

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА РАХУНОК
ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ В
СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-2
Спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/Кирило ЗАЙЦЕВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/Ганна ГРІНЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки і електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти
здобувачу вищої освіти Кирилу ЗАЙЦЕВУ

1. Тема «Підвищення рівня енергетичної безпеки за рахунок використання фільтрокомпенсуючих пристроїв в системах електропостачання промислових підприємств» затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.
2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Параметри фільтрокомпенсуючих пристроїв; характеристики електричних мереж підприємства; показники реактивної потужності в системі до і після встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв.
4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. АКТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ЇХ РОЛЬ У ПОКРАЩЕННІ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ; РОЗДІЛ 2. МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В УМОВАХ ЗМІНИ ЗОВНІШНІХ І ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ; РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА СТРУКТУРИ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ СИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ; ВИСНОВКИ

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024 р.

Керівник

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Кирило ЗАЙЦЕВ

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	12.10.24 – 15.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	16.10.24 – 23.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	24.10.24 – 01.11.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	02.11.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Кирило ЗАЙЦЕВ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. АКТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ЇХ РОЛЬ У ПОКРАЩЕННІ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ

1.1. Вплив якості електричної енергії на електроустаткування електротехнічних комплексів

1.2. Наявні типи активних перетворювачів для поліпшення якості електричної енергії

1.3. Існуючі пристрої підвищення якості електроенергії на основі активних перетворювачів та фільтрокомпенсуючих пристроїв

1.4. Визначення, характеристики та властивості фільтрокомпенсуючих пристроїв з активними перетворювачами

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В УМОВАХ ЗМІНИ ЗОВНІШНІХ І ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ

2.1. Вибір типу та системи керування активними перетворювачами для покращення якості електроенергії

2.2. Оцінка необхідного рівня покращення якості електроенергії за допомогою фільтрокомпенсуючих пристроїв з активними перетворювачами

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА СТРУКТУРИ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ СИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1. Моделі основних структур фільтрокомпенсуючих систем із застосуванням активних перетворювачів

3.2. Моделювання покращення якості електроенергії за допомогою фільтрокомпенсуючих пристроїв з активними перетворювачами

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕ – електрична енергія
АП – активні силові перетворювачі
ФКП – фільтрокомпенсуючі пристрої
СЕП – системи електроснабження
ЕМС – електромагнітна сумісність
ЧРП - частотно-регулюємий електропривід
СТАТКОМ – пристрій статичної компенсації реактивної потужності
РП – реактивна потужність
НН – нелінійне навантаження
ЯЕЕ – якість електричної енергії
ВГ – вищі гармоніки
ЕТК - електротехнічні комплекси
ЕМК - електромеханічні комплекси
РГ - розподілена генерація
ЕММ - електромагнітні моменти
РПН - регулювання напруги під навантаженням
ФСП - фільтросиметруючі пристрої
ДКСН - динамічні компенсатори спотворення напруги
ШІМ - широтно-імпульсна модуляція
ВДТ - вольтододатковий трансформатор
СУ - система управління
ДБЖ - джерело безперебійного живлення
ТК - тиристорний комутатор
В – випрямляч
АКБ - акумуляторна батарея
УК - універсальний компенсатор
FACTS - Flexible Alternative Current Transmission Systems
СКРМ - статичні компенсатори реактивної потужності
ЕЗУ - електрозанурювальні установки

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему

«Підвищення рівня енергетичної безпеки за рахунок використання фільтрокомпенсуючих пристроїв в системах електропостачання промислових підприємств»

ЗАЙЦЕВА КИРИЛА

Магістерська робота виконана на ____ сторінок, містить ____ таблиць, ____ рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел.

Сучасні промислові підприємства пред'являють високі вимоги до надійності та якості електропостачання. Нестабільність електричної енергії та низька якість електроенергії можуть призвести до значних економічних втрат, збоїв у роботі обладнання та навіть аварій. Одним із ефективних рішень для підвищення рівня енергетичної безпеки є використання фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП). Дана магістерська робота присвячена дослідженню впливу ФКП на стабільність та якість електропостачання промислових підприємств.

Метою роботи є розробка та впровадження фільтрокомпенсуючих пристроїв у системах електропостачання промислових підприємств для підвищення рівня енергетичної безпеки та ефективності роботи електричних мереж.

В роботі використовувалися методи аналізу літературних джерел, математичного моделювання, експериментальні дослідження та економічний аналіз.

Проведено аналіз сучасних методів компенсації реактивної потужності, що показав високу ефективність ФКП для покращення якості електроенергії.

Досліджено вплив гармонік і несиметрії напруги на роботу електроустаткування промислових підприємств, що підтвердило необхідність використання ФКП.

Проаналізовано модель системи електропостачання з ФКП, яка дозволила провести детальний аналіз їх впливу на стабільність і якість електропостачання.

На основі проведених експериментів було підтверджено ефективність використання ФКП для зниження гармонічних спотворень та поліпшення показників стабільності напруги.

Економічний аналіз показав, що впровадження ФКП на промислових підприємствах є економічно доцільним і сприяє зниженню витрат на електроенергію.

Використання фільтрокомпенсуючих пристроїв у системах електропостачання промислових підприємств є ефективним заходом для підвищення рівня енергетичної безпеки. ФКП дозволяють значно покращити якість електроенергії, знизити ризики аварій і збоїв, а також зменшити витрати на електроенергію. Впровадження рекомендацій, розроблених у рамках даної роботи, сприятиме стабільній і надійній роботі промислових підприємств у сучасних умовах.

ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧІ ПРИСТРОЇ,
СТАБІЛЬНІСТЬ НАПРУГИ, ГАРМОНІЧНІ СПОТВОРЕННЯ, НЕСИМЕТРІЯ
НАПРУГИ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

ABSTRACT

to a master's thesis on

«Improving energy security through the use of filter compensating devices in power supply systems of industrial enterprises»

ZAITSEV KYRYLO

The master's work is executed on ____ pages, contains ____ tables, ____ drawings, which characterize the results of research, additions, used literary sources.

Modern industrial enterprises have high requirements for the reliability and quality of electricity supply. Instability of electricity and low quality of electricity can lead to significant economic losses, equipment failures and even accidents. One of the effective solutions for increasing the level of energy security is the use of filter compensating devices (PCF). This master's work is devoted to the study of the impact of PCF on the stability and quality of power supply to industrial enterprises.

The purpose of the work is to develop and implement filter compensating devices in power supply systems of industrial enterprises to increase the level of energy safety and efficiency of electrical networks.

The work used methods of analysis of literary sources, mathematical modeling, experimental research and economic analysis.

An analysis of modern methods of reactive power compensation was carried out, which showed the high efficiency of PCF to improve the quality of electricity.

The influence of harmonics and voltage asymmetry on the operation of electrical equipment of industrial enterprises is investigated, which confirmed the need to use PCF.

The model of the power supply system with PCF was analyzed, which allowed for a detailed analysis of their impact on the stability and quality of power supply.

Based on the experiments conducted, the effectiveness of using PCF to reduce harmonic distortion and improve voltage stability was confirmed.

Economic analysis has shown that the introduction of PCF at industrial enterprises is economically feasible and helps to reduce energy costs.

The use of filter compensating devices in power supply systems of industrial enterprises is an effective measure to increase the level of energy security. PCFs can significantly improve the quality of electricity, reduce the risks of accidents and failures, and reduce energy costs. The implementation of the recommendations developed within the framework of this work will contribute to the stable and reliable operation of industrial enterprises in modern conditions.

ENERGY SAFETY, FILTER COMPENSATING DEVICES, VOLTAGE
STABILITY, HARMONIC DISTORTION, VOLTAGE ASYMMETRY,
EFFICIENCY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

ВСТУП

Актуальність.

В даний час одним із ключових факторів успішного розвитку промисловості є розробка та створення досконалих електротехнічних комплексів (ЕТК) та систем, застосування яких забезпечить підвищення рівня енергозбереження та енергетичної ефективності на всіх стадіях виробничих процесів. Активні силові перетворювачі (АП), реалізовані на елементах сучасної силовій електроніки та виконують різні функції в залежності від сфери застосування, спільно з фільтрокомпенсуючими пристроями (ФКП) утворюють єдиний ЕТК. В умовах сучасних промислових систем електропостачання (СЕР) ФКУ з АП набули широкого поширення для виконання функцій підвищення якості електричної енергії (ЯЕЕ) та забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) електрообладнання, компенсації реактивної потужності, керування параметрами електромеханічних комплексів (ЕМК) із частотно-регульованим електроприводом (ЧРП), забезпечення паралельної роботи автономних джерел загальне навантаження. Завдяки такому широкому функціональному набору подібні ЕТК нині є невід'ємною частиною СЕР та електричних мереж будь-якої структури та складності, особливо в умовах підприємств нафтогазової промисловості.

В даний час одним із ключових факторів успішного розвитку промисловості є розробка та створення досконалих електротехнічних комплексів (ЕТК) та систем, застосування яких забезпечить підвищення рівня енергозбереження та енергетичної ефективності на всіх стадіях виробничих процесів. Активні силові перетворювачі, реалізовані на елементах сучасної силовій електроніки та виконують різні функції в залежності від сфери застосування, спільно з фільтрокомпенсуючими пристроями утворюють єдиний ЕТК. В умовах сучасних промислових систем електропостачання ФКП з АП набули широкого поширення для виконання функцій підвищення якості електричної енергії та забезпечення електромагнітної сумісності

електрообладнання, компенсації реактивної потужності, керування параметрами електромеханічних комплексів із частотно-регульованим електроприводом, забезпечення паралельної роботи автономних джерел загальне навантаження. Завдяки такому широкому функціональному набору подібні ЕТК нині є невід'ємною частиною СЕП та електричних мереж будь-якої структури та складності, особливо в умовах нафтогазових підприємств.

Необхідність формування комплексного наукового підходу до проблеми підвищення якості електричної енергії та забезпечення електромагнітної сумісності електрообладнання в електричних мережах різної структури за наявності несинусоїдальних режимів як з боку джерел електроенергії (централізованих чи автономних), так і з боку підключеного нелінійного навантаження обумовлена безліччю чинників, особливо у умовах нафтогазових підприємств. Наявність низки сучасних активних перетворювачів підвищення ЯЕЕ різного функціонального призначення, не охопленого єдиними теоретичними положеннями та методологією синтезу, вибору, розрахунку, аналізу та застосування, такі як пристрої статичної компенсації реактивної потужності (СТАТКОМ), динамічні компенсатори спотворення напруги, універсальні компенсатори, активні випрямлячі, активні та гібридні фільтри) робить їх застосування недостатньо ефективним при підвищенні ЯЕЕ.

Існує велика кількість методів та алгоритмів управління активними перетворювачами, спрямованих на вирішення вузьких спеціалізованих завдань за певної сукупності умов без єдиної теоретичної та методологічної бази, що не дозволяє реалізувати масштабніше застосування подібних перетворювачів як окремо, так і у складі фільтрокомпенсуючих пристроїв. Наявність додаткових втрат енергії в електрообладнанні (трансформаторах, електричних машинах) через наявність вищих гармонік струму та напруги (до 25 % від сумарних втрат) потребує системного науково-обґрунтованого застосування сучасних багатофункціональних технічних засобів та рішень щодо підвищення КЕ, включаючи ФКП з АП.

Розвиток технологій комбінованого електропостачання на основі паралельної роботи централізованих та автономних джерел розподіленої генерації (РГ), для якого не визначено норм ЯЕЕ та ЕМС, визначає необхідність науково-обґрунтованого застосування технічних засобів автоматизованої корекції КЕ, включаючи ФКП з АП, в умовах варіації величин показників ЯЕЕ (ПЯЕЕ), виходячи з режиму електропостачання та характеру підключеного навантаження. Низька ефективність використання АП для підвищення ЯЕЕ без додаткових ФКП, згідно з результатами експериментальних досліджень, визначає необхідність розвитку теорії синтезу та застосування електротехнічних комплексів ФКП з АП.

В умовах сучасного світу, де енергетичні ресурси відіграють ключову роль у забезпеченні економічного зростання та стабільності, питання енергетичної безпеки набуває особливого значення. Промислові підприємства, які є основними споживачами електроенергії, стикаються з численними викликами у сфері забезпечення надійного та безперебійного електропостачання. Однією з актуальних проблем, що впливають на якість електроенергії та ефективність її використання, є гармонійні спотворення та реактивна потужність.

Фільтрокомпенсуючі пристрої відіграють важливу роль у підвищенні рівня енергетичної безпеки та забезпеченні стабільності електропостачання промислових підприємств. Вони дозволяють ефективно знижувати рівень гармонійних спотворень, компенсувати реактивну потужність та підвищувати якість електроенергії, що постачається до споживачів. Використання таких пристроїв сприяє зменшенню втрат електроенергії, підвищенню надійності роботи електрообладнання та зниженню витрат на енергоносії.

Актуальність дослідження визначається необхідністю підвищення ефективності та надійності систем електропостачання промислових підприємств в умовах зростаючих вимог до якості електроенергії та забезпечення енергетичної безпеки. Вибір теми обумовлений потребою у

розробці та впровадженні ефективних методів та засобів компенсації реактивної потужності та зниження гармонійних спотворень.

Об'єкт дослідження - системи електропостачання промислових підприємств.

Предмет дослідження - вплив фільтрокомпенсуючих пристроїв на рівень енергетичної безпеки та якість електроенергії в системах електропостачання промислових підприємств.

Мета роботи полягає у дослідженні впливу фільтрокомпенсуючих пристроїв на підвищення рівня енергетичної безпеки систем електропостачання промислових підприємств та розробці рекомендацій щодо їх ефективного використання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- ✓ Аналіз сучасного стану систем електропостачання промислових підприємств та визначення основних проблем, пов'язаних з гармонійними спотвореннями та реактивною потужністю.

- ✓ Дослідження впливу фільтрокомпенсуючих пристроїв на якість електроенергії та надійність роботи електрообладнання.

- ✓ Розробка методичних підходів до впровадження фільтрокомпенсуючих пристроїв у системи електропостачання промислових підприємств.

Очікувані результати дослідження дозволять підвищити рівень енергетичної безпеки та ефективність використання електроенергії на промислових підприємствах, що сприятиме їх стабільному розвитку та економічному зростанню.

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Підвищення рівня енергетичної безпеки за рахунок використання фільтрокомпенсуючих пристроїв в системах електропостачання промислових підприємств» складається з таких частин: перелік умовних позначень, вступ, три розділи, висновки, список посилань.

РОЗДІЛ 1. АКТИВНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ЇХ РОЛЬ У ПОКРАЩЕННІ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ

1.1. Вплив якості електричної енергії на електроустаткування електротехнічних комплексів

Вищі гармонічні складові струму та напруги

Достовірно відомо та відображено у численних вітчизняних та міжнародних науково-технічних публікаціях, що вищих гармонік струму та напруги надають негативний вплив на різні типи електроустаткування.

Такі впливи визначаються типом підключеної ПН, її потужністю, режимом роботи, а також наявністю вищих гармонік струму напруги з боку передвключеної мережі та поділяються на два типи: миттєві та тривалі впливи.

Тривалі впливи пов'язані з підвищенням температури обмоток і струмопровідних частин електрообладнання, включаючи навантаження нейтрального провідника в чотирипровідних системах. При цьому додаткові втрати енергії в електроустаткуванні залежать від рівня та порядку ВГС, що відображено спеціальними інтегральними коефіцієнтами.

Основними миттєвими впливами вищих гармонік струму та напруги є:

підвищені вібрація і шум при роботі СТ і ЕМ, що обертаються, перешкоди при роботі систем захисту, управління, автоматики та зв'язку, а також резонансні явища.

$$\begin{aligned} k_1 &= \sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \cdot \frac{\sqrt{n} + \sqrt{n+1}}{n^2}; \quad k_2 = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{U_n^2}{n\sqrt{n}} \\ k_3 &= \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{n} \cdot I_n^2; \quad k_4 = \sum_{n=2}^{\infty} n \cdot U_n^2 \end{aligned} \quad (1.1.)$$

Електродинамічні сили і магнітні поля в СТ і ЕМ, що обертаються, створюються за рахунок струмів, що протікають в їх обмотках. Якщо ці струми містять вищих гармонік струму, створюються пульсуючі магнітні поля та електромагнітні моменти (ЕММ), що викликають додаткову вібрацію та шум при роботі СТ та ЕМ. Дані факти також пов'язані з поняттям

«електромеханічна сумісність електрообладнання», яке докладно розкрито в наукових працях.

Визначено закономірності зміни кратності зниження терміну служби γ в залежності від сумарного коефіцієнта гармонік напруги k_U для різних електроустановок, отримані за результатами експериментальних досліджень у мережах промислових підприємств. Дані закономірності показують, що зі зростанням рівня вищих гармонік струму напруги найінтенсивніше термін служби зменшується для СТ та КП. У цьому термін служби ЛЕП мало змінюється. Таким чином, з точки зору негативного впливу вищих гармонік струму на термін служби найбільш чутливими типами електрообладнання в умовах промислових підприємств є КП і СТ.

Параметри несинусоїдальних режимів, які є в електричних мережах і мають різну причину виникнення, визначають характер негативного впливу вищих гармонік струму на електроустановки, вимоги до технічних засобів рішень щодо компенсації вищих гармонік струму. В умовах комбінованих СЕП, коли відбувається зміна режиму енергозабезпечення в аварійних ситуаціях, а також пов'язана з цим кількість і тип підключеного навантаження, технічні засоби та рішення щодо компенсації вищих гармонік струму повинні мати властивість багатофункціональності, гнучкості та адаптивності до безперервно мінливої сукупності факторів. У цьому випадку на передній план виступають ФКП з АП підвищення ЯЕЕ, які відповідають усім зазначеним вимогам.

Відхилення напруги

Результати комплексного аналізу фактичних графіків напруги в розподільних електричних мережах промислових підприємств нафтогазової галузі показали, що за наявності відхилень напруги на межах розділу електричних мереж постачальника та споживача відповідно до ГОСТ 32144-2013 забезпечити оптимальні за встановленими критеріями режими напруги у лінійного навантаження (ЛН) та ПН з використанням традиційних методів, включаючи відомі засоби групового та місцевого регулювання, зосереджені в

одній точці мережі, неможливо. Це пов'язано в першу чергу з нерівномірністю розподілу вузлів з ЛН та ПН вздовж живильних ліній та по всій розподільній мережі, що вимагає впровадження нових і багатофункціональних пристроїв, включаючи ФКП з АП.

Управління режимом напруги в кінці ЛЕП при заданому навантаженні може здійснюватись наступними методами:

- ✓ регулювання напруги на початку ЛЕП;
- ✓ регулювання коефіцієнта трансформації СТ, включеного на початку ЛЕП;
- ✓ зміна індуктивного опору ЛЕП (поздовжня ємнісна компенсація);
- ✓ зміни активного опору ЛЕП; зміна потоку реактивної потужності в ЛЕП (поперечна ємнісна компенсація).

В наукових дослідженнях дана оцінка ефективності способів управління режимом напруги і представлено їх ранжування на основі результатів моделювання за умов варіації численних чинників. Виявлено величини регулюючих ефектів в умовах варіації численних факторів (таблиця 1.1), які показують, що в порядку зменшення рангу «найефективнішими способами регулювання напруги в кінці ЛЕП U_2 є зміна коефіцієнта трансформації K_T , зміна напруги на початку ділянки U_1 , зміна потоку реактивної потужності Q_0 , зміна індуктивного опору ділянки $X_{\text{СЕП}}$ ».

Таблиця 1.1. - Дані щодо регулюючих ефектів і втрат напруги

№ з\п	Незалежні	Регулюючі ефекти		ΔU_2	
	Змінні	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
1	K_T	1,002	1,415	0,3006	0,3822
2	U_1	0,969	1,270	0,2906	0,3476
3	Q_0	0,076	0,325	0,0330	0,2047
4	$X_{\text{СЕП}}$	0,200	1,958	0,0218	0,1938
5	P_0	0,0087	0,155	0,0061	0,0758
6	$R_{\text{СЕП}}$	0,075	1,945	0,0015	0,0447

Найбільш поширеними споживачами для умов промислових підприємств є АТ з короткозамкненим ротором, які як найбільш енергоємні та найбільш відповідальні електроприймачі (ЕП), реалізують усі основні стадії технологічного процесу. В умовах промислових підприємств на характеристики АТ впливає ціла низка факторів, серед яких ключове місце займає відхилення рівня напруги від номінального значення. У разі тривалого зниження напруги механічна характеристика АТ зміниться і станеться погіршення продуктивності технологічного обладнання, крім того, запуск АТ при зниженій напрузі (U_2), коли ковзання близько 1, неможливе.

