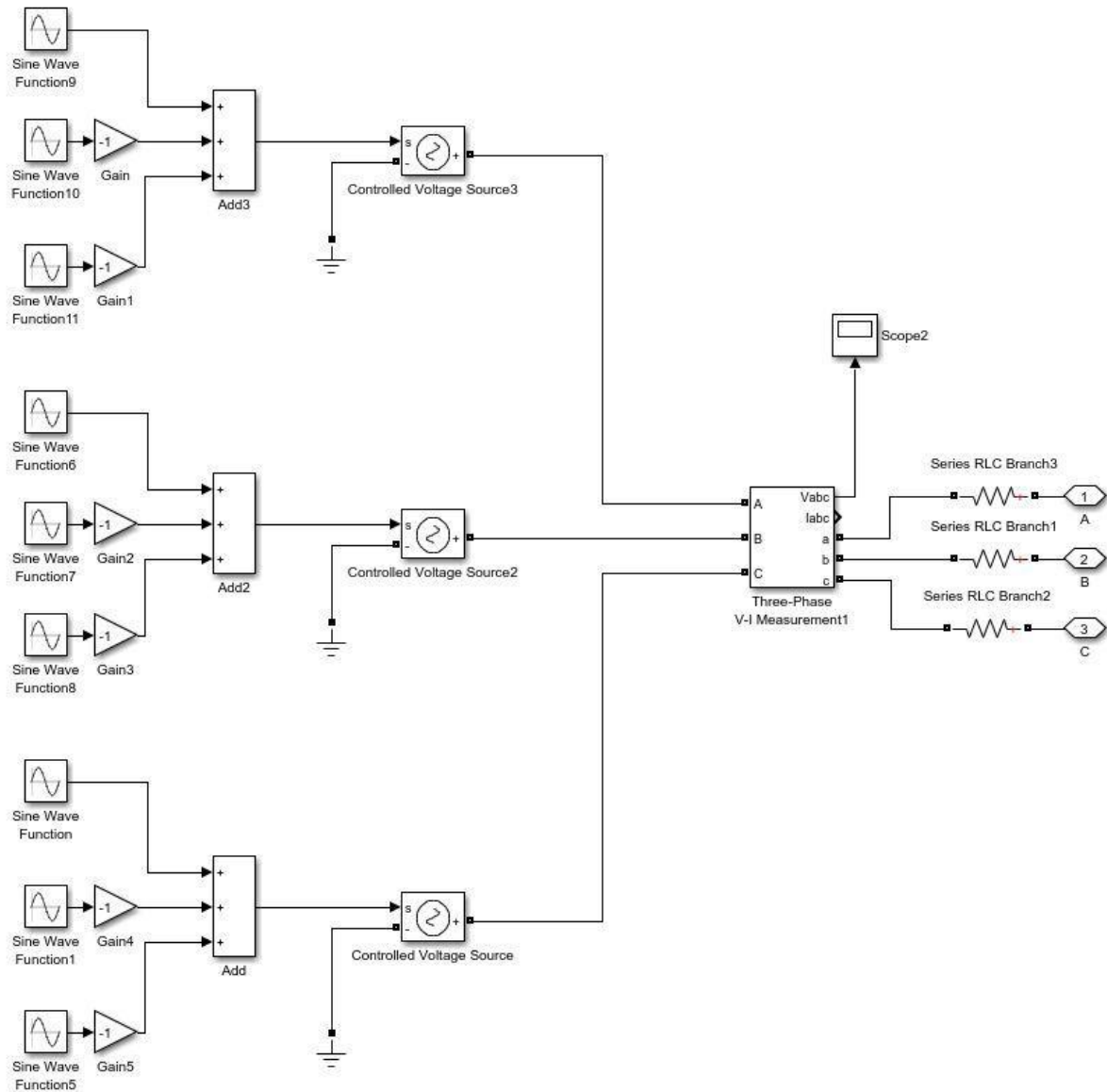


Рисунок 2.45 – Блок SES в розгорнутому вигляді

Силові активні фільтри компенсують гармоніки струму шляхом введення рівного, але протилежного гармонійному, струму компенсації. У цьому випадку силовий активний фільтр діє як джерело струму, що вводить гармоніки, які генеруються навантаженням, але із зсувом по фазі на 180° . В результаті компоненти гармонійних струмів, що містяться в струмі навантаження

придушуються під дією активного фільтру і струм джерела залишається синусоїдальним і у фазі з відповідною фазною напругою.

2.7.2 Розрахунок силового активного фільтру

Силові активні фільтри компенсують гармоніки струму шляхом введення рівного, але протилежного гармонійному, струму компенсації. У цьому випадку силовий активний фільтр діє як джерело струму, що вводить гармоніки, які генеруються навантаженням, але із зсувом по фазі на 180° . В результаті компоненти гармонійних струмів, що містяться в струмі навантаження придушуються під дією активного фільтру і струм джерела залишається синусоїдальним і у фазі з відповідною фазною напругою. Цей принцип можна застосувати до будь-якого типу навантаження. Таким чином, система розподілу електроенергії сприймає нелінійне навантаження і активний фільтр як ідеальний резистор [15]. Принципова схема роботи силового активного фільтру показана на рис.2.46

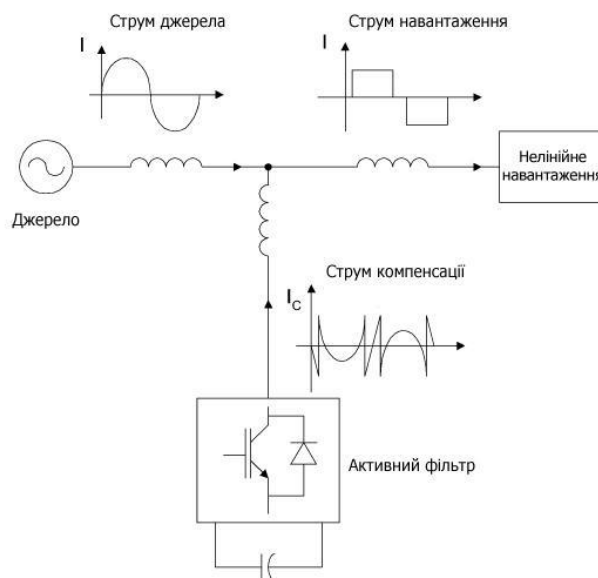


Рисунок 2.46 - Принципова схема роботи силового активного фільтру.

2.7.3 Система управління

Схема управління силовим активним фільтром повинна розраховувати форму хвилі опорного струму для кожної фази інвертора, підтримувати постійну напругу на певному рівні і генерувати сигнали управління. Блок-схема системи управління силовим активним фільтром показана на рис. 2.47.

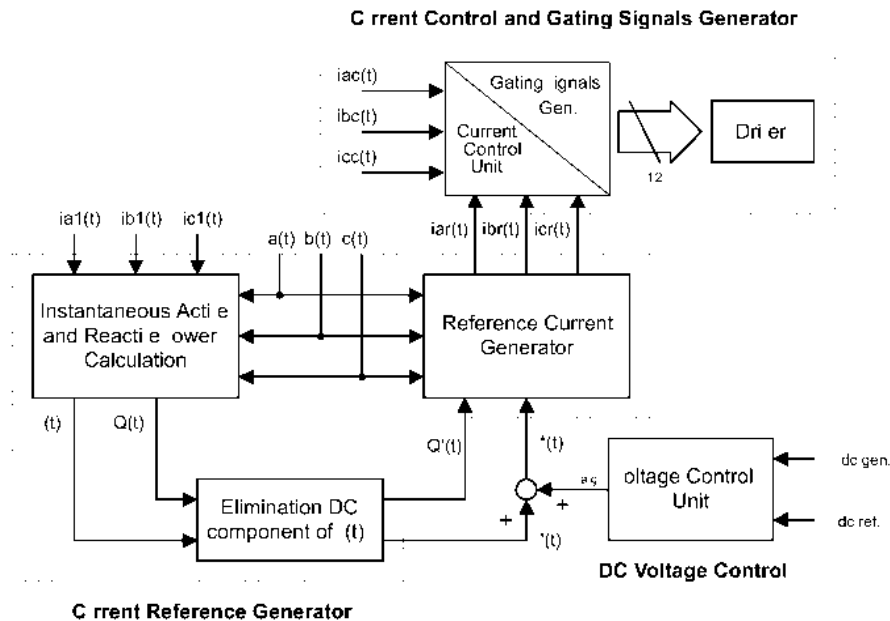


Рисунок 2.47 – Блок-схема системи управління силовим активним фільтром.