Таким чином, величина напруги безпосередньо впливає на значення електромагнітного моменту АТ, ступінь зниження терміну служби, рівень втрат енергії в обмотках, ймовірність перекидання АТ.

Таким чином, для забезпечення сталої роботи АТ та технологічного обладнання необхідно передбачати ефективні багатофункціональні технічні засоби для керування режимом напруги у вузлах навантаження. Дані засоби повинні мати властивість адаптивності до змінного характеру режиму енергоспоживання залежно від стадій технологічного процесу.

Також з розвитком технологій комбінованого електропостачання (ЦЕС + РГ), крім використання регулювання напруги під навантаженням (РПН), як методу централізованого регулювання, потрібно передбачати способи місцевого регулювання особливо для мереж складної конфігурації, у ролі яких можуть виступати ФКП з АП.

Несиметрія мережі живлення та підключеного навантаження

Несиметричні режими, що виникають у трифазних системах, можуть бути тривалими, зумовленими наявністю несиметрії в елементах електричної мережі, та короткочасними через аварійні процеси в СЕП.

Причини несиметрії можуть виходити від джерел живлення, неповнофазних режимів елементів електричних мереж, ЕП із різними навантаженнями по фазах. Як правило, практично всі реальні потужні споживачі електроенергії працюють у режимах пофазної асиметрії

навантажень за великих величин вищих гармонік струму внаслідок нелінійності їх характеристик. Аналогічне справедливо при пофазному завантаженні виробничих мереж переважно через вплив імпульсних джерел живлення персональних комп'ютерів, нерівномірне завантаження мереж тощо підвищуються втрати енергії в СЕП та виникають значні спотворення форми напруги, що погіршують умови роботи інших ЕП.

Велика кількість ЕП, підключених до мереж низької напруги, може бути однофазними з випадковими графіками навантажень. При цьому розрізняють два види несиметрії струмів: не випадкову несиметрію, що визначається нерівномірним підключенням ЕП по фазах, а також ймовірнісну несиметрію, викликану випадковими подіями.

Несиметрія також поділяється на поздовжню, пов'язану з пофазним відключенням ЛЕП та СТ, і поперечну, обумовлену несиметрією навантажень по фазах.

Основним негативним впливом несиметрії є значне зниження терміну служби ЕМ і СТ, що обертаються. Наприклад, при тривалій роботі АТ з коефіцієнтом несиметрії по зворотній послідовності від 2 до 4% термін служби АТ знижується в середньому на 10...15%, а якщо АТ працює при номінальному навантаженні, термін служби може знизитися вдвічі. Причина цього - додаткове нагрівання за рахунок витрати додаткової електроенергії, що також знижує ККД електроустаткування. При цьому частота обертання АТ дещо знижується, зростають вібрація валу та шум. Виходячи з цього, повне завантаження артеріального тиску допускається тільки при коефіцієнті несиметрії по зворотній послідовності напруги не більше 1%. При 2% завантаження має бути знижено до 96 %, при 3 % – до 90 %, при 4 % – до 83 % тощо.

Несиметрія спричиняє порушення у роботі трифазних силових випрямлячів. Через різницю фазних напруг значно збільшуються пульсації випрямленої напруги. Несиметрія також негативно впливає на режим імпульсно-фазового управління силовими тиристорними

перетворювачами. При несиметрії напруг відбувається нерівномірне завантаження КП по фазах, що збільшує несиметрію навантаження, генеруючи велику реактивну потужність фазах, де вище напруга та менше навантаження. Системи освітлення функціонують у ненормальних умовах, оскільки частина ламп працює зі зниженим світловим потоком, а інша частина - швидко перегорає, через різницю напруги по фазах.

Проведені аналітичні та експериментальні дослідження підтверджують, що в мережах низької напруги в нормальному режимі струмова несиметрія є фактором, що постійно діє. У разі підключення ПН виникає додаткова несиметрія, обумовлена вищими гармоніками струму. При симетричному режимі струми вищих гармонік струму порядку $3k+1$ (k – будь-яке ціле число) становлять прямий порядок чергування фаз, струми вищих гармонік струму $3k+2$ – зворотний і $3k$ – нульовий. Якщо система фазних струмів кожної з вищими гармоніками струму стає несиметричною по амплітуді та фазі і може бути представлена у вигляді симетричних складових всіх трьох послідовностей, вважають, що є несиметрія вищих гармонік струму. Виходячи з цього при розкладанні несиметричних вищих гармонік струму наявність зворотної та нульової послідовностей характеризуватиме несиметрію вищих гармонік струму $3k + 1$, наявність прямої та нульової – несиметрію вищих гармонік струму $3k + 2$, а прямої та зворотної – несиметрію вищих гармонік струму, кратних трьох. Тому за наявності нульової або зворотної послідовностей у трифазних мережах за наявності ПН виникає зсув струму по фазах – несиметрія вищих гармонік струму.

Для зменшення впливу несиметрії напруги проводиться симетрування напруги, при цьому спеціальні додаткові симетруючі пристрої використовуються лише в тих випадках, коли виявляються недостатніми такі заходи:

- ✓ підключення несиметричних навантажень на ділянках мережі з більшою потужністю КЗ;

- ✓ виділення несиметричних навантажень значної потужності деякі СТ;
- ✓ рівномірний розподіл однофазних навантажень по всіх фазах.

Рівномірний пофазний розподіл навантажень не завжди забезпечує несиметрію напруги в допустимих межах. Це з тим, що ряд електротермічних установок за умовами технологічного процесу експлуатації перебуває у роботі непостійно. За наявності несиметрії (K_{2U} більше 2 %) та за недостатньої ефективності прийнятих рішень здійснюється симетрування навантаження додатковими симетруючими пристроями, які виконують наступні функції: симетрування навантажень та компенсація реактивної потужності.

Пасивні симетруючі пристрої класифікуються на керовані та некеровані, виходячи із показників графіків електричного навантаження. На даний момент створено значну кількість структур пасивних симетруючих пристроїв з електричними та електромагнітними зв'язками між елементами. При різко змінному навантаженні зі змінною несиметрією по фазах і, крім того, що генерує вищі гармоніки струму, пасивні пристрої не здатні ефективно реалізувати симетрування.

Прикладами таких навантажень можуть бути дугові та рудотермічні печі, зварювання, залізничний транспорт на змінному струмі. Це зазвичай потужні споживачі і проблема підвищення ЯЕЕ в мережах живлення таких споживачів важлива і актуальна.

Для підвищення КЕ та одночасно компенсації реактивної потужності можна використовувати багатофункціональні фільтросиметруючі пристрої (ФСП). ФСП побудовано на основі СТК, тиристорних ключів, лінійних реакторів та регульованих КП. ФСП мають достатню швидкодію, захищені від вищих гармонік струму і не містять частин, що обертаються. Зазначені обставини роблять ФСП кращими, ніж швидкодіючі синхронні компенсатори та нерегульовані КП. Також у як ФСП необхідно розглядати ФКП з АП. При цьому джерело виникнення несиметрії визначає вимоги до ФКП з АП щодо

вибору системи управління, способу і точки підключення до мережі, що компенсується.

1.2. Найвні типи активних перетворювачів для поліпшення якості електричної енергії

Принцип традиційних неактивних технічних засобів та рішень, спрямованих на корекцію ЯЕЕ, таких як пасивні ФКП, що згладжують реактори, спеціальне з'єднання обмоток СТ, вольтододаткові СТ та інші, полягає у зміні опору, придушенні вищій гармоніки струму певного порядку до заданої величини та зсуву їх фази на 180° .

АП підвищення ЯЕЕ – це статичні електротехнічні пристрої, в основі яких лежать щонайменше один АП змінного/постійного струму або перетворювач частоти (ПЧ), один накопичувальний елемент, один вхідний/вихідний ПФ та система керування. У цьому режимі роботи силових елементів АП визначається алгоритмом, закладеним у систему управління залежно від основного функціонального призначення АП. Це узагальнююче визначення стосовно до абсолютної більшості існуючих та технічно реалізованих АП, які класифікуються за такими основними ознаками:

- ✓ числу АП, режиму роботи АП (випрямляч, інвертор);
- ✓ пульсності АП (шестипульсний, дванадцятипульсний і тощо), типу АП з точки зору характеру вихідної величини, що генерується (джерело струму або напруги заданої величини і гармонійного складу);
- ✓ режиму підвищення ЯЕЕ (пригнічення вищих гармонік струму чи напруги, компенсація провалів, відхилень, несиметрії напруг тощо.);
- ✓ можливості з'єднання з пасивними елементами чи пасивними ФКП;
- ✓ виду накопичувального елемента; можливості підвищення коефіцієнта потужності першої гармоніки.

АП підвищення ЯЕЕ на основі різного типу силових статичних перетворювачів, побудованих на базі сучасних силових напівпровідникових

приладів IGBT, IGCT, IEGT, GTO та GCT, забезпечують більш ефективну компенсацію вищих гармонік струму та напруги, корекцію коефіцієнта потужності мережі, управління режимом напруги та усунення несиметрії за іншим принципом. Серед основних відомих типів АП корекції реактивної потужності, несиметрії, вищі гармоніки струму та напруги мережі та пристроїв на їх основі слід виділити ПСАФ та ПАФ, АВ, СТАТКОМ і ДКСН (динамічні компенсатори спотворення напруги).

Основні типи активних фільтрів

Активний фільтр (АФ) – це АП змінного/постійного струму, який генерує методами широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) струм або напруга заданої величини та гармонійного складу відповідно до певного методу управління. На рисунку 1.1 наведено спрощені схеми АФ у вигляді джерела напруги та струму.

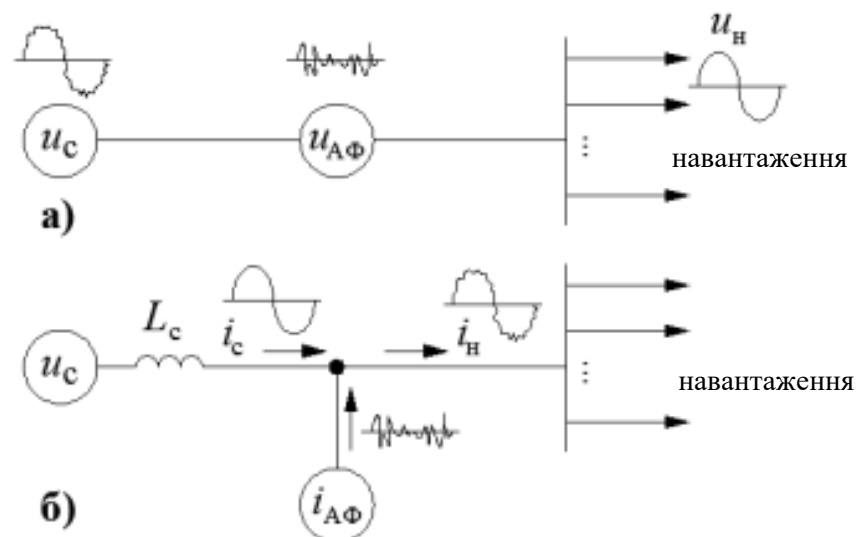


Рисунок 1.1 - Схема включення АФ: а – послідовне АФ як джерело напруги u_{AF} ; б - паралельне у вигляді джерела струму i_{AF}

Схема рисунка 1.1 а описується такими рівняннями

$$\begin{aligned}
 U_H(\vartheta) &= U_{1m} \cdot \sin(\vartheta - \varphi_1) \\
 U_C &= \sum_{n=1}^{\infty} U_{nm} \cdot \sin(n \cdot \vartheta - \varphi_n) \\
 U_{AF} &= \sum_{n \neq 1}^{\infty} U_{nm} \cdot \sin(n \cdot \vartheta - \varphi_n)
 \end{aligned}
 \tag{1.2.}$$

або

$$U_H(\vartheta) = U_M(\vartheta) - U_{AF}(\vartheta) \quad (1.3)$$

де ϑ - частота основної складової.

При припущенні, що силові ключі АФ, зображеного рисунку 1.1 а, ідеальні, а підключене навантаження повністю лінійне, справедливе наступне співвідношення:

$$P_{AF} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\sum_{n \neq 1}^{\infty} U_{nm} \cdot \sin(n \cdot \vartheta - \varphi_n)] \cdot I_{nm1} \cdot \sin(\vartheta - \varphi_{i1}) d\vartheta \rightarrow 0 \quad (1.4.)$$

яке можна розглядати як один із критеріїв оптимізації АФ за критерієм мінімізації втрат енергії, де I_{nm1} та φ_{i1} – амплітуда та фаза струму першої гармоніки струму навантаження. Вираз (1.4) показує, що ідеалізований АФ при зазначених припущеннях не впливає на баланс активної потужності між джерелом живлення та підключеним навантаженням, однак у низці досліджень стверджується, що АФ бере участь в обміні неактивними складовими повної потужності або «потужністю спотворення» з несинусоїдальним джерелом ПН.

Для корекції несинусоїдального струму в ТОП, обумовленого наявністю ПН, використовуються АФ, схема підключення якого наведена на рисунку 1.1 б. При цьому справедливі наступні співвідношення

$$\begin{aligned} i_n(\vartheta) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n \cdot \vartheta - \varphi_{in}); \\ i_{AF}(\vartheta) &= \sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n \cdot \vartheta - \varphi_{in}); \\ i_M(\vartheta) &= i_H(\vartheta) - i_{AF}(\vartheta) = I_{m1} \cdot \sin(\vartheta - \varphi_{i1}); \\ P_{AF} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n \cdot \vartheta - \varphi_{in})] \cdot U_{m1} \cdot \sin(\vartheta - \varphi_{i1}) d\vartheta = 0 \quad (1.5) \end{aligned}$$

де U_{m1} та φ_{i1} – амплітуда та фаза напруги першої гармоніки мережі.

Таким чином, АФ, що є керованим джерелом напруги заданої величини і гармонійного складу, послідовно підключається до компенсованої мережі (див. рисунок 1.1 а), називається послідовним АФ (ПСАФ). У свою чергу, АФ,

що є керованим джерелом струму заданої величини і гармонійного складу, що підключається паралельно до компенсованої мережі (див. рисунок 1.1 б), називається паралельним АФ (ПАФ).

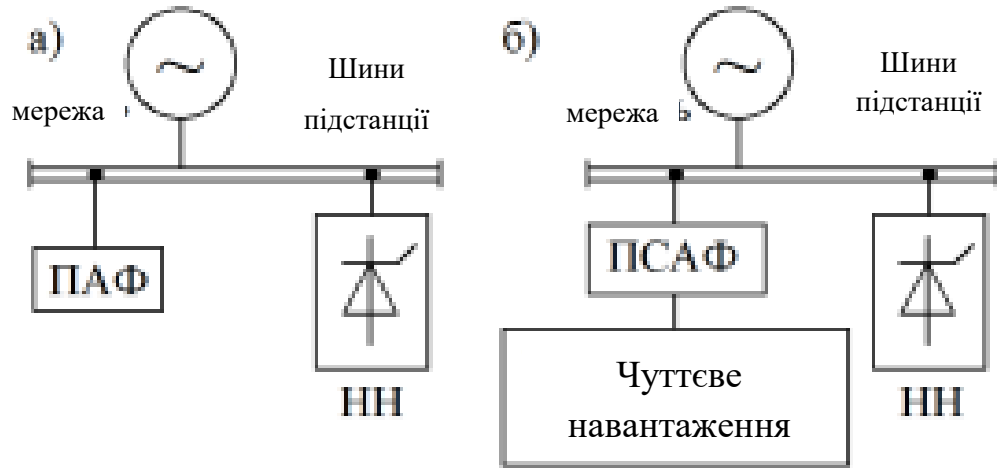


Рисунок 1.2. - Схема включення до мережі з НН: а) ПАФ, б) ПСАФ

На рисунках 1.2 .а і б для прикладу наведено схеми включення ПАФ та ПСАФ до мережі з ПН відповідно. ПСАФ у цьому випадку застосовується для ізоляції чутливого навантаження від вищих гармонік струму з боку мережі та ПН.

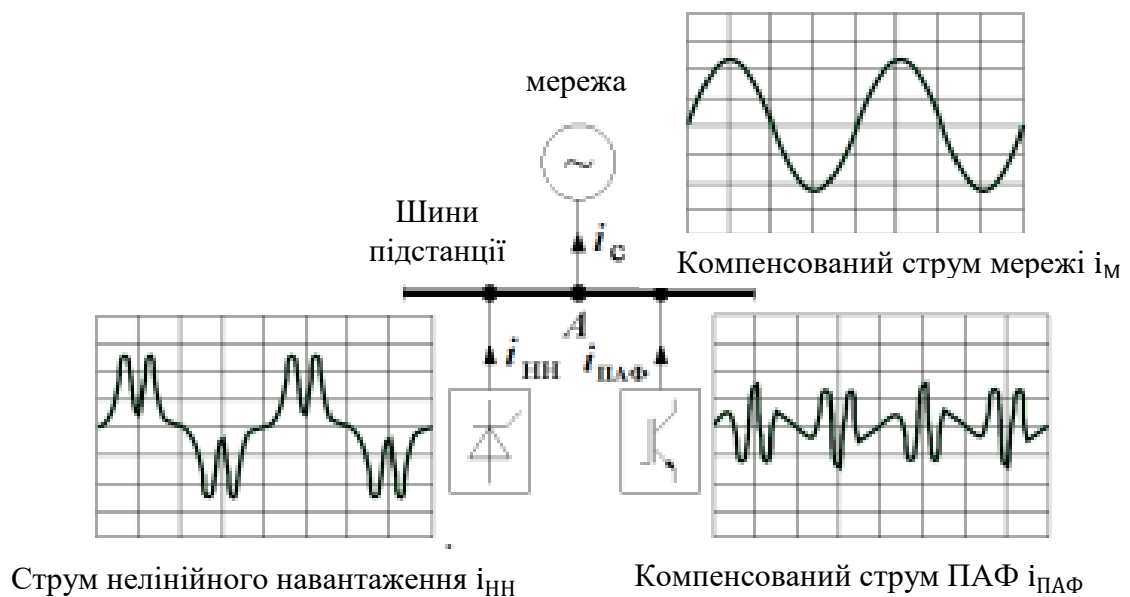


Рисунок 1.3 – Принцип роботи ПАФ

На рисунку 1.3 наведено принцип роботи ПАФ при компенсації вищих гармонік струму з боку ПН. Струм точки А визначається згідно з виразом

$$i_M = i_{HH} + i_{ПАФ} \quad (1.6)$$

Для практичних інженерних розрахунків та розробки схем заміщення ПН і ПАФ в ТОП можна у вигляді умовної ЛН, у своїй її струм і напруги пов'язані певним коефіцієнтом $k_{ЛН}$, величина якого визначається з параметрів джерела, підключеної ПН і самого ПАФ. Якщо ПН представлена у вигляді багатопульсного ПЧ, то споживаний нею струм буде наступним

$$i_{HH} = i_{1HH} + \sum_{k=1}^{\infty} (i_{pk+1} \cdot \sin \varphi_{pk+1} + i_{pk-1} \cdot \sin \varphi_{pk-1}) \quad (1.7),$$

де p – імпульсність ПЧ;

i_{1HH} – перша гармоніка струму ПЧ.