Згенерований опорний струм потрібен для компенсації гармонійного струму навантаження, а також для підтримки постійної напруги на конденсаторі. Ефективність активного фільтру залежить від його здатності слідувати з мінімальною похибкою і затримкою часу опорного струму.

Є багато можливостей для визначення опорного струму, необхідного для компенсації нелінійних навантажень. Як правило, активні фільтри використовуються для компенсації реактивної потужності та гармонійного струму низької частоти, що генерується нелінійними навантаженнями. Однією з альтернатив для визначення опорного струму інвертора є використання теорії миттєвої реактивної потужності, запропонованої Акаджі. Ця концепція дуже

популярна і корисна, і в основному складається із переходу від системи відліку a, b, c до миттєвої потужності, напруги і струму сигналів α і β (рис. 2.48).

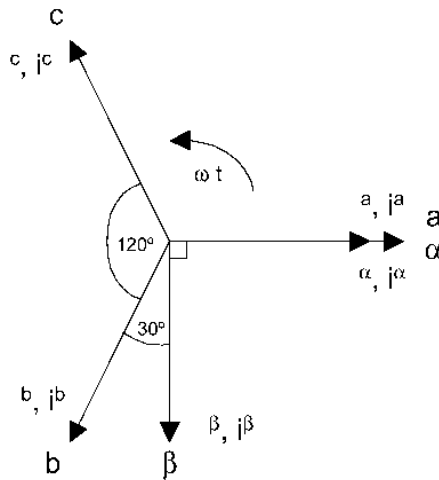


Рисунок 2.48 – Векторна діаграма переходу від системи відліку a, b, c до α, β координат

Миттєві значення напруги і струму в α, β координатах можуть бути отримані з наступних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (2.54)$$

де $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ - відповідно миттєві значення напруг і струмів;

A - матриця перетворення, що визначається з векторної діаграми переходу від системи.

Ця трансформація має місце тоді і тільки тоді, коли $u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0$, а також, якщо напруги збалансовані і синусоїдальні.

Миттєві активна і реактивна потужності в α , β координатах обчислюються за наступними виразами:

$$p(t) = u_{\alpha}(t) \cdot i_{\alpha}(t) + u_{\beta}(t) \cdot i_{\beta}(t), \quad (2.55)$$

$$q(t) = -u_{\alpha}(t) \cdot i_{\beta}(t) + u_{\beta}(t) \cdot i_{\alpha}(t), \quad (2.56)$$

де $u_{\alpha}(t), u_{\beta}(t)$ - миттєві значення напруги у α , β координатах;

$i_{\alpha}(t), i_{\beta}(t)$ - миттєві значення струму у α , β координатах.

Очевидно, що $p(t)$ стає рівною звичайної миттєвій активній потужності, визначеній в а, b, с відліку. Тим не менше, для того, щоб визначити миттєву реактивну потужність, Акаджі вводить новий миттєвий векторний простір який визначається виразом (2.55) або векторним рівнянням:

$$q = u_{\alpha} \cdot i_{\beta} + u_{\beta} \cdot i_{\alpha}, \quad (2.57)$$

Вектор q перпендикулярний до площини α , β координат, з якими зустрінеться у відповідності з правилом правої руки, та u_{α} перпендикулярна i_{β} , а u_{β} перпендикулярна i_{α} . Фізичним змістом вектора q не буде "миттєва потужність", оскільки добутком є напруга однієї фази і струм іншої фази. І навпаки, $u_{\alpha}i_{\alpha}$ і $u_{\beta}i_{\beta}$ в рівнянні (2.54), очевидно, означають "миттєву потужність", оскільки добутком є напруга і струм однієї фази. Акаджі називає

нову електричну величину, визначену в (2.56) "миттєва уявна потужність", яка представлена як добуток миттєвої напруги та струму.

Вираз струмів в α , β площині, залежно від миттєвої потужності задається наступним рівнянням:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix}. \quad (2.58)$$

Різні компоненти струмів в α , β площині показані в наступних виразах:

$$i_{\alpha p} = \frac{u_{\alpha} p}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}, \quad (2.59)$$

$$i_{\alpha q} = \frac{u_{\beta} q}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}, \quad (2.60)$$

$$i_{\beta p} = \frac{u_{\beta} p}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}, \quad (2.61)$$

$$i_{\beta q} = \frac{-u_{\alpha} q}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}, \quad (2.62)$$

де $i_{\alpha p}, i_{\beta p}, i_{\alpha q}, i_{\beta q}$ - відповідно значення активних і реактивних складових струмів у α , β площині.

З рівнянь (2.54) і (2.55), значення p і q можна виразити через постійні компоненти плюс компоненти змінних складових, а саме:

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, \quad (2.63)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}, \quad (2.64)$$

де \bar{p} - постійна складова миттєвої потужності p і пов'язана зі звичайним фундаментальним активним струмом;

\tilde{p} - змінна складова миттєвої потужності p , вона не має середнього значення, і пов'язана з гармонійними струмами, що викликані змінною складовою миттєвої активної потужності;

\bar{q} - постійна складова уявної миттєвої потужності q , і пов'язана з реактивною потужністю, викликана фундаментальними компонентами напруг і струмів;

\tilde{q} - змінна складова уявної миттєвої потужності q , і пов'язана з гармонійними струмами, що викликані змінною складовою миттєвої реактивної потужності.

Для компенсації гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням, опорний сигнал силового активного фільтра повинен включати в себе значення \tilde{p} , \bar{q} , і \tilde{q} . У цьому випадку опорний струм, необхідний для фільтра розраховується за наступним виразом:

$$\begin{bmatrix} i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix}, \quad (2.65)$$

Результуючі компенсуючі струми, включаючи струми нульової послідовності розраховуються за наступною формулою:

$$\begin{bmatrix} i_{c,a}^* \\ i_{c,b}^* \\ i_{c,c}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix}, \quad (2.66)$$

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

Блоки, необхідні для створення опорного струму визначеного у (2.67) показані на рис.2.49.

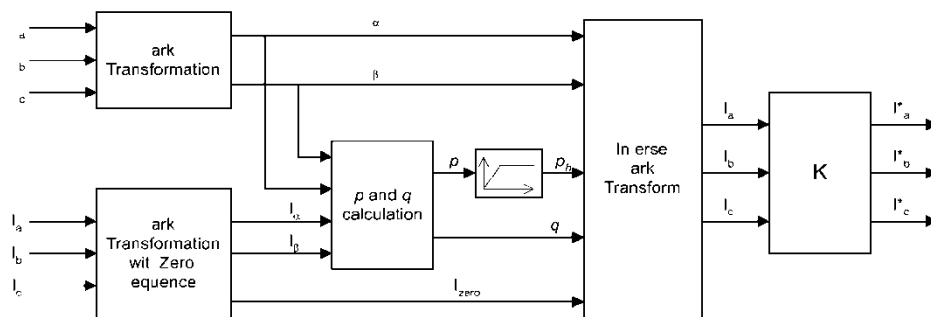


Рисунок 2.49 - Блок-схема генерації опорного струму за допомогою p-q теорії

Перевагою p-q теорії є те, що активна і реактивна потужності, пов'язані з основними компонентами в постійних кількостях. Ці величини можуть бути вилучені за допомогою фільтра низьких частот. Оскільки сигнал для вилучення є постійним, то його фільтрація в α , β координатах нечутлива до помилок зсуву фази, внесених фільтром нижніх частот, що поліпшує компенсаційні характеристики активного фільтру.

Ефективність активного фільтра залежить в основному від конструктивних характеристик регулятора струму. Велика частина технічних питань модуляції, що використовується в активних фільтрах залежить від стратегії ШІМ.

Трикутний метод, показаний на рис. 2.50 порівняння поточної помилки з фіксованою амплітудою і фіксованою частотою трикутної хвилі. Помилка обробляється за допомогою пропорційно-інтегрального (PI) каскаду посилення перед порівнянням з трикутним імпульсом [15].

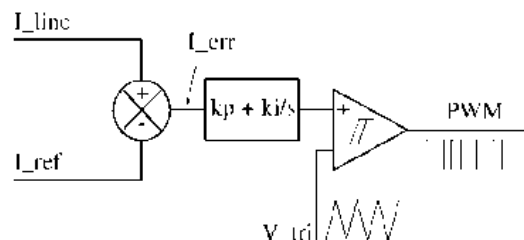


Рисунок 2.50 – Трикутний метод ШІМ

2.7.4 Розрахунок конденсатора

Перехідні зміни миттєвої потужності, що споживається навантаженням генерують коливання напруги на конденсаторі. Амплітудою цих коливань напруги можна ефективно керувати за допомогою відповідного значення ємності конденсатора. Необхідно відзначити, що контроль напруги петлі постійного струму стабілізує напругу на конденсаторі після декількох циклів, але не досить швидко, щоб обмежити перші варіації напруги. Значення ємності конденсатора, отримане за цим критерієм більше, ніж значення, отримане на основі максимального обмеження пульсації напруги постійного струму. З цієї причини напруга на конденсаторі являє менший коефіцієнт нелінійних викривлень. Ємність конденсатора розраховується за наступною формулою:

$$C = \frac{1}{\Delta U} \int_{t_1}^{t_2} i_C(t) dt, \quad (2.68)$$

де ΔU - коливання напруги на конденсаторі, V (приймаємо $0,01 V$);

$i_C(t)$ - миттєве значення постійного струму, A ;

t_1, t_2 - відповідно час початку і кінця інтегрування, s ;

ω - кутова частота, s^{-1} .

Рівняння (2.68) визначає значення ємності конденсатора, яка буде підтримувати коливання напруги постійного струму нижче ΔU . Середнє значення постійного струму, який створює максимальне перенапруження може бути визначене:

$$\int_{t_1}^{t_2} i_C(t) dt = I_{inv} \int_{t_1}^{t_2} [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 120^\circ)] dt, \quad (2.69)$$

де I_{inv} - струм інвертора, A .

Розраховуємо миттєве значення струму конденсатора для канонічної гармоніки найбільшої величини.

На основі вищевикладеного і проведеного розрахунку була побудована модель паралельного силового активного фільтру, представлена на рис. 2.51.

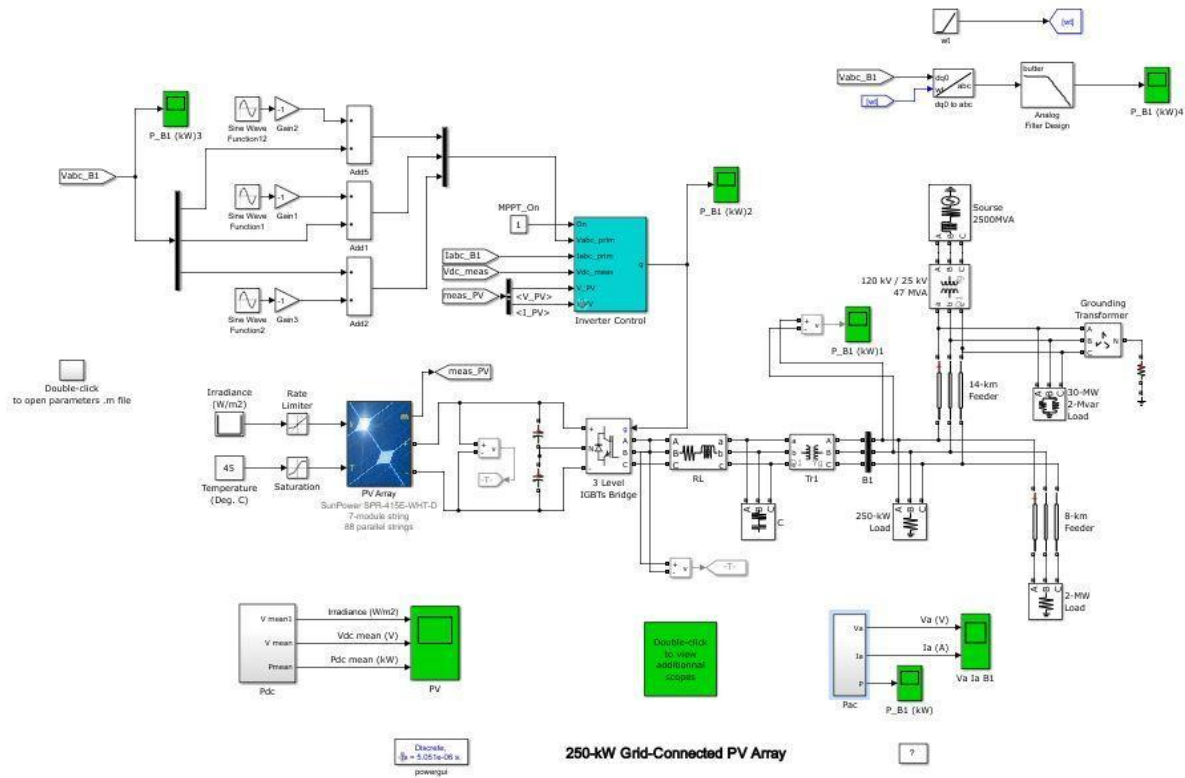


Рисунок 2.51 Модель паралельного силового активного фільтру

2.8 Результати моделювання

Були перевірені наступні режими роботи:

- підтримання напруги в режимі веденого;
- підтримання напруги в режимі ведучого;
- підтримання напруги з переходом з веденого в провідний;
- як активний фільтр.

Для деяких режимів були проведені незначні зміни моделі. Всі зміни стосувалися блоку «Керування інвертором».

2.8.1 Підтримка напруги в режимі веденого

Задіємо зворотні зв'язки по струму і напрузі (рис 2.52).

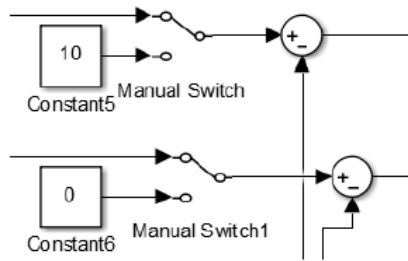


Рисунок 2.52 - Замкнутий контур струму

У момент часу $T = 0.05$ змінимо опір на навантаженні. Результат наведений на рис.2.53 та рис.2.54.

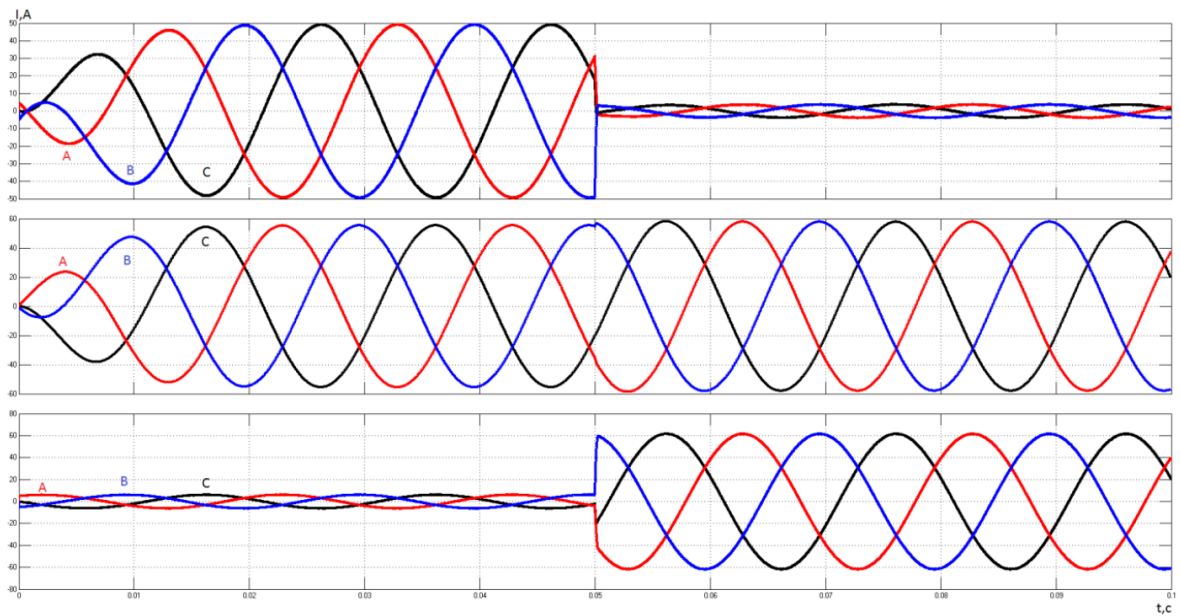


Рисунок 2.53 - Струм інвертора, генератора і навантаження.