Струм на виході ПАФ:

$$i_{ПАФ} = \sum_{k=1}^{k_{max}} (i_{pk+1} \cdot \sin(\varphi_{pk+1} + \pi) + i_{pk-1} \cdot \sin(\varphi_{pk-1} + \pi)) \quad (1.8)$$

де $k_{max} = \frac{n_{max}+1}{p}$, n_{max} – максимальний порядок вищих гармонік струму, який подавляється ПАФ. При цьому в більш загальному випадку з врахуванням струму вищих гармонік, які не пов'язані з підключеним низьковольтним навантаженням, відповідно до теорії:

$$i_1 + i_{CG} = i_{1HH} + \sum_{k=1}^{\infty} (i_{pk+1} \cdot \sin \varphi_{pk+1} + i_{pk-1} \cdot \sin \varphi_{pk-1}) + \sum_{k=1}^{k_{max}} (i_{pk+1} \cdot \sin(\varphi_{pk+1} + \pi) + i_{pk-1} \cdot \sin(\varphi_{pk-1} + \pi)) \quad (1.9)$$

де i_1 – перша гармоніка струму мережі i_M ;

$i_{\text{сГ}}$ – сумарний струм вищих гармонік струму зі сторони джерела. При спрощенні:

$$i_1 = i_{1\text{НН}} + \sum_{k=k_{\text{max}}}^{\infty} i_{pk+1} \cdot \sin\varphi_{pk+1} + i_{pk-1} \cdot \sin\varphi_{pk-1} - i_{\text{сГ}} \quad (1.10)$$

Враховуючи наявність вищих гармонік струму з боку мережі коефіцієнт $k_{\text{ЛН}}$ можна визначити так:

$$k_{\text{ЛН}} = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_{\text{сГ}}^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_{\text{сГ}}^2}}{\sqrt{I_{1\text{НН}}^2 + \sum_{k=k_{\text{max}}}^{\infty} (I_{pk+1} \cdot \sin\varphi_{pk+1})^2 + \sum_{k=k_{\text{max}}}^{\infty} (I_{pk-1} \cdot \sin\varphi_{pk-1})^2 - I_{\text{сГ}}^2}} \quad (1.11)$$

де U_1 – перша гармоніка напруги мережі, $U_{\text{сГ}}$ – напруга вищих гармонік струму джерела.

Таким чином, відповідно до виразу (1.11) значення $k_{\text{ЛН}}$ надає вплив вид підключеної ПН, ступінь присутності вищих гармонік струму із боку джерела, максимальний порядок ВГС, що пригнічується ПАФ.

При необхідності компенсації вищих гармонік струму у мережах високої напруги ПАФ оснащується вихідним СТ заданої потужності та коефіцієнта трансформації.

В загальному випадку ПАФ включає силову частину, систему управління і накопичувальний елемент (див. рисунок 1.4).

Силова частина виконана у вигляді реверсивного інвертора та вихідного ПФ, у найпростішому випадку ПФ виконується у вигляді вихідних дроселів. Накопичувальний елемент може бути представлений у вигляді конденсатора, рідше у вигляді індуктивності.

Структура системи управління визначається методом управління ПАФ, що використовується, для підвищення ЯЕЕ, але обов'язковими елементами є первинні датчики струму або напруги, що синхронізує пристрій та формувач імпульсів управління силовими елементами інвертора. Часто такий формувач

реалізується з урахуванням гістерезисних (релейних) регуляторів струму, принцип роботи яких наведено рисунку 1.5. і добре відомий.

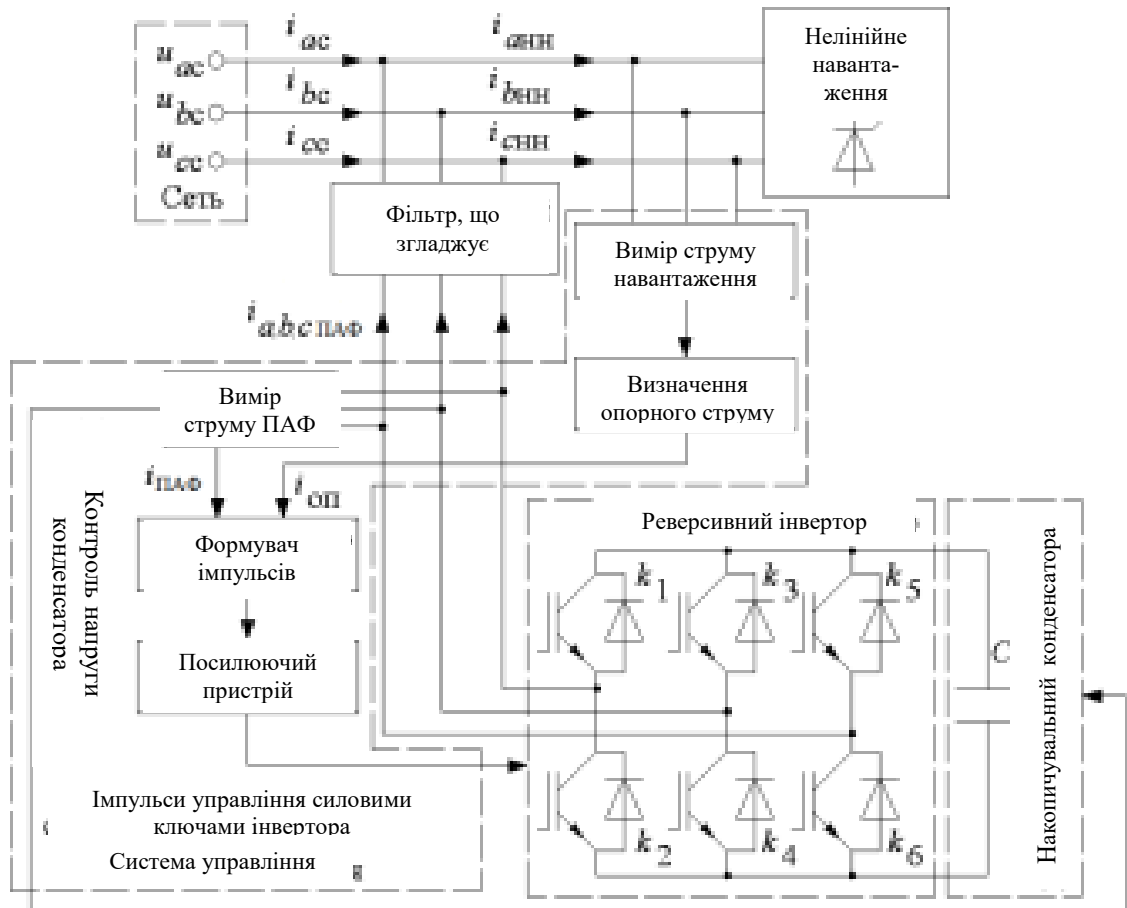


Рисунок 1.5. – Структура ПАФ

Регулювання ширини гістерезису Δi таких регуляторів дозволяє підвищити точність відпрацювання опорного завдання струму $i_{оп}$, підвищити швидкодію системи управління та знизити втрати потужності в силових ключах інвертора. Також ширина гістерези дає можливість задати частотний діапазон спектра пригнічених вищих гармонік струму.

Регулювання ширини гістерези релейних регуляторів забезпечує роботу інвертора зі змінною частотою ШІМ. Це дозволяє підвищити швидкодія ПАФ при виявленні спектра вищих гармонік струму та генерації компенсаційного струму при динамічному характері низьковольтного навантаження.

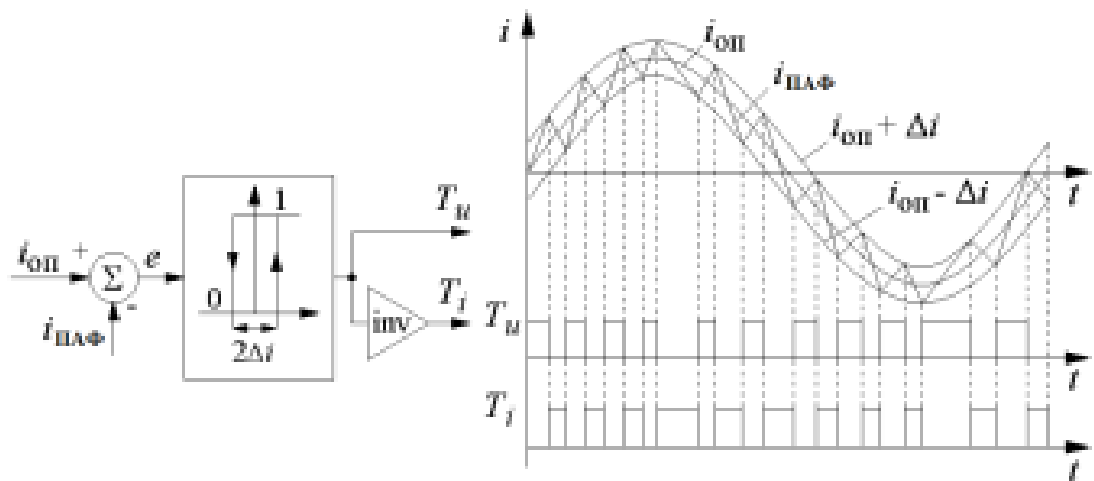


Рисунок 1.6. – Принцип роботи релейних регуляторів

Основними недоліками класичних АФ без будь-яких ФКП є їх дорожнеча, обмежений набір функцій щодо підвищення ЯЕЕ, а також неможливість їх застосування в мережі з близько розташованими КП компенсації реактивної потужності.

Активні випрямлячі

Активні випрямлячі (АВ) (випрямлячі з одиничним коефіцієнтом потужності, випрямлячі з активним переднім фронтом) - це АП, що забезпечують споживання електроенергії з мережі з коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці.

В даний час АВ є частиною більшості сучасних ЕТК ЧРП технологічних установок та комплексів. Однак, АВ також споживають з мережі ВГС струму, але їхня величина дещо нижча, ніж у традиційних випрямлячів. На рисунку 1.7 як порівняння наведено загальні структури ПАФ та АВ. При цьому з точки зору топології дані АП практично нічим не відрізняються, принципова різниця полягає в методах, на основі яких функціонують системи управління.

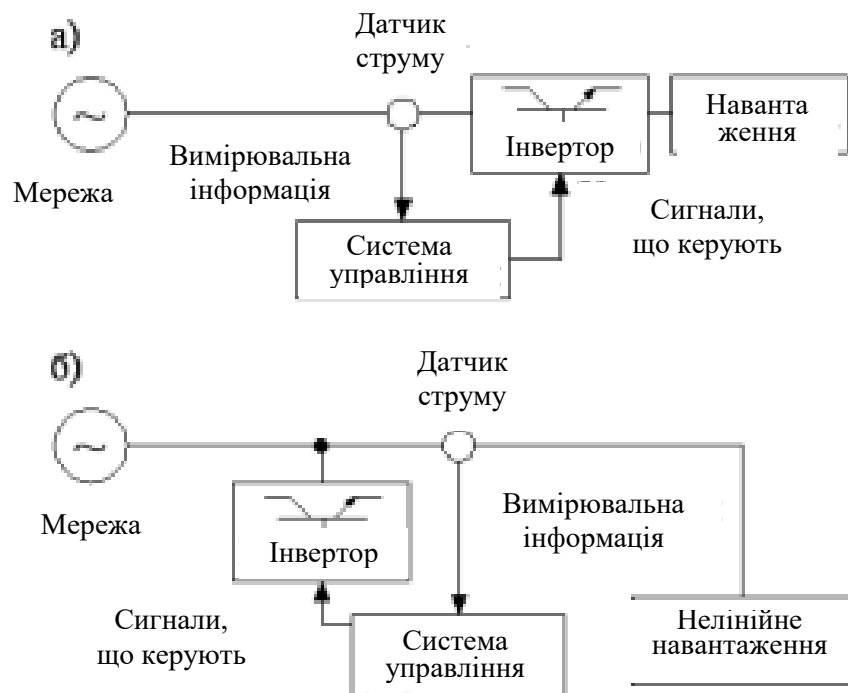


Рисунок 1.7 – Загальна структура АВ (а), ПАФ (б)

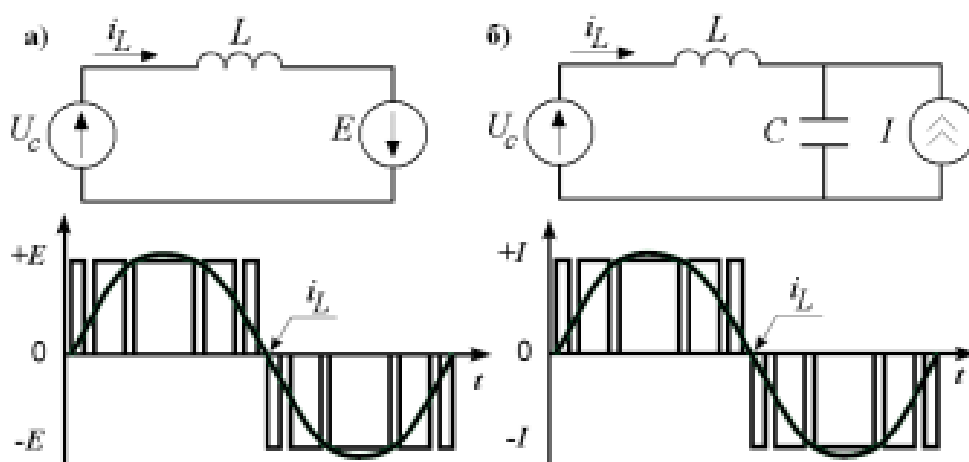


Рисунок 1.8. - Схеми заміщення та форми кривих струму та напруги АВ: а) в режимі джерела напруги; б) в режимі джерела струму

АВ можуть функціонувати як керованих джерел напруги чи струму (див. рисунок 1.8). У першому випадку АВ працює в режимі генератора проти-ЕРС (E) мережі (U_c) (див. рисунок 1.8 а). При цьому через опір системи або ділянки мережі протікає практично синусоїдальний струм (i_L) з малим рівнем

спотворення завдяки функціонуванню АВ у режимі ШІМ та контролю системи управління напруги на його виході.

У режимі керованого джерела струму АВ функціонує як генератор імпульсного струму (I), однак для забезпечення синусоїдальності мережного струму (див. рис. 1.8 б) необхідна наявність ПФ з параметрами, підібраними спеціальним чином. АВ, що функціонує в такому режимі, знаходить широке застосування при живленні систем регульованого ЕПД постійного струму.

Незважаючи на зазначені особливості, АВ у складі ЕТК ЧРП є одним із видів ПН, при цьому його наявність дозволяє дещо знизити рівень ВГС струму з боку ЕТК ЧРП. Таким чином, АВ коректно розглядати як один із видів АП підвищення КЯЕЕ.

Системи управління АВ здатні виконувати такі ключові функції: підтримка випрямленої напруги на заданому рівні за рахунок впливу на амплітуду завдання фазних струмів мережі; споживання синусоїдальних струмів, за рахунок впливу на напругу керування; завдання та підтримання необхідного коефіцієнта потужності мережі (індуктивний, ємнісний або близький до одиниці) також за рахунок впливу на напругу управління; двосторонній енергообмін між енергосистемами змінного та постійного струму. На основі АВ напруги (АВН) розробляються системи електроприводу (ЕПД), що володіють покращеними параметрами за критеріями мінімізації енергоспоживання та максимального рівня енергоефективності.

Для застосування ЕПД з АВ у мережах низької напруги використовується АВ як джерела струму (АВТ) з урахуванням принципу імпульсного понижуючого регулятора. При цьому, АВТ забезпечує функціонування ЕПД тільки при постійному навантаженні та малій швидкодії управління, так як швидкість зміни вихідної потужності АВ обмежується постійним часом вхідного ланцюга. Ця особливість робить застосування АВТ для ЕПД з високими динамічними показниками недоцільним, на відміну від АВН, що має великий рівень швидкодії.

При цьому дана якість є також і недоліком АВН, через їх більш високу вразливість перед аварійними процесами, що швидко розвиваються, тому застосування АВН обумовлює суворіші вимоги до пристроїв релейного захисту.

Таким чином, в рамках ЕТК ЧРП, АВ залежно від налаштування параметрів і вибору системи управління здатний здійснювати корекцію ПЯЕЕ на вході ЕПД, у разі коли останній є основною і єдиною причиною погіршення ЯЕЕ в ділянці СЕП, що розглядається. АВ є основним елементом ЕТК ЧРП, а не окремим самостійним груповим пристроєм підвищення КЕ, що відноситься до основних недоліків АВ. Оснащення ними ЕТКЧРП призводить до подорожчання останніх, особливо при їх великій кількості в електричній мережі. Тому АВ необхідно оснащувати найпотужніші ЧРП, які роблять найбільш значний внесок у сумарний рівень вищих гармонік струму у межах заданої промислової СЕП. В умовах представлені у значній кількості та широкому діапазоні потужностей. Таким чином, АВ, як окремий випадок ФКП з АП, є ефективним засобом підвищення ЯЕЕ, але сфера його застосування обмежується найбільш потужними одиничними джерелами вищих гармонік струму.

1.3. Існуючі пристрої підвищення якості електроенергії на основі активних перетворювачів та фільтрокомпенсуючих пристроїв

Статичні компенсатори реактивної потужності

Влаштування статичної компенсації реактивної потужності (СТАТКОМ) з точки зору топології максимально близько ПАФ за винятком методу управління (див. рис. 1.9). На виході інвертора, який виконує функцію перетворювача напруги (ПН), включається широкосмуговий ПФ (C_ϕ , L_ϕ , R_ϕ), який налаштовується на компенсацію вищих гармонік струму.

СТАТКОМ функціонує як керованого джерела реактивного струму для корекції коефіцієнта потужності у вузлі навантаження. Інвертор у складі СТАТКОМ також працює в режимі ШІМ з несучою частотою $f_{\text{ШІМ}} \approx 1 \text{ кГц}$.

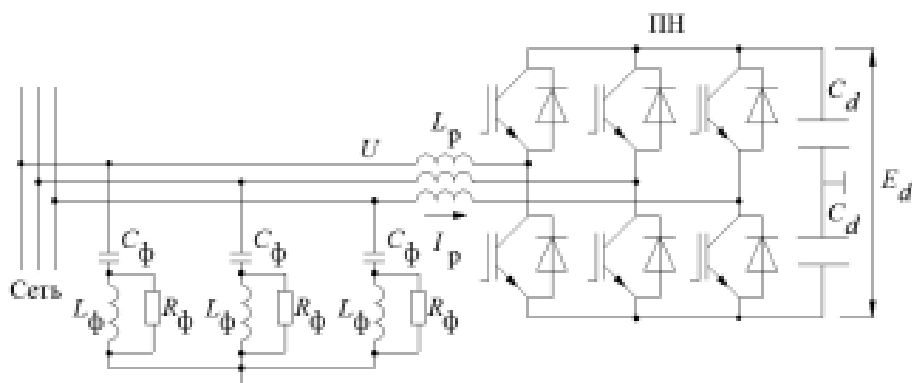


Рисунок 1.9 – Структура СТАТКОМ

Пристрої СТАТКОМ також реалізують такі функції підвищення ЯЕЕ: усунення коливань напруги у вузлі навантаження шляхом компенсації різко змінної реактивної потужності навантаження Q_n ; керування режимом напруги шляхом «регулювання потоків реактивної потужності у вузлі навантаження або ТОП; компенсація несиметрії напруги через нерівномірний розподіл реактивної потужності по фазах вузла навантаження; підвищення стійкості вузла навантаження завдяки тому, що при провалах напруги СТАТКОМ функціонує як кероване джерело струму», величина якого не залежить від напруги у вузлі навантаження.

На рисунку 1.10 наведено підключення СТАТКОМ до ЦЕС. На рисунку 1.11 наведено векторні діаграми основних режимів роботи СТАТКОМ. В режимі споживання реактивної потужності вихідна напруга СТАТКОМ менше напруги мережі і знаходиться з нею у фазі. В режимі генерації – вихідна напруга СТАТКОМ більше напруги мережі і також у фазі з нею.

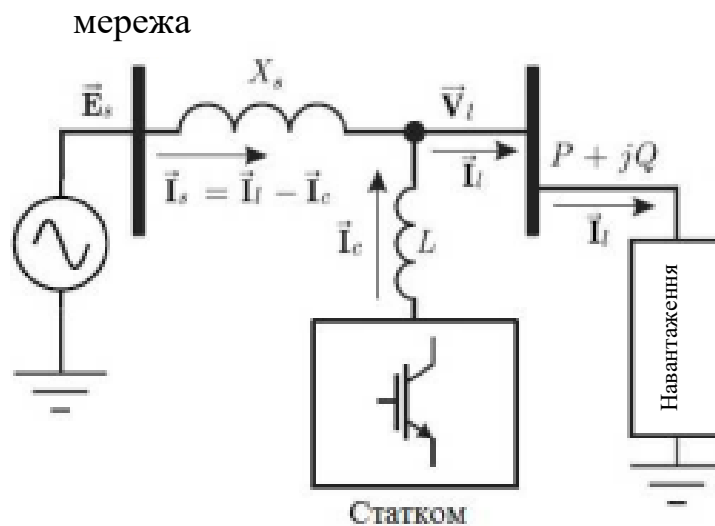


Рисунок 1.10 – Підключення СТАТКОМ до ЦЕС

В даний час серійно випускаються такі типи пристроїв СТАТКОМ.