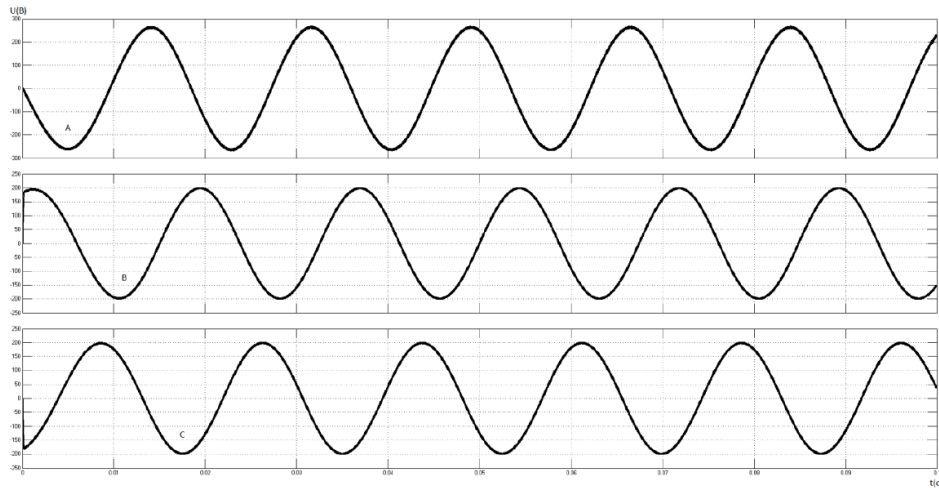


Рисунок 2.54 - Напруга на навантаженні.

2.8.2 Підтримка напруги в режимі ведучого

Перехід з режиму веденого в режим ведучого повинен проводитися по зовнішньому сигналу з верхнього рівня управління.

У даній моделі імітація сигналів була здійснена перемиканням з 0 на 1 для кожного режиму (рис.2.55).

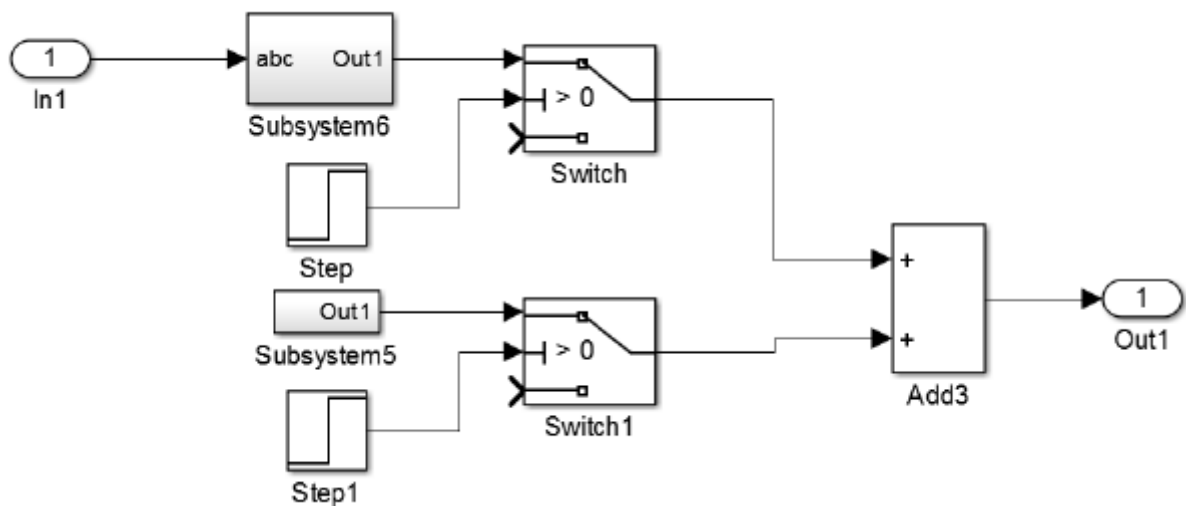


Рисунок 2.55 - Блок вибору режиму роботи.

Саме в даному досліді для здійснення роботи інвертора тільки в режимі ведучого ніяких перемикань не проводилося. Для режиму веденого постійно подавався 0, а для режиму ведучого постійно подавалася 1.

Нижче представлені (рис. 2.56 та рис. 2.57) значення струмів інвертора і навантаження. Генератор був від'єднаний від навантаження, тому ніяких струмів в мережу не віддавав.

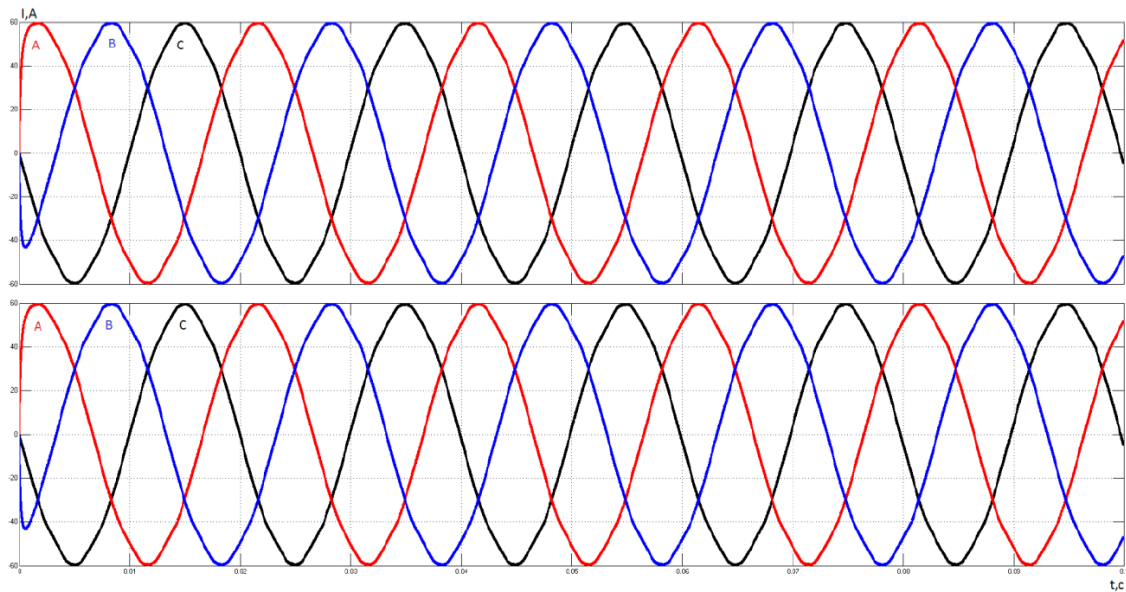


Рисунок 2.56 - Струми інвертора і навантаження.

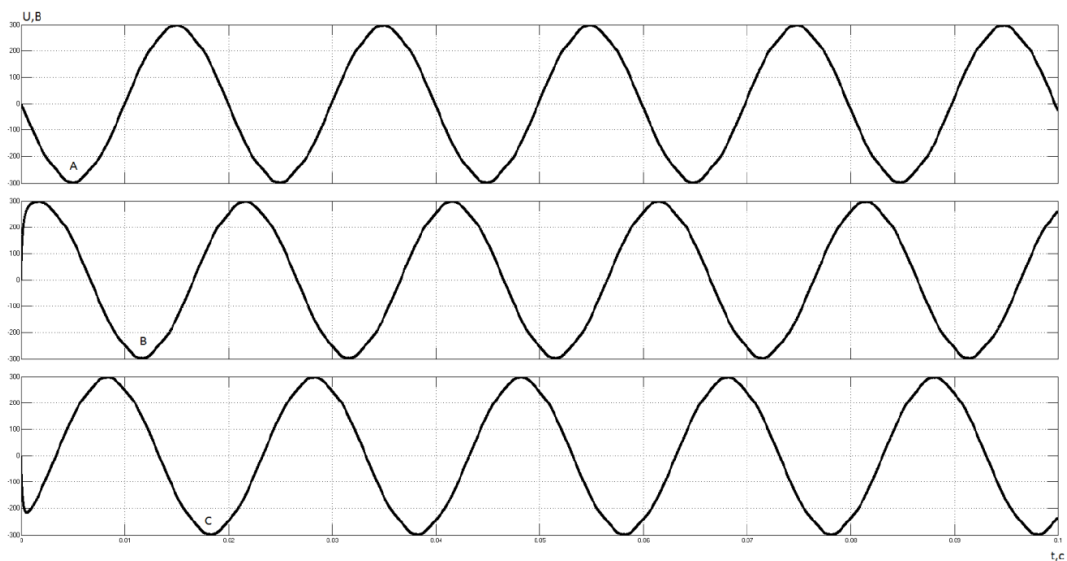


Рисунок 2.57 - Напруга на навантаженні.

2.8.3 Підтримка напруги з переходом з режиму ведучого в режим веденого

Трохи модифікувавши блок, який здійснює синхронізацію з мережею і завдання кута для формування синусів струму, створимо умови для перемикання інвертора в режим ведучого в середині моделювання, тобто в момент часу 0.05 с.

Також встановимо на виході генератора Three-Phase Breaker, який би спрацьовував при $t = 0.05$ с. Параметри Three-Phase Breaker представлені на рис.2.58.

The image shows the parameter block for a 'Three-Phase Breaker'. The title bar reads 'Three-Phase Breaker (mask) (link)'. Below the title, a description states: 'Implements a three-phase circuit breaker. When the external switching time mode is selected, a Simulink logical signal is used to control the breaker operation.' The 'Parameters' section includes: 'Initial status:' set to 'closed'; 'Switching of:' with checkboxes for 'Phase A', 'Phase B', and 'Phase C' all checked; 'Switching times (s):' set to '[1/60 5/60]' with an 'External' checkbox checked; 'Breaker resistance Ron (Ohm):' set to '0.01'; 'Snubber resistance Rs (Ohm):' set to '500'; 'Snubber capacitance Cs (F):' set to 'inf'; and 'Measurements' set to 'None'.

Parameter	Value
Initial status	closed
Switching of	Phase A, Phase B, Phase C
Switching times (s)	[1/60 5/60]
External	checked
Breaker resistance Ron (Ohm)	0.01
Snubber resistance Rs (Ohm)	500
Snubber capacitance Cs (F)	inf
Measurements	None

Рисунок 2.58 - Параметри вимикача.

У блоці для синхронізації і завдання кутів встановимо осцилограф Scope3 (рис. 2.59). Осцилограф дозволить нам спостерігати за режимами роботи.

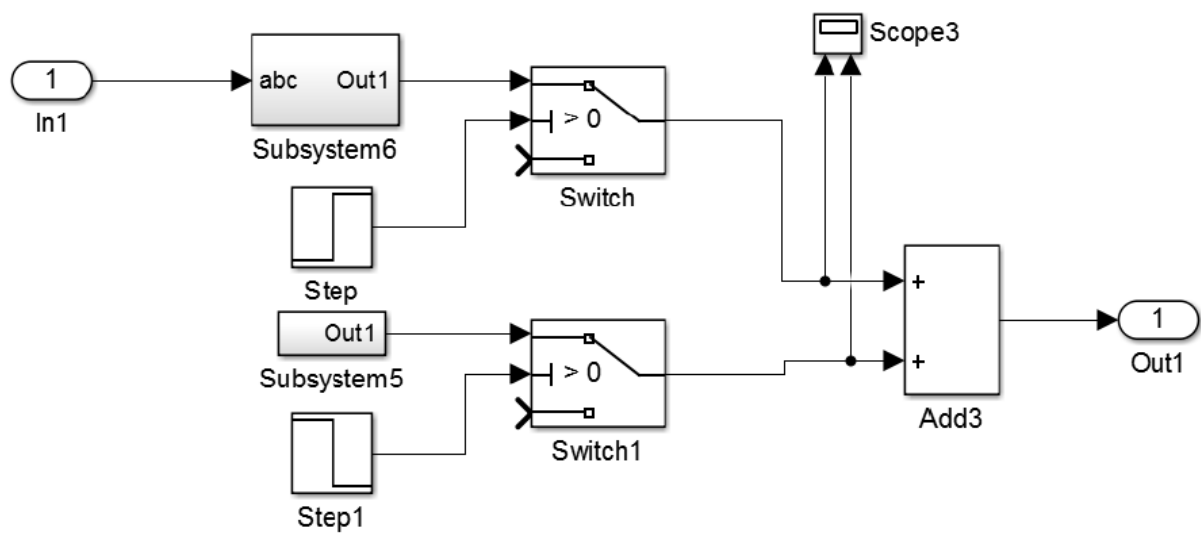


Рисунок 2.59 - Блок вибору режиму роботи.

У режимі веденого мережею на другому каналі осцилографа ми повинні спостерігати 0, а в режимі ведучого значення від 0 до 2π . У режимі ведучого все повинно бути навпаки.

Розглянемо графіки струмів інвертора, генератора і навантаження (рис.2.60).

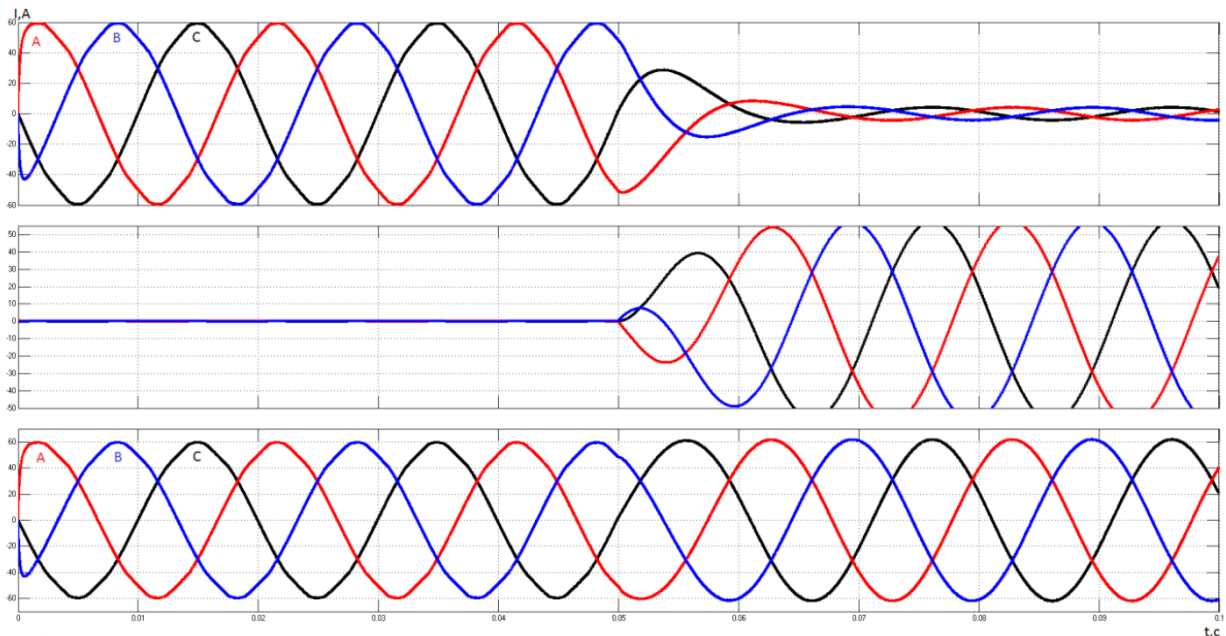


Рисунок 2.60 - Струми інвертора, генератора і навантаження.

До 0.05с генератор не віддавав енергію в мережу, і інвертор працював в режимі ведучого. При включенні генератора інвертор зменшив віддаються струми і переключився в режим веденого, про що свідчать дані з осцилографа Scope3 (рис.2.61).