Однорівневі пристрої типу D-СТАТКОМ, які підключаються до шин 6-10 кВ через понижуючий СТ. Такі пристрої використовуються у мережах промислових підприємств та ЦЕС для вирішення локальних завдань підвищення ЯЕЕ, симетрування навантаження та компенсації реактивної потужності. Багаторівневі безтрансформаторні пристрої СТАТКОМ безпосередньо підключаються до шин середньої напруги 6-35 кВ. Багаторівневі пристрої СТАТКОМ застосовуються для зниження негативного впливу на мережу різко змінних навантажень великої потужності у вигляді дугових сталеплавильних печей та підвищення рівня динамічної стійкості у високовольтних мережах.

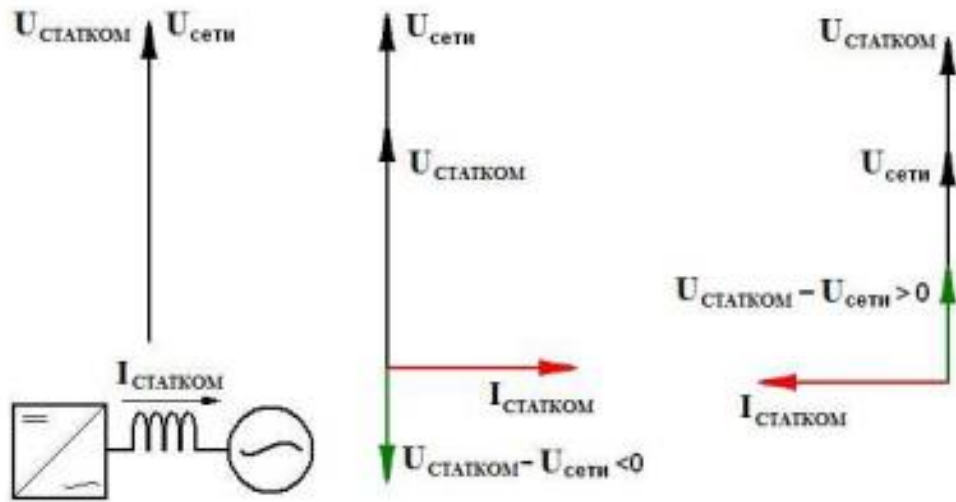


Рисунок 1.11 – Векторні діаграми основних режимів роботи СТАТКОМ

На рисунку 1.12 як приклад наведена структура D-СТАТКОМ, призначеного для компенсації провалів та відхилень напруги мережі.

Принцип управління СТАТКОМ у цьому випадку заснований на порівнянні заданих та фактичних лінійних напруг понижуючого СТ, встановленого на виході СТАТКОМ, заданої та фактичної напруги ланки постійного струму, та формуванні на основі цього імпульсів управління силовими ключами інвертора з урахуванням вимірювальної інформації про два фазні струми на виході СТАТКОМ.

Між пристроєм СТАТКОМ та мережею відбувається обмін реактивною потужністю, так щоб відхилення заданих напруг від фактичних було мінімальним залежно від умов застосування.

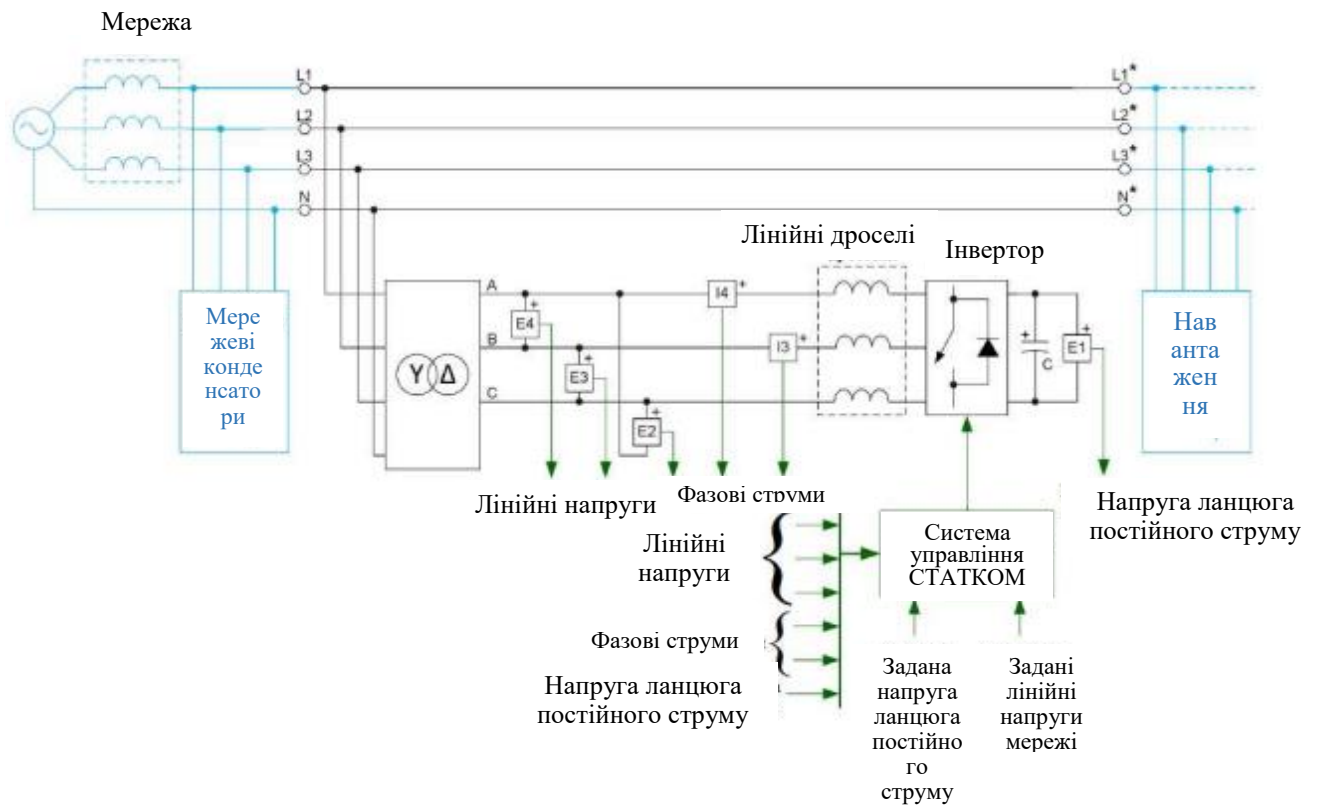


Рисунок 1.12 – Структура D-СТАТКО, який призначено для компенсації провалів і відхилень напруги мережі

У разі прямого (безтрансформаторного) підключення СТАТКОМ до мереж середнього класу напруги застосовуються багаторівневі АП.

Одним з таких АП є АП з використанням Н-мостів. «Найважливішою перевагою даної конфігурації є її модульність, що дозволяє легко проводити масштабування СТАТКОМ при переході до різних рівнів напруги та полегшує умови експлуатації та обслуговування електроустановки».

Така структура наведена на рисунку 1.13.

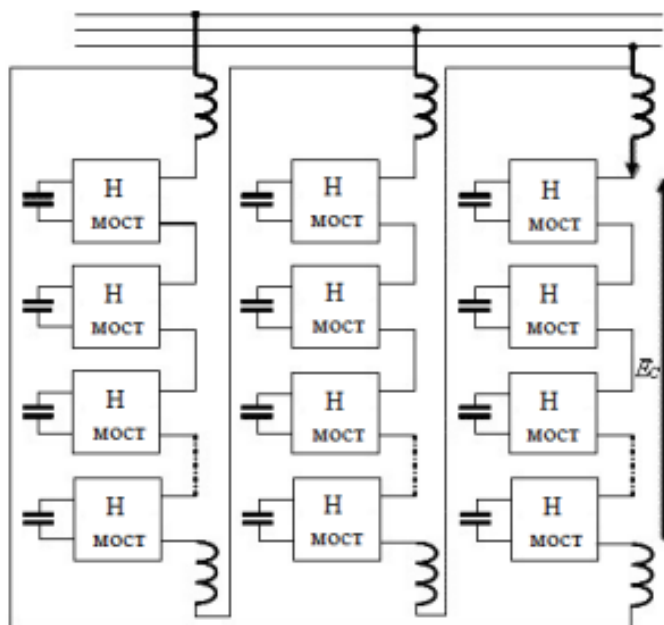


Рисунок 1.13 - Багаторівневі АП на основі Н-мостів

Основною перевагою пристрою СТАТКОМ, порівняно з традиційними синхронними компенсаторами, є більш висока експлуатаційна надійність. Також порівняно з тиристорно-реакторними групами СТАТКОМ зменшує ризик резонансних явищ, зумовлених наявністю КП.

Застосування у складі АП повністю керованих силових ключів дає можливість розробки структур та схем АП з якісно новими енергетичними параметрами та характеристиками

Порівняльний аналіз параметрів та характеристик пристрою СТАТКОМ та традиційних компенсаторів наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Порівняльні характеристики пристрою СТАТКОМ та традиційних статичних компенсаторів

Характеристика	СТАТКОМ	Традиційні статичні компенсатори
Вольт-амперна характеристика	Повна функціональність при зниженій напрузі	Обмежена функціональність при зниженій напрузі

Час реагування	0,02-0,04 с	0,04-0,06 с
Габаритні розміри	40-50% від габаритів традиційних статичних компенсаторів	200-250% від габаритів пристроїв СТАТКОМ
Вартість	120-150% вартості традиційних компенсаторів	66-83% від вартості СТАТКОМ

Дані таблиці 1.2 свідчать про те, що двома основними перевагами пристроїв СТАТКОМ є більш висока швидкодія та можливість належного функціонування при зниженій напрузі. Проте, СТАТКОМ, будучи окремим випадком ПАФ, має обмежений набір функцій за більш високої вартості щодо традиційних статичних компенсаторів та пасивних ФКП.

Також до недоліків СТАТКОМ належить їхній малий рівень стійкості у разі наявності однофазних провалів мережевої напруги.

Пристрої динамічної компенсації спотворення напруги

Пристрій СТАТКОМ здатний реагувати тільки на реактивну складову повного струму мережі при корекції коефіцієнта потужності та регулюванні напруги, що є недоліком у певних умовах. Пристрій динамічної компенсації спотворення напруги (ДКІН) позбавлений цього недоліку. В основі ДКІН також лежить інвертор у вигляді ПН, а також один або кілька СТ (див. рис. 1.13), при цьому ПН підключається до компенсованої мережі за допомогою вольтододаточного трансформатора (ВДТ), який здійснює перерозподіл активної та реактивної потужності таким чином, щоб величина напруги ΔU , що додається, на вторинній обмотці ВДТ повністю покривала провал або відхилення напруги у вузлі навантаження у разі зовнішнього КЗ чи провалу напруги в мережі живлення.

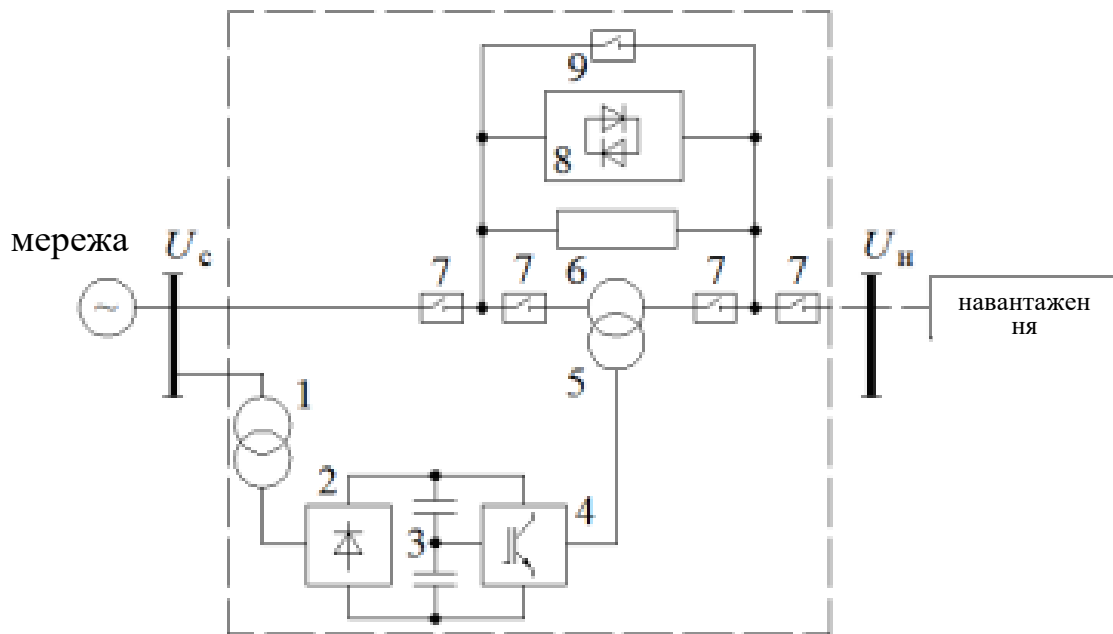


Рисунок 1.14 – Структура ДКІН

Існуючі модифікації ДКІН класифікуються за такими основними ознаками: вхідному напрузі, за потужністю, за рівнем компенсації напруги: максимальний до $0.5 \cdot U_{\text{ном}}$ на виході при вхідній напрузі $U_{\text{мережі}} = 0$ по одній фазі тривало, максимальний до $U_{\text{ном}}$ протягом 2 с. за трьома фазами при вхідній напрузі $U_{\text{мережі}} = 0$.

Залежно від умов застосування та поставлених цілей структура ДКІН може бути змінена як у бік спрощення, так і у бік ускладнення.

Найбільш проста базова структура ДКІН – ВДТ із системою управління (СУ) - наведено на рисунку 1.15 а. Структура ДКІН з використанням АП, що складається з випрямляча та інвертора, спільно з ВДТ наведено на рисунку 1.15 б.

Структура ДКІН з використанням силового перетворювача, що складається з випрямляча та інвертора, з ВДТ та АКБ наведена на рисунку 1.15 в.

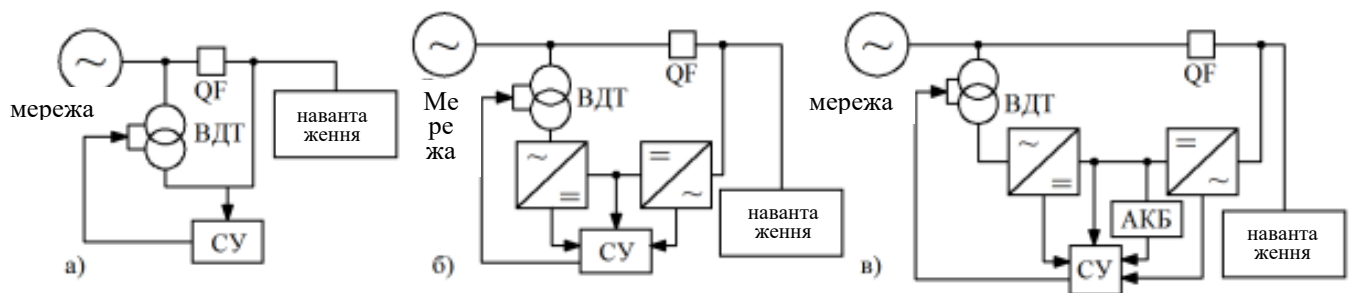


Рисунок 1.15 – Структура ДКІН а) базова; б) з ВДТ і АП; в) з ВДТ, АП і АКБ.

Основні цілі застосування ДКІН у ЦЕС та мережах з РГ такі: забезпечення надійного та безперервного електропостачання споживачів за рахунок АП напруги та ВДТ у разі аварійних та ненормальних режимів енергозабезпечення та енергоспоживання; усунення несиметрії за фазами в нормальному режимі роботи, що дозволяє знизити електроспоживання на 3-5%.

Сучасні модифікації ДКІН мають такі переваги:

- ✓ забезпечення захисту від усіх типів КЗ;
- ✓ малий час реагування на короточасні переривання та порушення електропостачання (не більше 3 мс);
- ✓ рівень ефективності функціонування пристроїв становить понад 97,5% за повного навантаження;
- ✓ низький рівень споживання потужності та експлуатаційних витрат;
- ✓ придушення коливань напруги, флікера та перенапруг;
- ✓ синусоїдальність форми кривої напруги на виході; найвищий рівень надійності.

ДКІН при належному виборі алгоритму управління здатний забезпечувати наступні функції:

- ✓ підтримка тривалий час номінальної напруги на навантаженні, що захищається при провалі напруги глибиною до 30 %;
- ✓ підтримка номінальної напруги на навантаженні, що захищається при провалах глибиною від 30 до 40 % тривалістю 30 с;

- ✓ підтримка на напругі, що захищається $0,9U_{\text{ном}}$ протягом 30 с при провалах напруги глибиною від 40 до 50 %;
- ✓ захист від перенапруг величиною до 130%; корекцію несиметрії напруги із боку мережі (від СТ);
- ✓ зменшення величини флікера за напругою; автоматичний режим компенсації лінійних падінь напруги до навантаження.

Коли в ДКІН використовується послідовний СТ для добавки до живильного напруги, прикладений до навантаження, у разі провалів в мережі живлення, вхід випрямляча АП підключається або до мережі живлення (див. рисунок 1.16 а), або до вузла навантаження (див. рисунок 1.16 б). При цьому в обох зазначених топологіях АП ДКІН складається з випрямляча та інвертора, вихідна напруга якого подається при провалах напруги на обмотку мережі послідовного СТ.

Системи управління ДКІН, вказаних рисунку 1.16, реалізують такі задачі:

- ✓ виявлення обурення напруги та визначення, чи перевищені межі на обурення і чи потрібна компенсація;
- ✓ розмикання вимикача між живильною мережею та навантаженням; включення АП, який прикладає до навантаження напругу, що бракує.

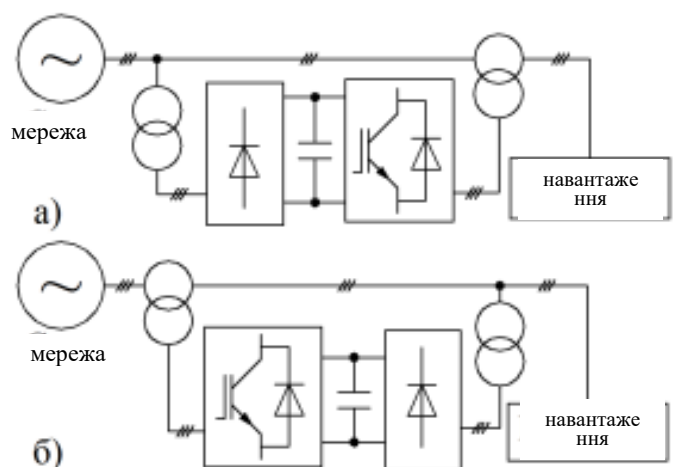


Рисунок 1.16 – Структури ДКІН із послідовним додаванням напруги та підключенням входу з боку мережі (а) та навантаження (б)

На рисунку 1.17 наведено базову структуру системи управління ДКІН, де реалізовано всі зазначені вище функції.

Трифазна напруга мережі U_s перетворюється на дві складові – пряма напруга U_d та ортогональна напруга U_q . При збалансованих напругах у мережі $U_d = 1$, а $U_q = 0$. Схема ФАПЧ визначає мережну напругу U_s і обчислює фазовий кут θ_s , який використовується при перетворенні U_s .