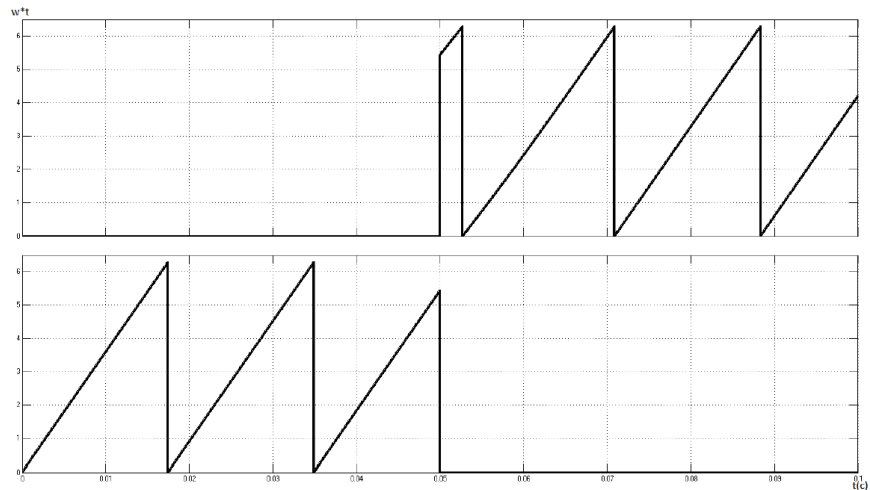


Рисунок 2.61 - Завдання кутів режиму ведучого і веденого.

Ніяких просадок по напрузі на навантаженні в момент перемикавання не спостерігалось (рис.2.62).

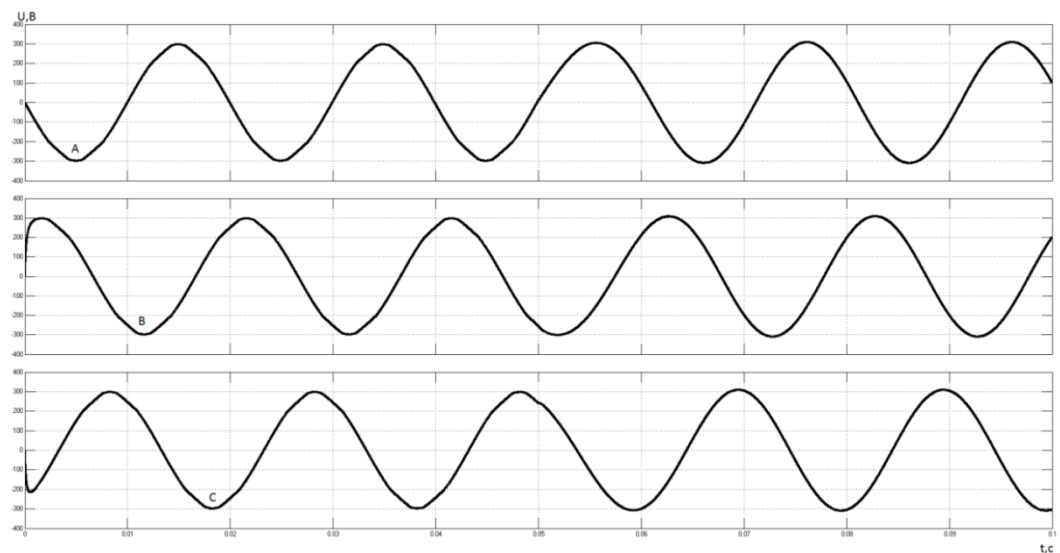


Рисунок 2.62 - Напруга на навантаженні.

2.8.4 Результати моделювання і порівняльний аналіз технічних засобів по покращенню якості електроенергії

Проаналізуємо результати з блок схеми моделі СЕС для мережі як активний фільтр представлений на рис. 2.63.

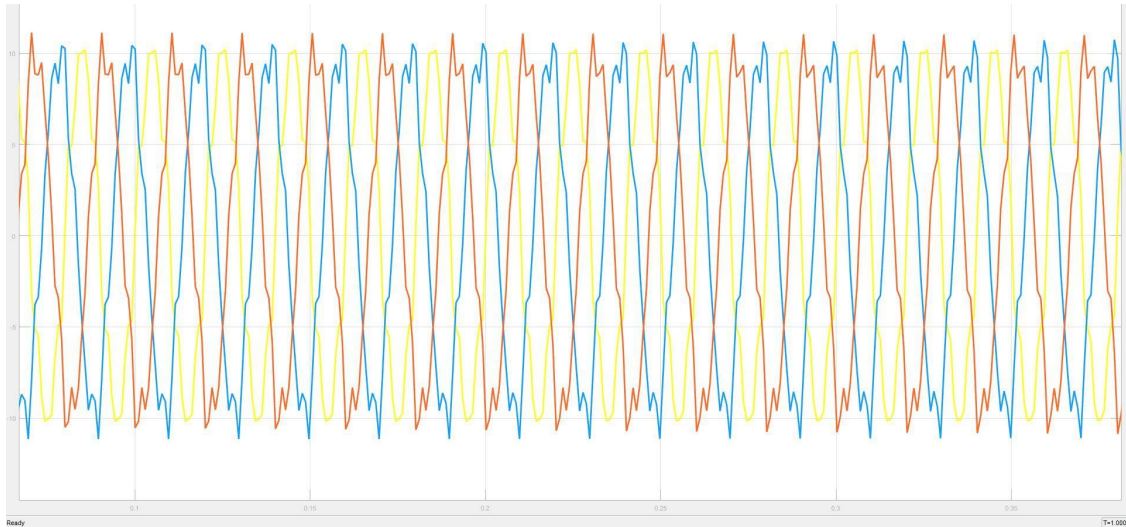


Рисунок 2.63 - Несинусоїдальність, що відбувається в мережі

Після введення на СЕС рівного, але протилежного гармонійному, струму компенсації отримали результат, що представлений на рис. 2.64.

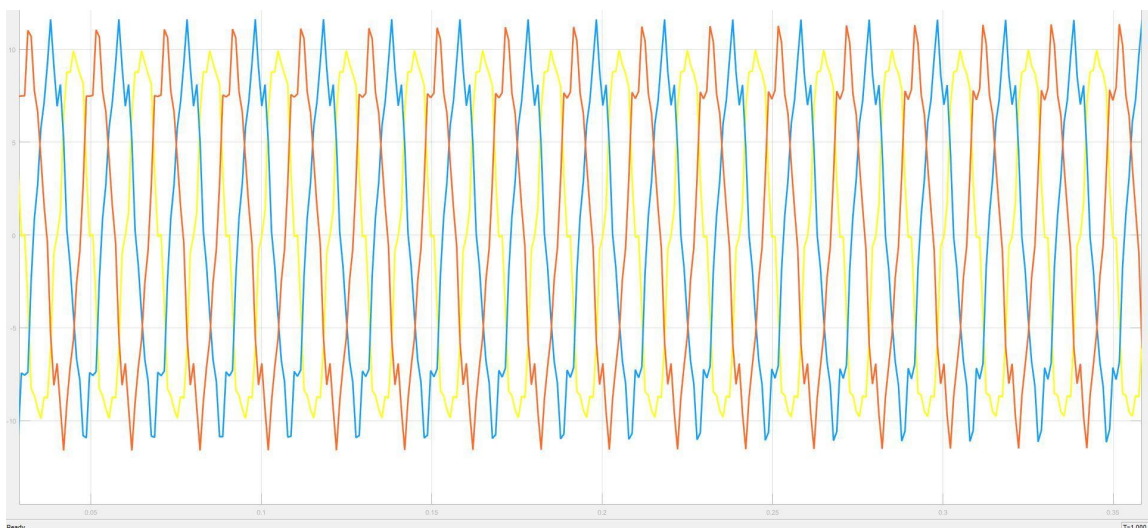


Рисунок 2.64 - Навантаження на СЕС, що генеруються із зсувом по фазі на 180

В результаті компоненти гармонійних струмів, що містяться в струмі навантаження придушуються під дією активного фільтру і струм джерела залишається синусоїдальним і у фазі з відповідною фазною напругою (рис.2.65).