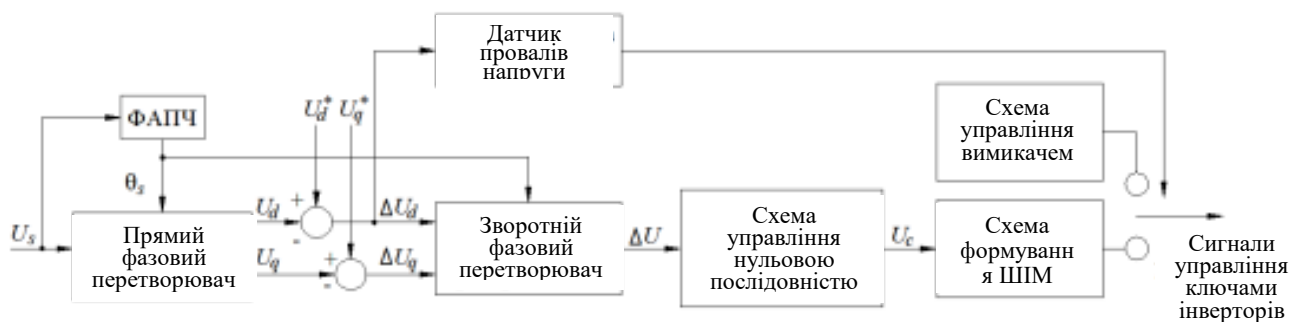


Рисунок 1.17 – Базова структура системи управління ДКІН

Напруги U_d та U_q порівнюються з опорними напругами U_{d*} та U_{q*} для отримання напруг помилки ΔU_d та ΔU_q , які показують рівень відхилення напруги від синусоїдальної форми і номінальної амплітуди. Датчик провалу або відхилення напруги визначає ступінь перевищення значенням ΔU_d заданої величини, наприклад, на 3 %. При цьому схема дає команду на розмикання вимикача та подає керуючі імпульси на силові ключі інвертора.

Напруги помилок ΔU_d та ΔU_q надходять на зворотний фазовий перетворювач, який спільно з інвертором формує набір напруг компенсації. Основним недоліком ДКІН також є відносно висока вартість, обумовлена наявністю СТ і АП.

Джерела безперебійного живлення

На рисунку 1.18 а наведено структурну схему джерела безперебійного живлення (ДБЖ) з подвійним перетворенням енергії та його включення до СЕП відповідального за критерієм стійкості та безперервності технологічного процесу навантаження.

Основними елементами ДБЖ є:

інвертор (І);

✓ акумуляторна батарея (АКБ) для живлення інвертора за відсутності електропостачання мережі;

✓ зарядний пристрій на основі випрямляча (В), що служить як підтримки АКБ в зарядженому стані, так живлення інвертора за наявності напруги із боку джерела;

✓ ланцюг для живлення навантаження безпосередньо від мережі при відмові ДБЖ, додатковий ланцюг для проведення поточних ремонтних робіт з ДБЖ, тиристорний комутатор (ТК).

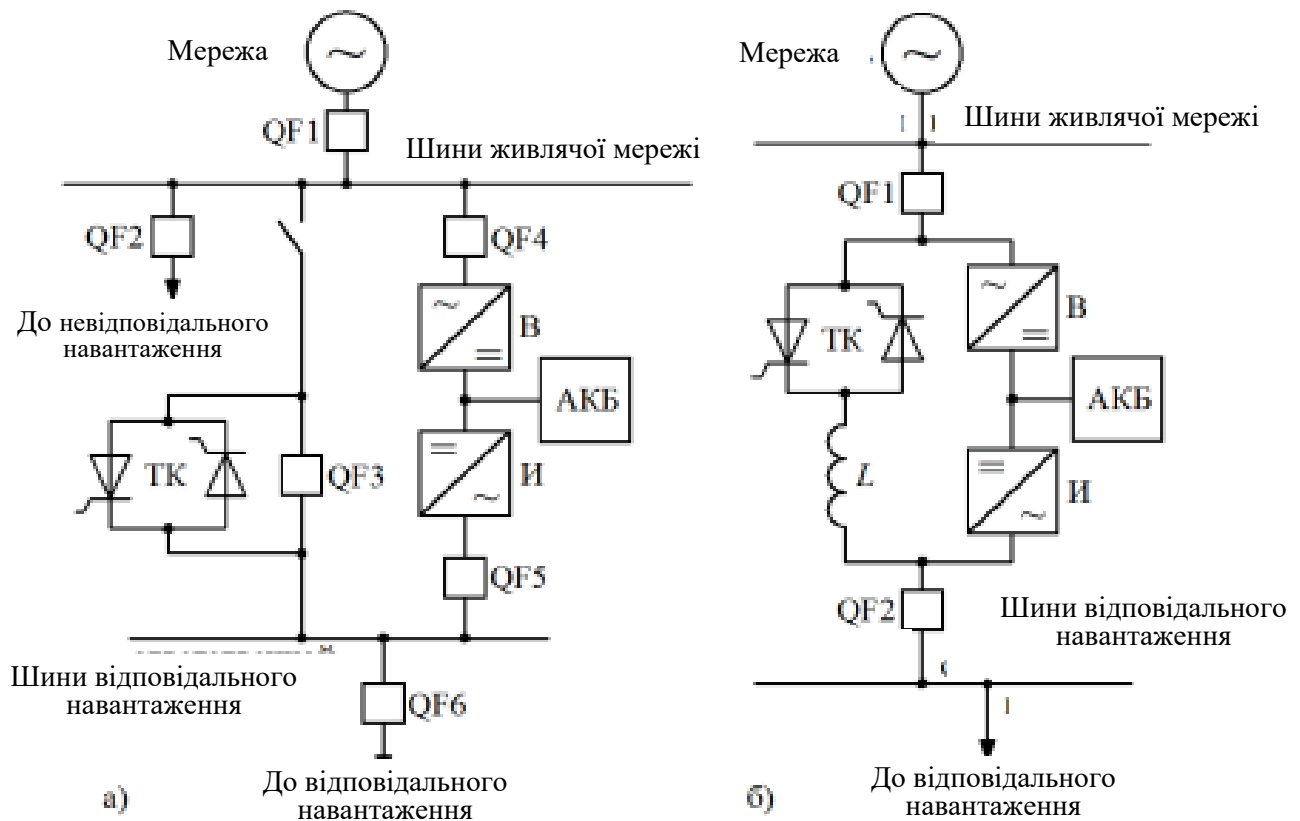


Рисунок 1.18 – Структура ДБЖ: а) з подвійним перетворенням енергії; б) диференціального

Зарядний пристрій (В) та інвертор (І) виконується на базі сучасних потужних напівпровідникових приладів GTO, GCT та IGBT. Для формування

синусоїдального струму, що споживається випрямлячем від мережі, застосовується ШІМ. Синусоїдальна вихідна напруга інвертора створюється також з використанням ШІМ. Пригнічення високочастотних ВГС виконується за допомогою малопотужних АФ.

На рисунку 1.18 б показано структуру ДБЖ, де застосовано диференціальний спосіб функціонування. У цьому випадку АКБ і інвертор прикладають до навантаження різниця між номінальною напругою живлення і мережевою напругою.

В даний час ДБЖ використовуються для безаварійного завершення технологічних процесів без будь-якої функції підвищення ЯЕЕ. ДБЖ, мають у своїй основі АП, є багатофункціональними пристроями, проте на даний момент не розглядається їхнє системне застосування у складі ЕТК ФКП з АП для підвищення ЯЕЕ.

Універсальні компенсатори

В даний час основою концепції універсального компенсатора (УК) є спільне використання пристроїв СТАТКОМ і ДКІН, або їх аналогів (див. рисунок 1.19). Подібний УК має виконувати такі основні завдання: керування режимом напруги; підсумовування або віднімання напруг, фазованих за рахунок поперечної компенсації.

Виконання даних функцій пов'язане з роботою наступних пристроїв корекції коефіцієнта потужності:

- ✓ пристрій поперечної компенсації (СТАТКОМ) за рахунок управління поперечним АП з його переведенням у режим поглинання або повернення реактивної потужності, за підтримки постійного рівня напруги;
- ✓ пристрій поздовжньої компенсації (ДКІН) за рахунок добавки напруги з фазовим зсувом на 90° щодо струму зв'язку.

В такому режимі існує необхідність керування напругою та реактивною потужністю на вході.

В рамках цього КК можлива як окрема, так і одночасна реалізація зазначених функцій - число ступенів свободи КК дозволяє це робити у разі

необхідності управління активної і реактивної потужністю. На сьогоднішній день КК подібного типу впроваджено частково в основному на лініях надвисокої напруги, що йдуть від електростанцій. УК як ЕТК на основі декількох АП, має широкий функціонал підвищення КЕ, при цьому володіючи високою вартістю. Проте, на даний момент не розглянуто методи та засоби спільного застосування УК та пасивних ФКП у рамках ЕТК підвищення ЯЕЕ.

Гнучкі системи передачі змінного струму

Гнучкі системи передачі змінного струму (Flexible Alternative Current Transmission Systems - FACTS) поняття досить нове та своєю появою в науково-технічній літературі зобов'язане розвитку теорії структур та алгоритмів управління активних систем корекції форми кривої та рівня напруги та струму на базі різних типів АП з використанням сучасних силових ключів IGBT, IGCT, GTO, IEGT та GCT. У деяких публікаціях і наукових працях вказується, що основною властивістю FACTS є здатність генерувати або споживати реактивну потужність, але це лише одна з безлічі функцій, які FACTS можуть виконувати в електричних мережах. Також поняття FACTS у деяких публікаціях безпосередньо пов'язують із терміном Smart Grid, що означає «розумна мережа», «інтелектуальна енергосистема», «інтелектуалізована енергосистема» тощо. На даний момент розвиток сучасних СЕП та електроенергетичних мереж пов'язаний з наступними двома головними проблемами.

Перша полягає у неможливості належного функціонування багаторівневої енергосистеми складної конфігурації без спеціальних жорстких методів та засобів автоматичного управління. Друга проблема – необхідність залучення нових земель для подальшого розвитку енергосистеми, що в певних умовах спричиняє значні витрати. За таких умов, згідно з рядом публікацій за останні 5 років, найбільш ефективним рішенням та напрямом досліджень є принцип «інтелектуальних мереж (Smart Grid), який дозволяє забезпечити керованість» та підвищити пропускну спроможність мереж.

Також у ряді публікацій терміни «керовані лінії» (інтелектуальні мережі) та «гнучкі лінії» (FACTS) розглядаються як тотожні, але з урахуванням того, що останні засновані на певному класі пристроїв FACTS необхідно розглядати як ключову підсистему «розумних мереж» Smart Grid.

На сьогоднішній момент у процесі розвитку всі технології, пов'язані з інтелектуальними енергосистемами Smart Grid, можна розділити на такі напрямки: принципи та технології РГ на основі альтернативних та відновлюваних джерел енергії; нове покоління інтелектуальних пристроїв захисту, автоматизації, диспетчеризації та управління; системи інформаційно-керуючого впливу та взаємодії для центрів управління енергосистем різного рівня локалізації; активне електротехнічне мережеве обладнання (FACTS), здатне адаптивно та гнучко змінювати параметри та характеристики передачі, перетворення та споживання електроенергії для «оптимізації режимів мережі за декількома критеріями одночасно: пропускна здатність, рівень технологічних втрат, стійкість, перерозподіл потоків потужності, ЯЕЕ тощо.

Застосування пристроїв та систем FACTS дозволяє підвищити пропускну здатність ліній (за деякими оцінками – до 20%), забезпечити стійку роботу енергетичних систем, забезпечити задані параметри мережі, що запобігає втратам електричної енергії (до 40%).

До технологій FACTS належать такі пристрої: статичні синхронні компенсатори (статичні компенсатори реактивної потужності (СКРМ)), керовані реактори та КУ з тиристорним та механічним перемиканням, фазоповертні пристрої, вставки постійного струму, багатофункціональні пристрої, у тому числі для підвищення ЯЕЕ, зниження реактивної потужності та керування її потоками.

Також до елементів FACTS відносяться розглянуті у попередніх розділах активні системи корекції ПЯЕЕ різного типу (ПАФ, ПСАФ), АВ, пристрої СТАТКОМ та ДКІН. Таким чином, можна стверджувати, що ЕТК ФКП з АП є основною технологією FACTS та інтелектуальних енергосистем, у тому числі з РГ на основі альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Однак, на

даний момент не розроблено теоретичних та методологічних засад застосування ФКП з АП.

1.4. Визначення, характеристики та властивості фільтрокомпенсуючих пристроїв з активними перетворювачами

ФКП з АП мають у світлі сучасних вимог щодо умов безперервності та стійкості технологічних процесів промислових підприємств, а також належного рівня енергозбереження та енергетичної ефективності вирішувати такі основні завдання:

- ✓ компенсація вищих гармонік струму та напруги в повному або частковому режимі в умовах ЦЕС, РГ та комбінованих СЕП залежно від типу та режиму роботи ПН та джерела;
- ✓ управління режимом напруги, шляхом мінімізації гармонічних спотворень, величини та тривалості провалів та відхилень напруги; корекція коефіцієнта потужності мережі з урахуванням основної складової та вищих гармонік струму;
- ✓ усунення несиметрії джерела та навантаження через її нерівномірний розподіл та наявність вищих гармонік струму та напруги;
- ✓ забезпечення синхронізації режимів паралельної роботи ЦЕС та автономних джерел різних типів у рамках систем РГ та комбінованого електропостачання.

ЕТК ФКП з АП мають всі відомі системотехнічні властивості: сукупність елементів ЕТК корекції ПЯЕЕ (АП, СТ, накопичувальні елементи, комутаційна апаратура, система управління) – це цілісне утворення, в якому кожен елемент має системовизначені властивості; між елементами ЕТК «є стійкі зв'язки – фізичні канали, якими виробляється обмін інформаційними масивами і розподіл енергетичних потоків, причому ці зв'язку формують показники режиму роботи та структуру ЕТК, що характеризують його загалом; показники режиму роботи та структура ЕТК формуються в процесі

функціонування окремих його елементів під впливом зовнішніх та внутрішніх фактів та є інтегративними показниками ЕТК, а не окремих його елементів.

Таким чином, ФКП підвищення ЯЕЕ з АП коректно називати такою ЕТК, яка: є керованим джерелом струму або напруги заданої величини та гармонійного складу; містить щонайменше один АП на основі сучасних активних елементів (IGBT, GTO, GCT, IGCT); має систему управління, що функціонує на основі теорії фазових перетворень, гармонійного аналізу, фазового автопідстроювання частоти (ФАПЛ) і має властивість самоадаптації; містить одне або кілька пасивних ФКП, з'єднаних з АП певним чином; може бути складовою ЕТК джерела РГ, ПН або окремо підключається пристроєм корекції ПЯЕЕ. Дане визначення є основою розвитку теорії структурного та параметричного синтезу ФКП з АП до централізованих, автономних та комбінованих СЕП.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

В цьому розділі «Активні перетворювачі та їх роль у покращенні якості електричної енергії в електротехнічних комплексах» було розглянуто основні аспекти впливу якості електричної енергії на роботу електроустаткування електротехнічних комплексів. Показано, що погана якість електроенергії, зокрема коливання напруги, гармонічні спотворення та збурення, можуть призводити до зниження ефективності роботи обладнання, прискореного зносу компонентів та підвищення експлуатаційних витрат.

Також було проаналізовано наявні типи активних перетворювачів, які відіграють ключову роль у підвищенні якості електроенергії. Ці пристрої дозволяють ефективно коригувати параметри мережі, забезпечуючи стабільність напруги та зниження рівня гармонічних спотворень.

Особлива увага була приділена сучасним пристроям на основі активних перетворювачів та фільтрокомпенсуючих пристроїв, які забезпечують комплексний підхід до вирішення проблем з якістю електричної енергії. Вони дозволяють оптимізувати роботу електротехнічних комплексів, забезпечуючи їх надійну та стабільну роботу.

РОЗДІЛ 2. МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В УМОВАХ ЗМІНИ ЗОВНІШНІХ І ВНУТРІШНІХ ФАКТОРІВ

2.1. Вибір типу та системи керування активними перетворювачами для покращення якості електроенергії

Одним з основних етапів структурного та параметричного синтезу ФКП з АП є виявлення чинників, визначальних необхідну ступінь корекції ПЯЕЕ та інших параметрів мережі, що зрештою відбиває рівень ефективності роботи ФКП з АП. Необхідна чи раціональна в заданих умовах ступінь корекції ПЯЕЕ визначається безліччю факторів, що впливають на життєвий цикл СЕП та електрообладнання. При цьому необхідно оцінити взаємозв'язок між ПЯЕЕ та зазначеними факторами. Також при структурному та параметричному синтезі ФКП з АП слід враховувати різні шляхи формування несинусоїдальних режимів, коли АП є елементом мережі живлення і підключеного навантаження.

Вплив активних перетворювачів на параметри несинусоїдальних режимів

У першому випадку несинусоїдальний режим формується вищих гармонійних складових напруги, яка прикладена до вузлів навантаження і породжує споживання несинусоїдального струму. При цьому АП входять до складу ЕТК РГ (ВЕУ, ФЕС, МДТУ, які працюють на ПНГ). Також самі генератори альтернативних і відновлюваних джерел мають певну несинусоїдальність вихідний ЕРС. Згідно з результатами експериментальних досліджень ЕРС на виході генератора з постійними магнітами містить такі вищі гармонійні складові (див. рис. 2.1): $E_5 = 6\%$, $E_7 = 0,35\%$, $E_{11} = 2,7\%$, $E_{13} = 0,35\%$, $E_{17} = 0,5\%$, $E_{19} = 0,7\%$. Також за результатами експериментальних досліджень виявлено параметри несинусоїдального режиму ВЕУ потужністю 18 МВт (30 вітрогенераторів потужністю 600 кВт кожен), яка підключена до ЦЕС.

При цьому виявлено, що активні потужності 5 і 7 вищих гармонійних складових, обчислені згідно з IEEE 1459-2010, мають негативне значення, і переходять від ВЕУ в ЦЕС, що підтверджує генерацію 5 та 7 вищі гармоніки струму з боку ВЕУ.

Також відомі результати досліджень несинусоїдальних режимів, створюваних ФЕС, що живлять побутові споживачі.

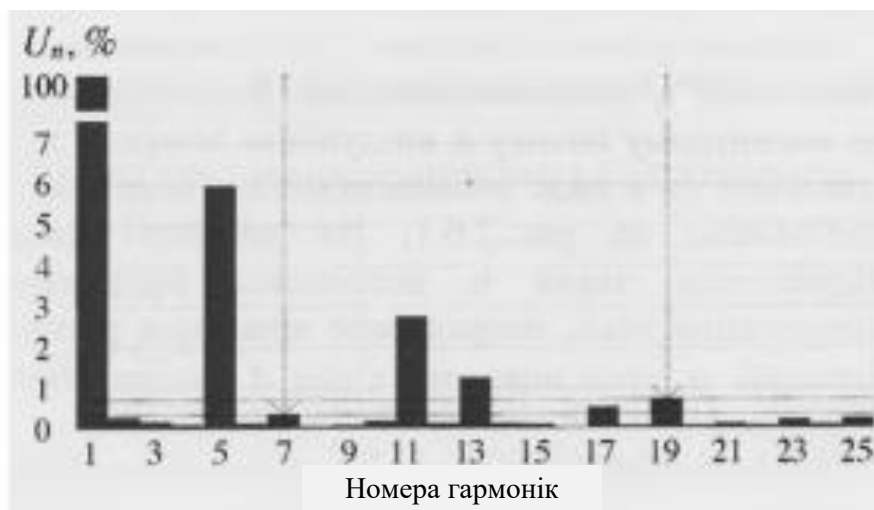


Рисунок 2.1. – Спектр вищих гармонік струму лінійної ЕДС генератора з постійними магнітами

На рисунку 2.2 наведено спектральний склад сумарного струму, що споживається від однієї ФЕС з АП за відсутності ПН. Сумарний коефіцієнт гармонійних складових струму для однієї ФЕС становить 6,09 % навіть за відсутності ПН, зі збільшенням кількості ФЕС цей коефіцієнт істотно зросте. У другому випадку ПН або вузол з ЛН та ПН у певному співвідношенні споживає несинусоїдальний струм, вищі гармоніки струму якого, проходячи через опори елементів електричної мережі, наводять появі вищих гармонік струму в напрузі мережі. При цьому АП у більшості випадків входять до складу ЕМК ЧРП промислових установок, які є основним видом ПН.

Необхідно враховувати також наявність та інших видів ПН, зокрема перетворювальних установок плавильних печей металургії, зварювального обладнання, газорозрядних ламп, а також ЕМ та СТ, що працюють у режимах, близьких до насичення. Однак, згідно з результатами теоретичних та

експериментальних досліджень, відображених у вітчизняних та зарубіжних наукових працях, основним та переважним видом ПН, що вносить основний внесок у несинусоїдність споживаного струму, є ЕМКЧРП з АП. Таким чином, у рамках цих досліджень під ПН розуміється таке навантаження, яке споживає струм, що містить вищі гармоніки струму певного рівня, в номінальному режимі роботи тривалістю значно перевищує час перехідних процесів, пов'язаних з пуском та зупиненням ЕМ, насиченням СТ, відключенням КЗ, перемиканнями в електричних мережах, а також за відсутності будь-яких ненормальних режимів, пов'язаних з перевантаженнями, перенапругами, відхиленнями параметрів від номінальних значень.

Основними інтегральними показниками, що описують будь-який несинусоїдальний режим електричної мережі, є сумарні коефіцієнти вищих гармонік напруги та струму (k_U і k_I відповідно), методи розрахунку та визначення яких відомі, їх нормативні значення відображені у вітчизняних та міжнародних стандартах. Наявність ПН як основного джерела вищих гармонійних складових в якому-небудь вузлі електричної мережі (точці передачі, ТОП) з точки зору ступеня її впливу на параметри та режими роботи мережі може бути охарактеризовано такими показниками: сумарний коефіцієнт гармонійних складових струму k_I та напруги k_U на затисканнях ПН; сумарний коефіцієнт спотвореного спотворення на затисках ПН; наявністю якихось неактивних складових повної потужності.

ДСТ нормується лише величина k_U у точці передачі електричної енергії, яка може перебувати на певній відстані від джерела спотворень – вузла з ЛН та ПН. Міжнародними стандартами США (IEEE Std. 1459-2010, IEEE Std 519-2014) нормується як величина $k_U U$ (англійська інтерпретація: total harmonic distortion THDU), так і величина k_I (англійська інтерпретація: total harmonic distortion THDI), причому величини THDU та THDI можуть визначатися як щодо середньоквадратичних значень основних складових U_1 та I_1 згідно з виразами (1.3).

Сумарний коефіцієнт спотвореного спотворення (англійська інтерпретація: total demand distortion TDD) вводиться та нормується зазначеними стандартами IEEE:

$$TDD = \sqrt{\sum_{n \geq 2}^{\infty} I_n^2} / I_H \quad (2.1.)$$

де I_H – номінальний струм, який споживається НН або вузлом з ЛН і НН.

Таким чином, параметри, що безпосередньо характеризують режим генерації вищих гармонік струму ПН або вузлом з ЛН та ПН, вітчизняною нормативною базою не регламентуються, а нормується лише ступінь впливу джерел вищих гармонік струму на рівень спотворення форми кривої напруги в заданій точці електричної мережі (точці передачі електричної енергії або ТПЕ).

Таблиця 2.1 - Нормально допустимі (чисельник) та гранично допустимі (знаменник) значення $k_{U(n)}$, отримані за результатами досліджень

n	$U_H < 1 \text{ кВ}$	$U_H = 6 - 20 \text{ кВ}$
	$k_{U(n)}, \%$	$k_{U(n)}, \%$
35	1,13/1,7	0,77/1,16
37	1,08/1,62	0,74/1,11
53	0,81/1,22	0,58/0,87
55	0,79/1,19	0,56/0,84
73	0,65/0,97	0,47/0,71

Складові коефіцієнта потужності при несинусоїдальних режимах

При формуванні несинусоїдальних режимів з боку джерел та навантаження з урахуванням наявності АП також особливої актуальності набуває проблема корекції коефіцієнта потужності. За наявності у вузлі навантаження ЛН та ПН, а також несинусоїдності з боку джерела ступінь наявності реактивної потужності та необхідності її компенсації різними технічними засобами та рішеннями не може бути повністю описана

традиційною величиною коефіцієнта потужності через наявність вищих гармонійних складових струму та напруги. При цьому для повного опису процесів необхідно розглядати п'ять основних режимів:

- ✓ синусоїдальне джерело, що живить ПН;
- ✓ несинусоїдальне джерело, що живить ЛН;
- ✓ несинусоїдальне джерело, що живить ПН;
- ✓ несинусоїдальне джерело, що живить вузол з ЛН та ПН;
- ✓ синусоїдальне джерело, що живить вузол з ЛН та ПН.

Для першого режиму справедливі наступні співвідношення:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1; I = I_1 \cdot \sqrt{1 + k_I^2}; \lambda_M = \cos\varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + k_I^2}} = \lambda_{M1} \cdot \lambda_{\text{Мшук.НН}}$$

(2.2.)

де: λ_{M1} - складова коефіцієнта потужності, обумовлена фазовим зсувом між напругою та струмом першої гармоніки,

$\lambda_{\text{Мшук.НН}}$ - складова коефіцієнта потужності, обумовлена наявністю гармонійних спотворень з боку ПН.

Таким чином, коефіцієнт потужності за наявності синусоїдального джерела і ПН може коригуватися двома шляхами: зниження λ_{M1} або $\lambda_{\text{Мшук.НН}}$.

Для другого режиму справедливі наступні співвідношення:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1; U = U_1 \cdot \sqrt{1 + k_U^2}; \lambda_M = \cos\varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + k_U^2}} = \lambda_{M1} \cdot \lambda_{\text{Мшук.НН}}$$

(2.3)

$\lambda_{\text{Мшук.НН}}$ - складова коефіцієнта потужності, обумовлена наявністю гармонійних спотворень із боку джерела. Також в даному режимі сумарний коефіцієнт потужності може коригуватися двома способами: зниження λ_{M1} або $\lambda_{\text{Мшук.НН}}$.

Розглянуті режими є ідеалізованими і практично не зустрічаються у реальних електричних мережах, але отримані під час розгляду закономірності служать теоретичною основою аналізу складніших режимів.

Традиційними засобами корекції λ_{M1} в першому і другому режимах є установки поперечної і поздовжньої ємнісної компенсації відповідно, які в контексті складніших режимів можна розглядати як пасивні ФКП.

Значення λ_{M1} та $\lambda_{M\text{шук.НН}}$ можуть коригуватися як АП, так і пасивними ФКП.

Для третього режиму справедливо наступне:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n; \lambda_M = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{U \cdot I};$$

$$\lambda_M = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+k_U^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+k_I^2}} = \frac{P}{S_I} \cdot \lambda_{M\text{пош.}};$$

$$\frac{P}{S_1} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{S_1} + \frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{S_1}; \lambda_M = \left(\lambda_{M1} + \frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{S_1} \right) \cdot \lambda_{M\text{пош.}} \quad (2.4)$$

де $\lambda_{M\text{пош.}}$ - складова коефіцієнта потужності, обумовлена наявністю гармонійних спотворень з боку ПН та мережі живлення. З урахуванням (2.2) та (2.4) справедливо наступне:

$$\lambda_{M.\text{пош.}} = \lambda_{M.\text{пош.дж.}} \cdot \lambda_{M.\text{пош.НН}} = \frac{1}{\sqrt{1+k_U^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+k_I^2}} \quad (2.5)$$

Вираз (2.5) встановлює взаємозв'язок між складовою коефіцієнта потужності, обумовленої вищих гармонік напруги джерела та струму ПН, та відповідними сумарними коефіцієнтами гармонічних спотворень I_k і U_k що дозволяє оцінити внесок вищих гармонійних складових джерела і ПН у рівень реактивної потужності при несинусоїдальних режимах. Також вираз (2.5) дозволяє оцінити внесок корекції вищих гармонік напруги джерела або вищих гармонійних складових ПН тим чи іншим технічним засобом або рішенням значення складової коефіцієнта потужності, обумовленої гармонічними спотвореннями.

Найбільш ефективним способом перевірки є комп'ютерне імітаційне моделювання вузла навантаження з ЛН та ПН в умовах несинусоїдності джерела з використанням даних про реальні СЕП, навантаження та елементи

електричних мереж. На рисунку 2.4 наведено узагальнену схему для моделювання.

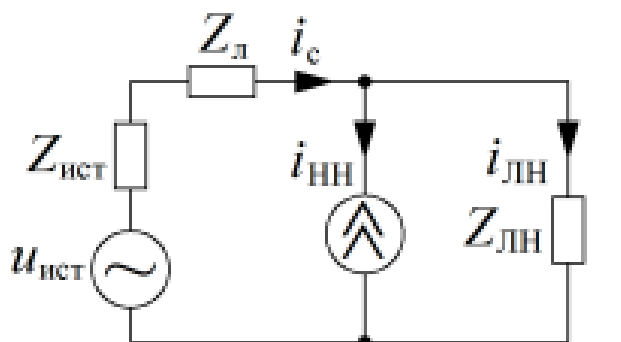


Рисунок 2.4 – Узагальнена схема для моделювання несинусоїдальних режимів

Джерело (ТПЕ або точка підключення) і вузол навантаження, що містить ЛН та ПН, з'єднані між собою лінією ($Z_{\text{л}}$), довжина якої може змінюватись у певних межах виходячи з умов допустимого рівня втрати напруги (0,4 кВ). Параметри джерела ($Z_{\text{ист}}$) прийнято за результатами опосередкування експериментальних даних для умов промислових підприємств. Параметри ПН також підібрано виходячи з даних експериментальних досліджень ПЧ ПЕД ЕЦН нафтопромислів. Також при моделюванні прийнято наступні припущення: ЛН представлена у вигляді активно-індуктивного навантаження, ПН моделюється за допомогою трифазного мостового некерованого випрямляча, як найбільш поширеного у складі вироблених і експлуатованих ПЧ, мережа живлення представлена у вигляді джерела напруги з внутрішнім активно-індуктивним опором.

В таблиці 2.2 наведено результати моделювання.

Таблиця 2.2 - Величини струмів та напруг на затискачах ЛН, ПН та в ТОП

$U_{\text{ЛН}}$	$U_{1\text{ЛН}}$	$k_{U\text{ЛН}}$	$I_{\text{ЛН}}$	$I_{1\text{ЛН}}$	$k_{IU\text{ЛН}}$
308,83	302	25,04	105,97	109,4	13,26
$U_{\text{ПН}}$	$U_{1\text{ПН}}$	$k_{U\text{ПН}}$	$I_{\text{ПН}}$	$I_{1\text{ПН}}$	$k_{I\text{ПН}}$
308,83	302	25,04	102,15	109	25,1

$U_{\text{ТОП}}$	$U_{1\text{ТОП}}$	$k_{U\text{ТОП}}$	$I_{\text{ТОП}}$	$I_{1\text{ТОП}}$	$k_{1\text{ТОП}}$
308,83	302	25,04	207,66	215,9	13,47

Дані таблиці 2.2 дозволяють стверджувати, що з похибкою трохи більше 3 % справедливі такі висловлювання:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ТОП}} &= U_{1\text{ТОП}} \cdot \sqrt{1 + k_{U\text{ТОП}}^2}; U_{\text{НН}} = U_{1\text{НН}} \cdot \sqrt{1 + k_{U\text{НН}}^2}; \\
 U_{\text{ЛН}} &= U_{1\text{ЛН}} \cdot \sqrt{1 + k_{U\text{ЛН}}^2}; \\
 I_{\text{ТОП}} &= I_{1\text{ТОП}} \cdot \sqrt{1 + k_{I\text{ТОП}}^2}; I_{\text{НН}} = I_{1\text{НН}} \cdot \sqrt{1 + k_{I\text{НН}}^2}; \\
 I_{\text{ЛН}} &= I_{1\text{ЛН}} \cdot \sqrt{1 + k_{I\text{ЛН}}^2} \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

Аналогічні співвідношення з такою самою точністю справедливі й у перших двох ідеалізованих режимів. Також за результатами моделювання встановлені наступні співвідношення для частоти n -ої вищих гармонік струму:

$$\begin{aligned}
 S_{n\text{НН}} &= \sqrt{P_{n\text{НН}}^2 + Q_{n\text{НН}}^2}; S_{n\text{ЛН}} = \sqrt{P_{n\text{ЛН}}^2 + Q_{n\text{ЛН}}^2}; S_{n\text{ТОП}} = \sqrt{P_{n\text{ТОП}}^2 + Q_{n\text{ТОП}}^2}; \\
 P_{n\text{ТОП}} &\neq P_{n\text{НН}} + P_{n\text{ЛН}}; Q_{n\text{ТОП}} \neq Q_{n\text{НН}} + Q_{n\text{ЛН}} \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

При цьому з похибкою менше 1% справедливо наступне:

$$S_{n\text{ТОП}} = S_{n\text{НН}} - S_{n\text{ЛН}} \quad (2.8)$$

Вирази (2.6)-(2.8) справедливі для вищих гармонік струму, порядок яких відповідає спектральному складу струму, що споживається ПН. Для вищих гармонік струму, порядок яких відповідає спектральному складу напруги джерела, справедливо наступне:

$$\begin{aligned}
 S_{n\text{НН}} &= 0; S_{n\text{ТОП}} = S_{n\text{ЛН}}; P_{n\text{ТОП}} = P_{n\text{ЛН}}; Q_{n\text{ТОП}} = Q_{n\text{ЛН}}; \\
 S_{n\text{ТОП}} &= \sqrt{P_{n\text{ТОП}}^2 + Q_{n\text{ТОП}}^2}; \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

Також справедливим є наступне:

$$S_n = U_n \cdot I_n; P_n = U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n; Q_n = U_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n$$

Таким чином, результати моделювання дозволяють стверджувати, що співвідношення між активною, реактивною та повною потужностями, справедливі для основної гармоніки та є класичними:

$$S_{1\text{НН}} = \sqrt{P_{1\text{НН}}^2 + Q_{1\text{НН}}^2}; S_{1\text{ЛН}} = \sqrt{P_{1\text{ЛН}}^2 + Q_{1\text{ЛН}}^2}; S_{1\text{ТОП}} = \sqrt{P_{1\text{ТОП}}^2 + Q_{1\text{ТОП}}^2};$$

$$P_{1\text{ТОП}} = P_{1\text{НН}} + P_{1\text{ЛН}}; Q_{1\text{ТОП}} = Q_{1\text{НН}} + Q_{1\text{ЛН}} \quad (2.11)$$

не можуть бути застосовні до частот вищих гармонійних складових під час аналізу параметрів несинусоїдальних режимів. Однак, згідно з результатами моделювання з похибкою менше 5%, справедливо наступне:

$$P_{\text{ТОП}} = P_{1\text{ТОП}} + \sum_{n=2}^N P_{n\text{ТОП}} \quad (2.12)$$

де n - порядок вищих гармонійних складових від джерела та навантаження.

Виходячи з отриманих результатів коефіцієнт потужності для даного режиму можна оцінити наступним чином:

$$\lambda_{\text{ТОП}} = \frac{P_{\text{ТОП}}}{S_{\text{ТОП}}}$$

$$= \frac{U_{1\text{ТОП}} \cdot I_{1\text{ТОП}} \cdot \cos\varphi_{1\text{ТОП}} + \sum_{m=m_1}^M U_{m\text{ТОП}} \cdot I_m \cdot \cos\varphi_{m\text{ТОП}} + \sum_{l=l_1}^L U_{1\text{ТОП}} \cdot I_{1\text{ТОП}} \cdot \cos\varphi_{l\text{ТОП}}}{U_{\text{ТОП}} \cdot I_{\text{ТОП}}} \quad (2.13)$$

У виразі (2.13) m – порядок вищих гармонік струму із боку ПН,

l – порядок вищих гармонік струму із боку ПН джерела.

Далі вираз (2.13) перетворюється як

$$\lambda_{\text{ТОП}} = \frac{U_{1\text{ТОП}} \cdot I_{1\text{ТОП}} \cdot \cos\varphi_{1\text{ТОП}} + \sum_{m=m_1}^M U_{m\text{ТОП}} \cdot I_m \cdot \cos\varphi_{m\text{ТОП}} + \sum_{l=l_1}^L U_{1\text{ТОП}} \cdot I_{1\text{ТОП}} \cdot \cos\varphi_{l\text{ТОП}}}{U_{1\text{ТОП}} \cdot \sqrt{1 + k_{U\text{ТОП}}^2} \cdot I_{1\text{ТОП}} \cdot \sqrt{1 + k_{I\text{ТОП}}^2}}$$

$$= \frac{\cos\varphi_{1\text{ТОП}}}{\sqrt{1 + k_{U\text{ТОП}}^2} \cdot \sqrt{1 + k_{I\text{ТОП}}^2}} + \frac{\sum_{m=m_1}^M U_{m\text{ТОП}} \cdot I_m \cdot \cos\varphi_{m\text{ТОП}}}{U_{1\text{ТОП}} \cdot I_{1\text{ТОП}} \cdot \sqrt{1 + k_{U\text{ТОП}}^2} \cdot \sqrt{1 + k_{I\text{ТОП}}^2}} + \frac{\sum_{l=l_1}^L U_{1\text{ТОП}} \cdot I_{1\text{ТОП}} \cdot \cos\varphi_{l\text{ТОП}}}{U_{1\text{ТОП}} \cdot I_{1\text{ТОП}} \cdot \sqrt{1 + k_{U\text{ТОП}}^2} \cdot \sqrt{1 + k_{I\text{ТОП}}^2}} +$$

$$\frac{D_{U\text{ДЖ}}}{S_{\text{ТОП}}} + \frac{D_{I\text{НН}}}{S_{\text{ТОП}}} \quad (2.14)$$

Співвідношення (2.14) показує, у сумарний коефіцієнт потужності в ТПЕ вносять внесок такі три фактори: основна складова вузла навантаження (λ_1), вищих гармонік струму, що споживаються ПН ($D_{I \text{ ПН}}$), вищих гармонік струму і напруги з боку джерела ($D_{U_{\text{дж}}}$). При цьому з похибкою менше 5% справедливе наступне співвідношення.

$$\lambda_{\text{ТОП}} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{1+k_{U_{\text{ТОП}}}^2} \cdot \sqrt{1+k_{I_{\text{ТОП}}}^2}} \quad (2.15)$$

Якщо $k_{U_{\text{ТОП}}} < 5 \%$, а $k_{I_{\text{ТОП}}} > 40 \%$, що відповідає практично ідеалізованій ЦЕС з нескінченно малим внутрішнім опором та незначним рівнем спотворень з боку мережі з переважанням вищих гармонійних складових з боку НН вираз (2.15) можна спростити таким чином:

$$\lambda_{\text{ТОП}} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{1+k_{I_{\text{ТОП}}}^2}} \quad (2.16)$$

У випадку, коли $k_{I_{\text{ТОП}}} < 10 \%$, а $k_{I_{\text{ТОП}}} > 40 \%$, що може відповідати автономній енергосистемі з РГ і високим рівнем ВГС напруги з боку джерела вираз (2.15) набуде наступного вигляду:

$$\lambda_{\text{ТОП}} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{1+k_{U_{\text{ТОП}}}^2}} \quad (2.17)$$

Також за результатами моделювання встановлено справедливість наступного вирази, наведеного в стандарті IEEE 1459-2010, для визначення чинного значення повної (здається) потужності при несинусоїдальному режимі, параметри якого формуються джерелом та навантаженням:

$$S^2 = (U \cdot I)^2 = (U_1^2 + U_{\text{ВГС}}^2) \cdot (I_1^2 + I_{\text{ВГС}}^2) = (U_1 \cdot I_1)^2 + (U_1 \cdot I_{\text{ВГС}})^2 + (U_{\text{ВГС}} \cdot I_1)^2 + (U_{\text{ВГС}} \cdot I_{\text{ВГС}})^2 = S_1^2 + S_{\text{ВГС}}^2 \quad (2.18)$$

Тому вираз (2.14) перетворюється на такий вид:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{P_1 + P_{\text{ВГС}}}{\sqrt{S_1^2 + S_{\text{ВГС}}^2}} = \frac{\frac{P_1}{S_1} \left(1 + \frac{P_{\text{ВГС}}}{P_1}\right)}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_{\text{ВГС}}^2}{S_1^2}}} \Rightarrow \lambda_{\text{ТОП}} = \lambda_1^2 \left(\frac{1 + \frac{2P_{\text{ВГС}}}{P_1} + \frac{P_{\text{ВГС}}^2}{P_1^2}}{\frac{S_1^2 + S_{\text{ВГС}}^2}{S_1^2}} \right) = \lambda_1^2 \left(\frac{S_1^2}{S_1^2 + S_{\text{ВГС}}^2} + \frac{2P_{\text{ВГС}}S_1^2}{P_1(S_1^2 + S_{\text{ВГС}}^2)} + \frac{P_{\text{ВГС}}^2S_1^2}{P_1^2(S_1^2 + S_{\text{ВГС}}^2)} \right) = \\ &= \lambda_1^2 \left(\frac{S_1^2}{S^2} + \frac{2P_{\text{ВГС}}S_1^2}{P_1S^2} + \frac{P_{\text{ВГС}}^2S_1^2}{P_1^2S^2} \right) = \lambda_1^2 \left(\frac{S_1}{S} \right)^2 \left(1 + \frac{P_{\text{ВГС}}}{P_1} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Прийнявши наступні позначення $k_{S1} = S_1/S$, $k_{pBГC} = (1 + P_{BГC}/P)$, отримаємо:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot k_{S1} \cdot k_{pBГC} \quad (2.20)$$

Таким чином, вираз (2.20) дозволяє встановити ступінь впливу вищих гармонійних складових напруги джерела та струму ПН на співвідношення між коефіцієнтом потужності за основною складовою (або коефіцієнтом зміщення) та сумарним коефіцієнтом потужності, що необхідно враховувати при структурному та параметричному синтезі ФКП з АП при несинусоїдальних режимах. Також вираз (2.20) дозволяє встановити критерії оцінки ефективності того чи іншого ФКП з АП та при корекції несинусоїдальних режимів. Коефіцієнт k_{S1} відображає ступінь завищення повної потужності трансформаторного та мережевого обладнання при несинусоїдальних режимах, при цьому критерієм ефективності корекції вищих гармонійних складових є:

$$k_{S1} = \frac{S_1}{S} \rightarrow 1 \quad (2.21)$$

Також справедливим є наступне:

$$k_{S1} = \frac{S_1}{S} = \frac{1}{\sqrt{1+k_U^2} \cdot \sqrt{1+k_I^2}} \quad (2.22)$$

У разі ідеалізованих ЦЕС з ПН, коли $k_U < 5 \%$, а $k_I > 40 \%$ величина S_1 змінюється не більше 0,74-0,93. У таблицях 2.3 та 2.4 наведено дані щодо діапазону зміни величин k_U та k_I для умов, де електропостачання технологічних споживачів здійснюється від автономних джерел РГ на основі ДГУ, ГПУ та ГТУ потужністю від 0,63 до 3,2 МВт.