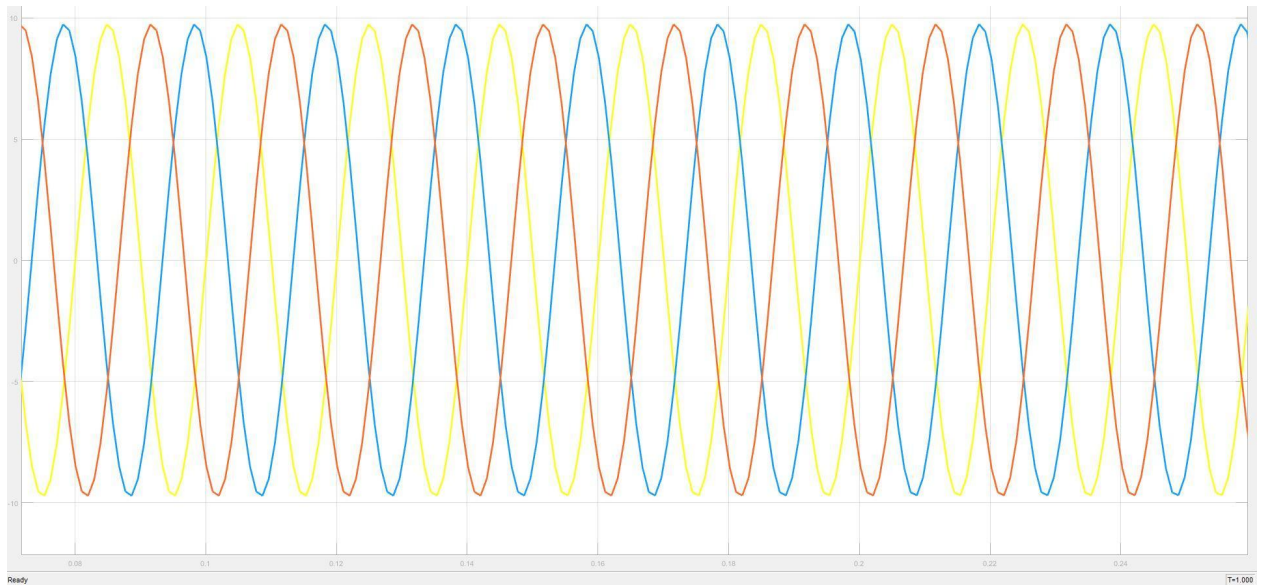


Рисунок 2.65 – Навантаження у споживача

Об'єднавши модель СЕС та блок схеми впровадження активного фільтру було отримано осцилограми струмів і спектральний склад гармонік до і після впровадження фільтру.

На рис.2.66 зображено струм однієї фази, який споживає нелінійне навантаження, і його гармонійний спектр до підключення фільтру.

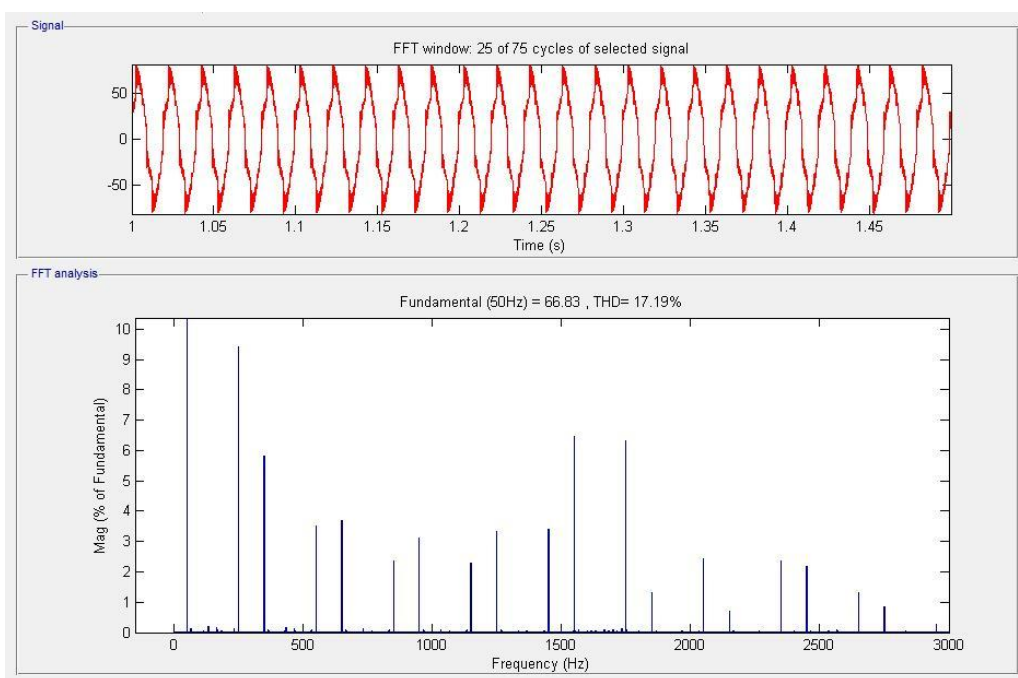


Рисунок 2.66 – Струм навантаження і спектр гармонік однієї з фаз до впровадження САФ

Частотний аналіз (FFT Analysis) струму показав, що коефіцієнт несинусоїдальності (THD) до підключення фільтру на навантаженні складає 17.19%, що виходить за гранично допустиме значення (12 %). Із спектру гармонік бачимо, що в кривій струму переважають гармоніки з частотами 250, 350, 550, 650, 850, 950 і т.д. Гц, що зумовлено характером нелінійного навантаження.

Як видно з рис. 2.67 частотний аналіз (FFT Analysis) струму показує, що коефіцієнт несинусоїдальності (THD) після підключення фільтру в мережі складає 2.54%, що не виходить за нормально допустиме значення (5%). Із спектру гармонік бачимо, що вищенаведені гармоніки були придушені.

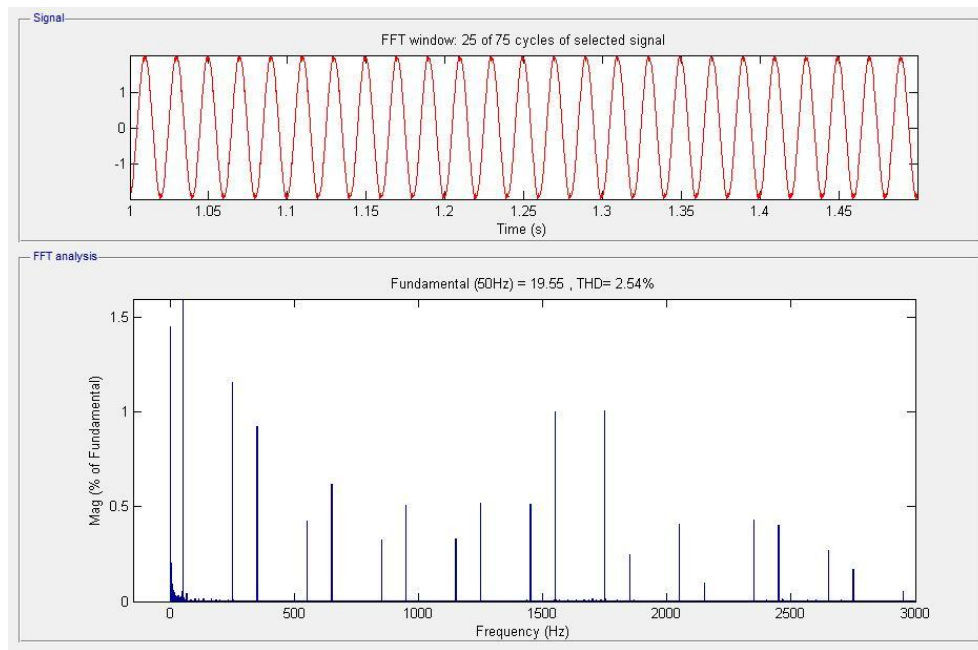


Рисунок 2.67 – Струм мережі і спектр гармонік однієї з фаз після впровадження САФ.

Застосування силового активного фільтру електроенергії дозволяє досягти значного покращення електромагнітної сумісності нелінійного споживача з живлячою мережею, що відображається на якості електроенергії і нормальному безаварійному режимі роботи енергосистеми в цілому.

3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Сонячна енергетика - одна з найперспективніших галузей відновлюваної (нетрадиційної) енергії. Про це свідчать високі темпи її розвитку як в Україні, так і у цілому світі.

В сучасних електричних мережах є проблеми з підвищеною втратою електроенергії за рахунок використання напівпровідникових приладів, які в свою чергу викликають появлення вищих гармонік.

В кваліфікаційній роботі було досліджено режими роботи напівпровідникового приладу – інвертора і як він впливає на показники якості електричної енергії. Результати показали, що при підключенні СЕС до мережі спостерігається несинусоїдальність напруги, що погіршує якість електроенергії у споживачів.