Таким чином, для нафтопромислових мереж 0,4 кВ, де спостерігається найбільший рівень спотворень струму і напруги, коефіцієнт k_{S1} у найгірших умовах може досягати 0,84, що показує завищення повної потужності трансформаторного та мережевого обладнання на 19 % при подібних параметрах несинусоїдального режиму. На рисунку 2.5 наведено узагальнені залежності коефіцієнта k_{S1} від величин k_U та k_I для умов промислових

підприємств нафтової галузі, засновані на результатах експериментальних досліджень, які також можуть використовуватися як основа для визначення необхідного рівня корекції k_U та k_I ФКП з АП.

2.2. Оцінка необхідного рівня покращення якості електроенергії за допомогою фільтрокомпенсуючих пристроїв з активними перетворювачами

При структурному та параметричному синтезі ФКП з АП та необхідно визначити до якого рівня необхідно та доцільно здійснювати корекцію того чи іншого ПЯЕЕ при заданій сукупності факторів.

На рисунку 2.6 наведено залежності напрацювання на відмову ($t_{\text{відк}}$) занурювальних електродвигунів (ПЕД) установок НДП від коефіцієнта k_U (а), та ступеня зменшення паспортного терміну служби електроустановок (γ) від k_U (б), виявлені в процесі експериментальних досліджень в електричних мережах підприємств та статистичних даних. Представлені закономірності відображають ступінь впливу несинусоїдності форми кривої мережевої напруги на один із показників надійності роботи електрообладнання та рівень зниження терміну служби ізоляції електроустановок. Залежність рисунка 2.6 а апроксимована за результатами обробки значного обсягу експериментальних даних і може розглядатися як узагальнена закономірність впливу вищих гармонійних складових напруги на напрацювання на відмову.

При дослідженнях $t_{\text{відк}}$ змінювалася в межах від 20 до 400 днів при значеннях k_U від 2,5 до 8,4 %, що незначно перевищує ДСТ у 8% для мереж 0,4 кВ.

Закономірності рисунка 2.6 б отримані розрахунковим шляхом також з використанням експериментальних даних про рівень несинусоїдності напруги в мережах та довідкових даних про параметри ізоляції електрообладнання.

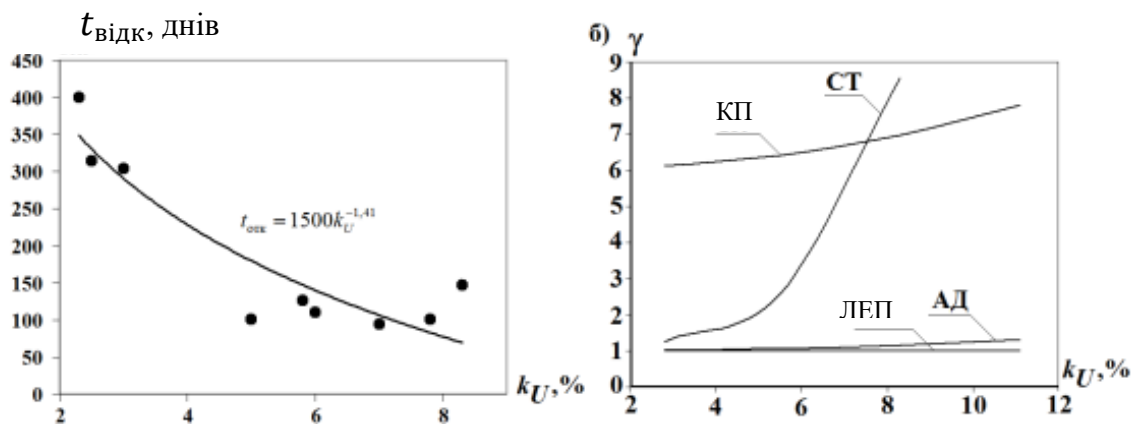


Рисунок 2.6 – а) залежність напрацювання на відмову ($t_{\text{відк}}$) ПЕД установок НДП от коефіцієнта k_U , б) залежності кратності зниження строку служби основного електроустаткування (γ) від k_U

Таким чином, представлені узагальнені закономірності можуть бути основою виявлення необхідного ступеня корекції k_U тим чи іншим технічним засобом або рішенням, включаючи ФКП з АП, за критерієм забезпечення необхідної тривалості терміну служби ізоляції та напрацювання на відмову електроустаткування.

За результатами експериментальних досліджень виявлено, що за перевищення $k_U < 5\%$ істотно (на $20 \div 35\%$) скорочується термін служби СТ 10/0,4 кВ.

Тож мереж НДП доцільно обмежити коефіцієнт k_U лише на рівні 5%. В таблиці 2.6 наведено граничні величини завантаження СТ 10/0,4 кВ струмами ПН виходячи з умови обмеження $k_U \leq 5\%$ та наявності 1% спотворень у мережі 6 (10) кВ. Для нафтопромислових мереж критичним є рівень $k_U=2,5\%$ на рівні 0,4 кВ.

Великі спотворення починають суттєво скорочувати термін служби електрообладнання промислових підприємств нафтової галузі, насамперед електрозанурювальні установки (ЕЗУ) та КП.

Крім цього, необхідно розглядати вплив несинусоїдальних режимів на теплові процеси в ЕМ. Згідно з результатами досліджень наявність Високочастотні вищі гармонійні складові в роторі АТ, які наводяться

просторовими вищі гармонійні складові повітряного зазору, зумовлює до 25% від сумарних втрат у сталі АТ, що працює при ковзанні 0,033.

Таблиця 2.6 - Допустимі рівні ПН

Потужність СТ, кВА	Струм (потужність), А (кВт)	
	Мережа без ЕЗУ	Мережа з ЕЗУ
100	75 (52)	37 (26)
160	120 (83)	60 (41)
250	188 (130)	94 (65)
400	300 (208)	150 (104)
630	470 (325)	235 (162)
1000	755 (522)	372 (261)

Також виявлено теоретичні та експериментальні залежності високочастотних втрат у АТ P_n , підключеному до ПЧ, від несучої частоти ШІМ f (див. рис. 2.7). ЕМ, що обертаються, є основним видом навантаження в умовах будь-якої галузі промисловості, тому рівень втрат у них і теплові режими їх роботи можуть бути одними з ключових факторів визначення необхідного рівня корекції несинусоїдальних режимів ЕТК з АП і ФКП. Для типової СЕП в умовах промислових підприємств нафтової галузі, представленої на рисунку 2.8, установка електровідцентрового насоса з двигуном ЕД 28-117 Т1Р і трансформатором ТМП-63/856, а також кабельної лінії з алюмінієвим кабелем АВВГ перерізом $3 \times 16 \text{ мм}^2$ довжиною 0,3 додаткові втрати через спотворення струму на ділянці мережі, що живить ПЧ і включає лінію та трансформатор.

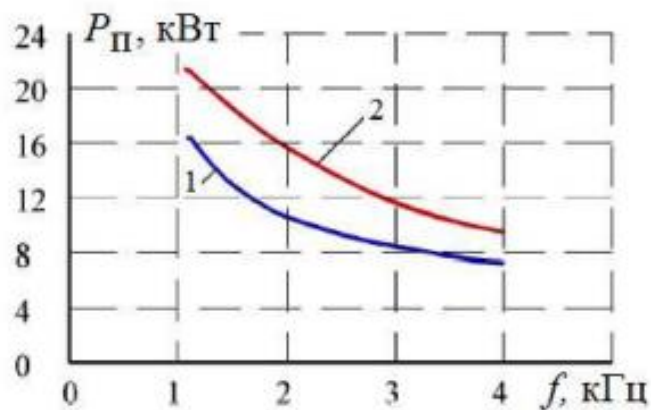


Рисунок 2.7 – Теоретичні (1) та експериментальні (2) закономірності зміни величини високочастотних втрат у АТ від несучої частоти ШІМПЛ

Результати розрахунків показали, що величина сумарних основних втрат енергії для даної ділянки мережі становить 61525 кВт·год/рік, при цьому величина додаткових втрат через спотворення на тій самій ділянці – 5649 кВт·год/рік, що становить 9,3% від рівня основних втрат.

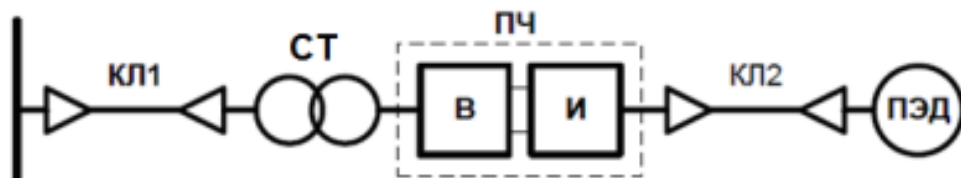


Рисунок 2.8 – Типова схема живлення установки електровідцентрових насосів

Це підтверджує висновки аналогічних досліджень, де встановлено, що додаткові втрати від гармонійних спотворень може досягати 15 % від основних втрат. Зазначені фактори визначають ступінь завищення параметрів при виборі електрообладнання, а також можливе обмеження частки підключеної ПН.

Наприклад, обмеження встановленої потужності ПН, підключеної до СТ, до 15-20% від номінальної потужності СТ застосовується у СЕП нафтопромислів, при цьому реалізувати його не завжди технічно можливо.

Несинусоїдальні режими також впливають на рівень вібрації електродвигунів електромеханічних комплексів. На рисунку 2.9 представлені закономірності зміни рівня вібрації АТ виходячи з номера вищих гармонійних струму (1 – вібрація на частоті основної гармоніки; 2, 3, 4 – ступінь вібрації на частотах відповідно $f_1 < f < 100$ Гц, $150 < f < 1000$ Гц, $f > 1000$ Гц.

Провали, відхилення і несиметрія напруги живлення можуть надавати безпосередній вплив на стійкість ЕТК. Відомі результати досліджень, в яких аналізується вплив несиметрії напруги на стійкість ЦД серії СТД. На рисунку 2.10 наведено межі стійкості ЦД типу СТД-6300, отримані за результатами даних досліджень.

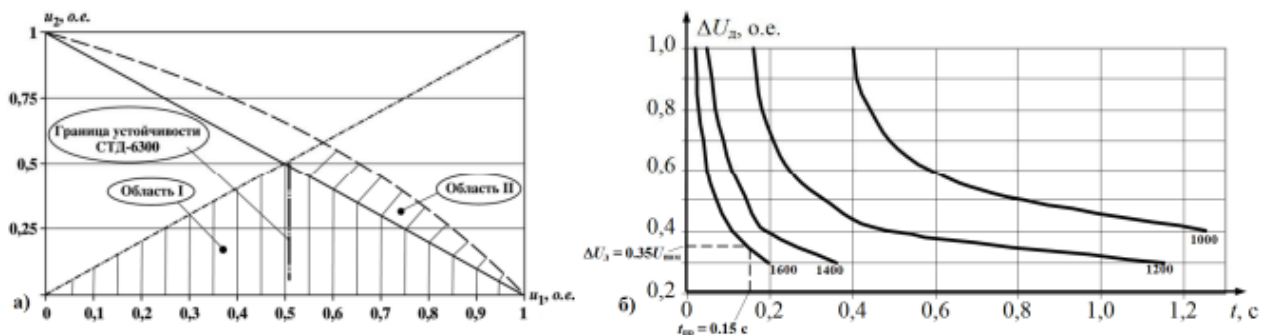


Рисунок 2.10 – а) області та межі напруги зворотної послідовності при різних величинах фазового кута між струмом та напругою ψ для двигуна СТД-6300; б) закономірність зміни критичного рівня втрат напруги живлення ПЕД від його часу його існування при його подальшому відновленні до 80% при різних довжинах підвісу ПЕД L

Отримані закономірності зворотної послідовності напруги мережі є функціями двох змінних. Аналіз залежностей рисунка 2.10 а показав, що стійкість ЦД залежить тільки від значення напруги прямої послідовності, при цьому область I можлива за будь-яких величин кута ψ , а область II - тільки при окремих значеннях ψ . Також необхідно зазначити, що величина коефіцієнта несиметрії не впливає на стійкість ЦД. Також, згідно з результатами досліджень, для занурювальних електродвигунів отримано залежності зміни

допустимого рівня провалу напруги (ΔU_d) від часу його існування та ступеня його відновлення (U_v) при значенні коефіцієнта використання $k_i = 1$ (див. рисунок 2.10 б).

Виявлено, що критичний рівень допустимої втрати напруги при $L = 1000$ м та часу існування провалу 0,45 с становить 0,4 в.о. Виявлені закономірності дають можливість визначити критичний рівень втрати напруги мережі, а також вихідну напругу ДБЖ, при яких підтримується належний режим динамічної стійкості технологічного обладнання. Показані на рисунку 2.11 а залежності ковзання занурювального двигуна від часу та глибини провалу напруги є підтвердженням достовірності результатів досліджень.

На рисунку 2.11 б наведено закономірності зміни критичної втрати напруги мережі виходячи з часу КЗ для СДН-15-49-6 при різних величинах інерційної постійної часу T_j при півторакратному форсуванні напруги збудження.

Виявлені закономірності падіння напруги від часу КЗ дають можливість визначити межі статичної стійкості ЦД у разі КЗ в мережі. З рисунку 2.11 б випливає, що при $T_j = 5$ с, $\Delta t = 0,25$ с максимальний ступінь зменшення напруги мережі, коли ЦД зберігає синхронізм, складає $\Delta U_d = 0,775$ в.о. Очевидно, що при зниженні моменту інерції механізму та збільшенні коефіцієнта завантаження ЦД знижується межа статичної стійкості останнього.

Зрештою, наведені залежності та закономірності дозволяють стверджувати, що основними факторами, що визначають необхідний ступінь корекції ПKE ЕТК з АП та ФКП, є:

- ✓ кратність зниження терміну служби та напрацювання на відмову основного електроустаткування;
- ✓ статична та динамічна стійкість ЕМК з АТ та ЦД;
- ✓ втрати енергії в ЕМК з АТ та ЦД;
- ✓ вібрація в ЕМК з АТ та ЦД.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

В ході аналізу було встановлено, що активні перетворювачі електричної енергії функціонують в умовах постійної зміни зовнішніх і внутрішніх факторів. Зовнішні фактори, такі як зміна напруги живлення, температури навколишнього середовища, вібрації чи електромагнітні перешкоди, можуть суттєво впливати на стабільність та ефективність роботи перетворювачів. Внутрішні фактори, зокрема параметричні зміни елементів схеми, старіння компонентів та зміни в навантаженні, також вимагають врахування для забезпечення високих показників продуктивності й надійності перетворювачів.

Одним із важливих результатів є підтвердження необхідності використання адекватних математичних моделей для опису процесів у перетворювачах в умовах нестабільності. Моделювання дозволяє вивчати різні сценарії роботи перетворювачів при зміні як зовнішніх, так і внутрішніх факторів, що допомагає передбачити поведінку системи в реальних умовах експлуатації. Основні моделі ґрунтуються на системах рівнянь, що описують електричні, теплові й механічні процеси, а також враховують нелінійність і динаміку компонентів.

Дослідження активних перетворювачів проводиться з використанням комплексу експериментальних методів, зокрема осцилографічних вимірювань, спектрального аналізу та температурного моніторингу. Встановлено, що комплексний підхід до аналізу характеристик перетворювачів, який включає одночасне вимірювання електричних, температурних і механічних параметрів, дозволяє більш точно визначати їхні робочі характеристики та оцінювати вплив різних факторів на стабільність роботи.

Результати досліджень дозволяють визначити оптимальні режими роботи активних перетворювачів при впливі різних зовнішніх і внутрішніх факторів. Використання адаптивних алгоритмів управління дозволяє підвищити стійкість роботи системи в умовах мінливих параметрів. Зокрема, адаптація до

зміни напруги чи частоти живлення дозволяє значно знизити втрати енергії та підвищити ККД перетворювачів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення більш складних моделей перетворювачів, зокрема тих, що працюють у надшвидкісних або екстремальних умовах. Крім того, перспективним напрямком є розвиток технологій інтелектуального управління перетворювачами з використанням методів штучного інтелекту, що дозволить забезпечити ще більш високу надійність та ефективність в умовах змінних впливів.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА СТРУКТУРИ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ СИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1. Моделі основних структур фільтрокомпенсуючих систем із застосуванням активних перетворювачів

Більшість ЕТК підвищення ЯЕЕ на основі АП та ФКП мають у своїй основі гібридні структури, з урахуванням АФ і ПФ. Спільне застосування АФ та ПФ у рамках єдиних ЕТК ФКП доцільно та ефективно, виходячи з наступних факторів:

окремо підключаються АФ, як правило, мають значні номінальні параметри, розраховані з урахуванням повної потужності підключеної ПН, що збільшує вартість АФ та обмежує можливості їх застосування у промислових СЕП;

добре відомі переваги ПФ та їх наявність у складі багатьох типів електроустаткування.

Зазначені фактори доводять актуальність та перспективність застосування АФ та ПФ у рамках єдиних ЕТК багатофункціональних ФКП з покращеними техніко-економічними показниками.

Подібні ЕТК також називають ГФ, при цьому АФ здійснює регулювання параметрами ПФ.

На рисунках 3.1 показані основні топології ГФ. Генерацію модульованих величин струму або напруги на виході активної частини ГФ необхідно розглядати як зміну миттєвої величини вхідного опору АФ $z_{\text{АФ}}(t)$, що визначається середніми значеннями $i_{\text{АФ}}(t)$ та $u_{\text{АФ}}(t)$. У разі АФ з накопичувачем у вигляді конденсатора $z_{\text{АФ}}(t)$ визначається як

$$z_{\text{АФ}} = \frac{u_{\text{АФ}}(t)}{i_{\text{АФ}}(t)} = \frac{U_d m(t)}{i_{\text{АФ}}(t)} \quad (3.1.)$$

де U_d – середня величина напруги ємнісного накопичувача,

$m(t)$ – функція модуляції.