У розвитку науки і техніки, створенні новітніх технологій, підвищення енергетичної безпеки України, суттєва роль тут належить надійної і якісної поставки електричної енергії (ЕЕ) споживачам. В Україні почала функціонувати нова модель ринку ЕЕ, що представляє собою ринок двосторонніх договорів і балансуючий ринок (ДДБР). Одним із завдань нової моделі ринку є створення ринку функціонуючого для забезпечення стабільної та надійної роботи об'єднаної енергосистеми України, передачі і постачання ЕЕ належної якості [16].

Розглянемо економічну оцінку наслідків низької якості електричної енергії. Для здійснення заходів з підтримки якості енергії промислові підприємства змушені витратити значні матеріальні і грошові кошти. У зв'язку з цим важливим є техніко-економічне обґрунтування виділення таких коштів і, в першу чергу, визначення величини економічного збитку, що виникає від низької якості електроенергії.

В умовах ринкової економіки мережеве підприємство і споживач виступають, як рівні партнери, суб'єкти єдиного процесу розподілу і споживання ЕЕ [17].

Зміна ставлення до проблем ЯЕ як з боку енергопостачальних компаній, так і з боку електроспоживачів обумовлено перш за все тим, що при використанні ЕЕ низької якості підприємством і самої енергосистемою несуться втрати.

До проблеми енерго - і ресурсозбереження насамперед відноситься підвищення надійності електропостачання, так як раптове припинення харчування може привести до великих збитків у виробництві.

Іншою проблемою, що стала особливо актуальною в зв'язку з широким застосуванням перетворень на СЕС, підключених до систем електропостачання, є забезпечення необхідної якості електроенергії. Низька якість електроенергії призводить до збільшення втрат електроенергії як в електроприймачах, так і в мережі.

Економічні збитки формується під впливом трьох елементів:

- впливу;
- сприйняття;
- стану (відображає рівень нормативних економічних показників, що переводять натуральні показники в вартісні).

До елементу впливу в загальному випадку може бути віднесений обсяг втрачаються ресурсів (сировини, матеріалів, енергії, продукції, робочої сили, обладнання). Ця обставина робить актуальним диференціацію шкоди на складові, що враховують втрату певного виду ресурсів: від простою, невиробничого витрати або перевитрати робочої сили.

Фактори сприйняття є об'єктами, які потрапляють в зону збитків і сприймають його негативний вплив: елементи комунального господарства, елементи енергосистеми, основні фонди промисловості, транспорту, зв'язку.

До факторів стану відносяться економічні показники, які служать для перекладу величини збитку в вартості оцінки (наприклад, вартість різних робіт з утримання житлово-комунального господарства та міського громадського транспорту, необхідних для проживання 1 тис. Осіб; вартість 1 кВт-год недовідпущеної електроенергії; вартість 1 кВт-год встановленої потужності, вартість на 1 кВт).

Зазначені фактори при формуванні сумарного збитку виступають в нерозривному зв'язку, тобто про економічний збиток можна говорити тільки при наявності всіх трьох груп факторів.

Сумарну величину економічного збитку від зниження КЕ поділяють на дві складові: електромагнітну (що включає в себе збитки від зміни споживання активної та реактивної енергії і втрат активної потужності) і технологічну (в яку входять збитки від зміни продуктивності, браку продукції і зміни терміну служби установок, згідно експертними оцінками значення технологічного збитку на порядок вище електромагнітного) [18].

Коректна оцінка структури збитку вимагає точного фіксування, щодо яких саме явищ і подій та з урахуванням яких чинників він визначається.

Аналіз методичної бази щодо визначення шкоди дозволяє зробити наступний висновок за влучним висловом шкоди:

1. Економічні збитки від зниження якості електроенергії не має поки чіткого визначення не тільки в плані методів кількісного виміру, а й на змістовному рівні. Тому необхідне вироблення змістовного поняття збитку і його складових.
2. Економічні збитки - величина комплексна, до складу якої слід включати всі ті витрати електроенергетичних систем і промислових підприємств - споживачів енергії, викликані фактом порушення надійності електропостачання, які не відшкодовуються випуском продукції і отриманим прибутком.
3. Завдані збитки повинен бути прямим, безпосереднім і піддаватися вимірюванню.

4. Збиток як такої - величина детермінована. Методологія формування збитку вимагає чіткого формулювання: по відношенню до якого саме події чи явища він визначається, так як це впливає на склад входять до нього втрат і витрат.

5. Існуючі методики, що визначають економічний збиток, не задовольняють вимогам сучасного виробництва і умов ринкової економіки. У зв'язку з цим виникає необхідність створення методики економічної оцінки збитку, викликаного низькою якістю електроенергії та перервами в електропостачанні споживачів окремого регіону або області, а також методів оцінки прямого, непрямого і вторинного збитку від низької якості електропостачання різних категорій споживачів.

Для точного визначення наявності складових збитку від неякісної електроенергії в даній роботі недостатньо вихідної інформації. Економічну ефективність можливо визначити при наявності вихідних даних.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В ході виконаних експериментів було встановлено, що якщо СЕС працюватиме в автономному режимі створена модель показує, що при всіх режимах роботи інвертора на навантаженні спостерігається стабільна напруга. При зміні інвертором режиму роботи ніяких перепадів не спостерігалось. Були реалізовані режими роботи: підтримання напруги на навантаженні в режимі веденого, підтримання напруги на навантаженні в режимі ведучого.

При роботі СЕС з мережею норми якості електричної енергії не порушуються, а при перехідних режимах роботи ЕС порушуються по параметру коефіцієнту гармонійних складових напруги.

Послідовне або з невеликою різницею в часі неузгоджене між собою ввімкнення та вимкнення СЕС та потужних споживачів, призводить до зростання кількості та амплітуд гармонік в напрузі фаз ЕС та до затяжних перехідних процесів.

Гармонійні складові в напрузі ЕС негативно впливають на технічний стан високовольтного обладнання ЛЕС (особливо такою, яке відпрацювало паспортний ресурс), та можуть призвести до його пошкодження.

Тому для покращення показників якості електроенергії в мережі було розроблено модель блоку керування інвертора з фільтром від гармонійних складових. Результати моделі позитивні.

В економічному розділі було обґрунтовано економічну оцінку наслідків низької якості електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Західна маркетингова компанія. Ринок сонячної енергетики. 2019.
2. Впровадження сонячних електростанцій та дослідження їх впливу на роботу електроенергетичних систем. – 2017. – 20с.
3. Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью / Ф. Р. Исмагилов, Б. Н. Шарифов, Б. М. Гайсин, Т. Р. Терегулов, Н. Л. Бабкина - 2016. Т. 20 , № 4 (74). с. 71–79.
4. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. СПб: КОРОНА-принт 2001.320 с.
5. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЕС. / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько - УДК 621.316
6. Виссарионов В.И., Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, М.: 2004.-448 с.
7. Розанов Ю.К. Силовая электроника в системах с нетрадиционными источниками электроэнергии, 2002. - № 3.
8. Григораш О.В., Промышленная энергетика / Перспективный источник электроэнергии на базе торцевых синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов / О.В.Григораш, Е.Г.Вайнер, 2000. -№ 10. -с. 30-33.
9. Григораш О.В. Промышленная энергетика / Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В.Григораш, Ю.И.Стрелков, 2001- № 4. - с. 37-40
10. Гриценко А.И., Нетрадиционные возобновляемые источники энергии, М.: ВНИИГАЗ. - 1996.
11. Дьяков А.Ф. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития, М.: МЭИ. - 1996.

12. Кожарский Г.В., Методы автоматизированного проектирования источников вторичного электропитания, М.: Радио и связь. -1985. - 184 с.
13. Креймер А.С., Материалы научной конференции «Энергосберегающие технологии и процессы в АПК» / Использование аккумулирующих систем на ветроэлектростанциях, Краснодар, 2000. с. 47-48.
14. Инверторы напряжения. Принципы построения инверторов.
http://avtomobil.vipsekret.ru/a_avtomobil&invertori-napryageniya&4.htm
15. Academic Press. Power Electronics Handbook. 2001.
16. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Минск.: ИПК Изд-во стандартов. — 1998. — 30 с.
17. Качество электрической энергии Том 1 «Экономико-правовая база качества электрической энергии в Украине и Евросоюзе» / под редакцией Гриба О.Г. / Монография ПП «Граф-Ікс». Харьков: 2014г.-300 с.
18. Шидловский А.К. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения. / А.К.Шидловский, В.Г.Кузнецов, В.Г. Николаенко - К., 1981. - 48 с.