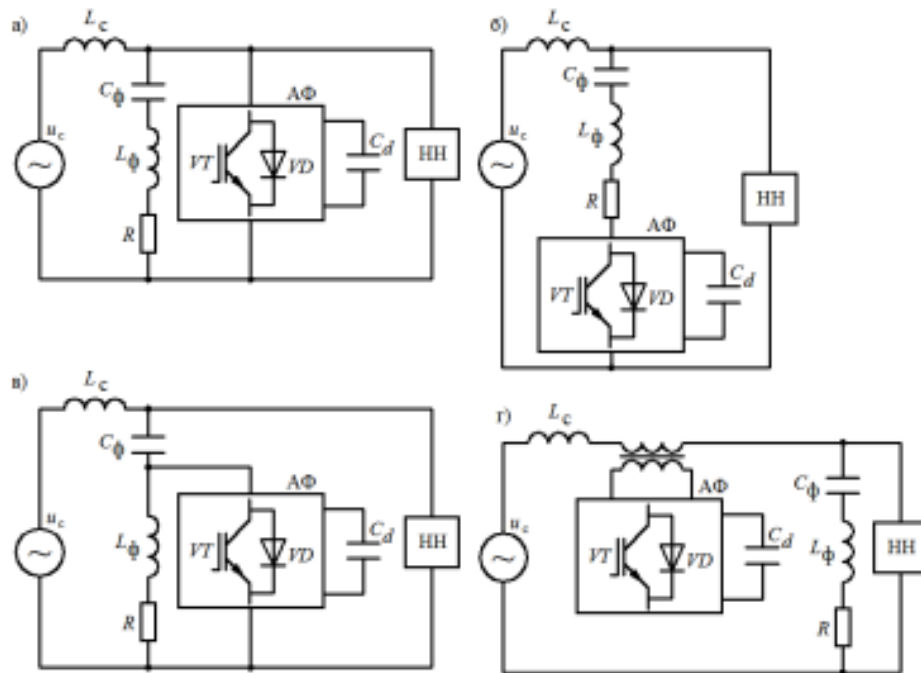


Рисунок 3.1 – Схеми підключення АФ до ПФ

Вираз (3.1) показує, що з підборі відповідного характеру функції модуляції $m(t)$ можна досягти, щоб $z_{АФ} = \frac{dz_{АФ}(t)}{dt}$ що рівносильне наявності активного опору, позитивного чи негативного. При цьому позитивна величина відповідає споживанню енергії накопичувального елемента, а негативна - генерацію енергії. Якщо інтегральне значення $z_{АФ}(t)$ за період першої гармоніки дорівнює нулю, це є ознакою обміну неактивними складовими повної потужності між активною частиною ГФ, мережею та підключеною ПН. Також є можливість управління АЧХ та ФЧХ ГФ шляхом зміни $z_{АФ}(t)$.

Обмежувальним фактором виступають частотні характеристики силових ключів АФ і накопичувального елемента, ємність якого визначає швидкість споживання або генерації енергії.

Топологія ГФ і вид функції модуляції безпосередньо впливають на характер еквівалентного опору $z_{АФ}(t)$.

ГФ дозволяють вирішувати такі ключові завдання:

- ✓ підвищити рівень ефективності фільтрації ВГС у статичних режимах роботи за рахунок управління АЧХ ГФ;
- ✓ запобігти наявності «антирезонансу» на частотах у безпосередній близькості до частоти пригніченої вищих гармонійних складових;
- ✓ компенсувати побічні резонанси через пасивні елементи ГФ;
- ✓ зменшити рівень ВДС.

Таким чином, теорія ГФ є основою формування методології структурного та параметричного синтезу ЕТК корекції ПЯЕЕ на основі АП і ФКП.

Всі ГФ засновані на ПАФ і ПСАФ, що функціонують відповідно як контрольоване джерело струму і напруги відповідно.

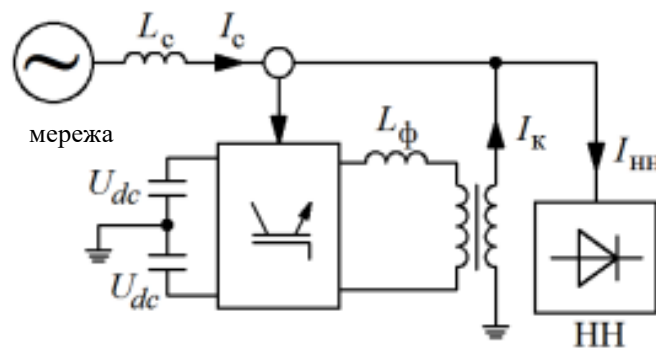


Рисунок 3.2 - ПАФ як джерела струму, підключений до мережі через узгоджуючий СТ

На рисунку 3.2 показано підключення ПАФ через узгоджуючий трансформатор до електричної мережі (I_M – струм мережі, L_M – індуктивність мережі, L_ϕ – індуктивність вихідних дроселів ПАФ, U_{dc} – напруга ланки постійного струму ПАФ, $I_{нн}$ – струм, споживаний ПН).

У випадку система управління ПАФ формує опорний струм для інвертора і для вищих гармонійних складових n -ого порядку справедливе співвідношення:

$$I_{kn} = I_{ннn} - I_{mn} \quad (3.2)$$

де: I_{kn} -компенсаційний струм ПАФ на частоті n -ої вищих гармонійних складових,

$I_{ннп}$ - струм n -ої вищих гармонійних складових, споживаний ПН,

I_{mn} - струм мережі на частоті n -ої вищих гармонійних складових.

За умови ідеальної компенсації вираз (3.2) набуде наступного вигляду:

$$i_c = i_{нн1} \quad (3.3.)$$

В більшості існуючих та серійно вироблених ПАФ для умов низьковольтних мереж узгоджувальний СТ, як правило, відсутній.

На рисунку 3.3 наведено схему заміщення ПАФ на частоті n -ої ВГС вищих гармонійних складових (U_{cn} – напруга n -ої вищих гармонійних складових мережі, I_{cn} – струм n -ої вищих гармонійних складових мережі, Z_{cn} – повний опір мережі на частоті n -ої вищих гармонійних складових, $I_{ннп}$ – струм n -ої вищих гармонійних складових НН, $U_{топн}$ - напруга n -ої вищих гармонійних складових у точці загального приєднання (ТОП) ПАФ і ПН, I_{kn} - компенсаційний струм n -ої вищих гармонійних складових ПАФ).

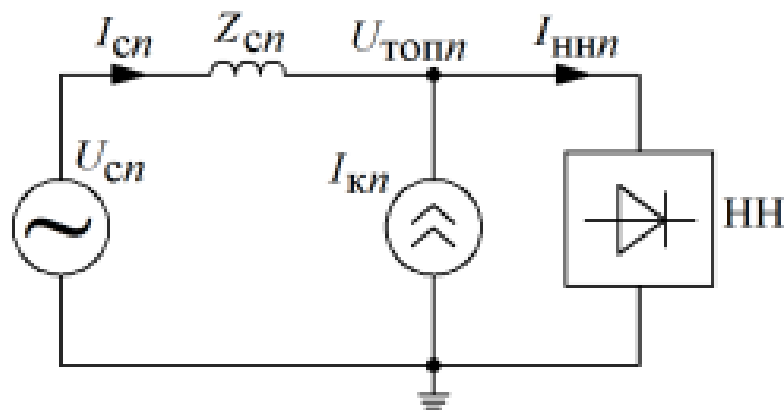


Рисунок 3.3 -Схема заміщення ПАФ на частоті n -ої вищих гармонійних складових

Як видно із схеми рисунка 3.3 для спрощених розрахунків та моделювання ПАФ може бути представлений у вигляді керованого джерела струму величиною I_{kn} . При аналізі режимів роботи ГФ доцільно розділити ПН

на два основні типи: джерела вищих гармонійних складових струму та напруги. За наявності ПН як джерел вищих гармонійних складових струму значення повного опір мережі Z_c не впливає ефективність роботи ПАФ. У разі присутності ПН у вигляді джерел спотвореної напруги, струм, споживаний ПН, залежить від значення Z_c , при цьому струм на виході ПАФ протікатиме через ПН і ПАФ не зможе придушити вищих гармонійних складових з боку мережі живлення.

На рисунку 3.4 а показано підключення ПСАФ до електричної компенсованої мережі, яка в такому режимі є контрольованим джерелом напруги заданих параметрів. У випадку величина компенсаційного напруги обчислюється так:

$$U_k = k \cdot I_{cn} \quad (3.4.)$$

де I_{cn} - струм n -ої вищих гармонійних складових з боку мережі.

На рисунку 3.4 б наведена однофазна схема заміщення ПСАФ для вищих гармонійних складових n -ого порядку ($U_{ннн}$ - напруга n -ої вищих гармонійних складових ПНФ, $U_{топн}$ - напруга n -ої вищих гармонійних складових у точці загального приєднання ПСАФ і ПН, $U_{кн}$ - компенсаційна напруга n -ої вищих гармонійних складових ПСАФ, інші величини аналогічно рисунку 3.3).

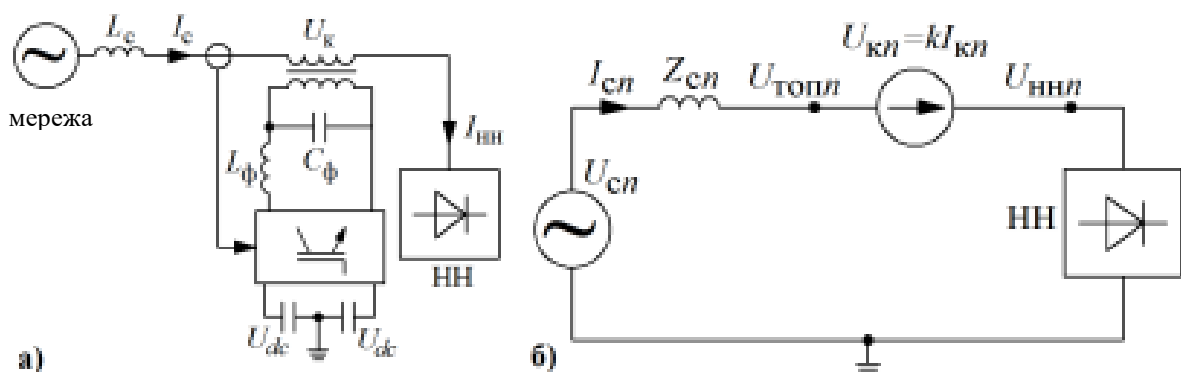


Рисунок 3.4 – а) схема підключення ПСАФ до електричної мережі; б) схема заміщення ПСАФ на частоті n -ої вищих гармонійних складових

Аналогічно рисунку 3.3 для спрощених розрахунків та моделювання ПСАФ може бути представлений у вигляді керованого джерела струму величиною U_{cn} . Відповідно до схеми заміщення рисунка 3.4 б струм мережі може бути розрахований згідно з наступним виразом

$$I_{cn} = \frac{U_{cn}}{(Z_{cn}+k)} - \frac{U_{Hn}}{(Z_{cn}+k)} \quad (3.5)$$

При припущенні, що $k \gg Z_c$, ПСАФ здатний ефективно придушувати вищих гармонійних складових з боку мережі, таким чином, $I_{cn} = 0$. З іншого боку напруга в ТПЕ складається з двох основних складових: вищих гармонійних складових напруги з мережі живлення і вищих гармонійних складових напруги з боку ПН

$$U_{ТПЕ} = \frac{k}{(Z_{cn} + k)} \cdot U_{cn} - \frac{Z_{cn}}{(Z_{cn} + k)} \cdot U_{Hn}$$

При припущенні, що $k \gg Z_c$, аналіз виразів (3.5)-(3.6) показує можливість ПСАФ ефективно компенсувати вищих гармонійних складових напруги з боку мережі та ПН, якщо остання відноситься до джерел вищих гармонійних складових напруги. У разі, якщо ПН представлена джерелом вищих гармонійних складових струму, ПСАФ є малоефективним рішенням

На рисунку 3.5 а наведена структура ГФ, що складається з послідовного з'єднання двох ПФ і ПСАФ, що функціонує в режимі керованого джерела напруги, яка підключена паралельно НН, що компенсується. Цей ГФ описується такими співвідношеннями

$$U_k + U_{ПФ} = U_{НН}; U_k = k_T \cdot U_{CФ} = 2 \cdot k_{ПРi} \cdot U_{dc} - \Delta U_{LФ}; U_{ПФ} = L_{ПФ} \cdot \frac{di_k}{dt} + U_{СПФ}; \\ \Delta U_{LФ} = L_{Ф} \cdot \frac{di_{Ф}}{dt}; i_c = i_{НН} + i_k; i_k = i_{k5} + i_{k7}; i_{k5} = C_5 \cdot \frac{dU_{C5}}{dt}; i_{k7} = C_7 \cdot \frac{dU_{C7}}{dt} \quad (3.7)$$

де: U_k – напруга компенсації ПСАФ, $U_{ПФ}$ – напруга ПФ, $U_{НН}$ – напруга ПН, k_T – коефіцієнт трансформації узгоджувача СТ; $U_{CФ}$ – напруга конденсатора вихідного фільтра; $k_{ПРi}$ – функція стану силових ключів АП; U_{dc} – напруга накопичувальних конденсаторів ПСАФ; $\Delta U_{LФ}$ – втрата напруги на вихідних дроселях ПСАФ; $L_{ПФ}$ – індуктивність ПФ (L_5, L_7), i_k – вихідний компенсаційний струм ГФ; $U_{СПФ}$ – напруга конденсатора ПФ; $L_{Ф}$ –

індуктивність вихідних дроселів ПСАФ; i_ϕ – струм вихідних дроселів; i_c – Струм мережі; i_{HH} – струм ПН; i_{k5}, i_{k7} – струми ПФ 5 та 7 вищих гармонійних складових відповідно; C_5, C_7 – ємності ПФ 5 та 7 вищих гармонійних складових відповідно; U_{C5}, U_{C7} – напруга ємності ПФ 5 та 7 вищих гармонійних складових відповідно.

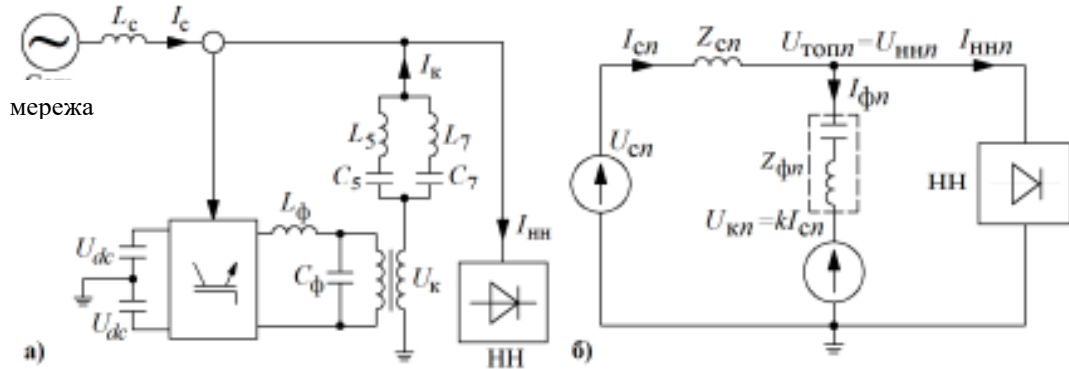


Рисунок 3.5 – а) структура ГФ на основі ПСАФ та ПФ, підключеної паралельно компенсованої ПН, б) схема заміщення на частоті n -ої вищих гармонійних складових

На рисунку 3.5 б показано еквівалентну схему заміщення даного ГФ на частоті n -ої вищих гармонійних складових, при цьому гармонійний струм мережі може бути визначений наступним чином:

$$I_{cn} = \frac{Z_{\phi n}}{(Z_{cn} + Z_{\phi n} + k)} \cdot I_{HHn} + \frac{1}{(Z_{cn} + Z_{\phi n} + k)} \cdot U_{cn} \quad (3.8)$$

де I_{cn}, U_{cn} – струм та напруга мережі на частоті n -ої вищих гармонійних складових, $Z_{\phi n}, Z_{cn}$ – відповідно повний опір ПФ та мережі на частоті n -ої вищих гармонійних складових, k – коефіцієнт пропорційності між спотвореним струмом мережі I_{cn} та компенсаційною напругою U_k ПСАФ.

За умови, що параметр k значно перевищує опори мережі Z_c та ПФ Z_ϕ на частоті основної складової, вищих гармонійних складових з боку мережі можуть ефективно компенсуватися за рахунок налаштування параметрів L і C ПФ. Таким чином, для такого режиму справедливі наступні співвідношення:

$$k \gg Z_c; k \gg Z_\phi; I_{cn} \approx 0;$$

На рисунку 3.6 а наведена структура ГФ, що складається з паралельного з'єднання двох ПФ і ПСАФ, що функціонує в режимі керованого джерела напруги, який підключений паралельно НН, що компенсується. Ця гібридна система описується такими виразами:

$$\begin{aligned} U_k + U_{\text{ПФ}} &= U_c; U_{\text{ПФ}} = U_{\text{НН}}; U_k = k_T \cdot U_{c\phi} = 2 \cdot k_{\text{ПРi}} \cdot U_{dc} - \Delta U_{L\phi}; \\ U_{\text{ПФ}} &= L_{\text{ПФ}} \cdot \frac{di_k}{dt} + U_{c\text{ПФ}}; \Delta L_{L\phi} = L_\phi \cdot \frac{di_\phi}{dt}; \\ i_c &= i_{\text{НН}} + i_k; i_k = i_{k5} + i_{k7}; i_{k5} = C_5 \cdot \frac{dU_{c5}}{dt}; i_{k7} = C_7 \cdot \frac{dU_{c7}}{dt} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Позначення (3.9) аналогічні до рівнянь (3.7).

На рисунку 3.6 б показано еквівалентну схему заміщення даної гібридної структури на частоті n -ої вищих гармонійних складових, при цьому гармонійна напруга ТПЕ може бути визначена таким чином:

$$U_{\text{ТПЕ}n} = \frac{k}{(Z_{cn} + k)} \cdot U_{cn} + \frac{Z_{cn}}{(Z_{cn} + k)} \cdot U_{\text{НН}n} \quad (3.10)$$

За умови $k \gg Z_c$ даний ГФ ізолює ТПЕ від вищих гармонійних складових напруги зі сторони НН.

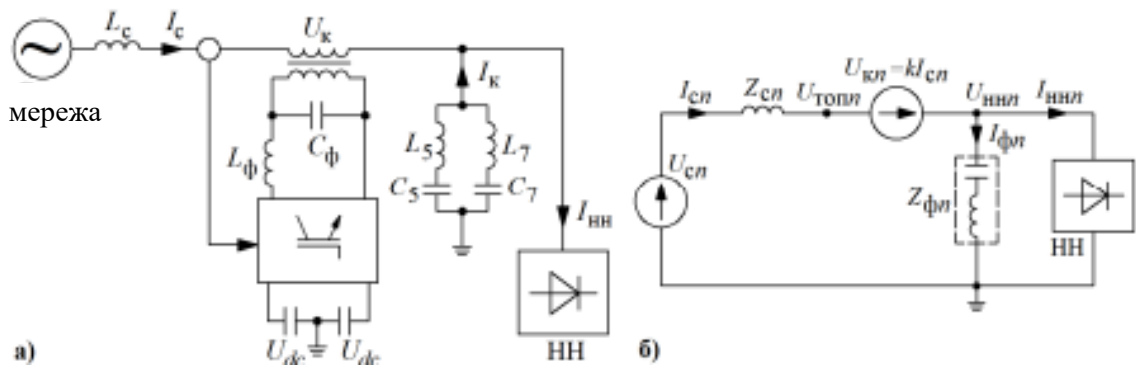


Рисунок 3.6 – а) структура гібридної системи на основі паралельного з'єднання ПСАФ і ПФ, підключеної паралельно компенсованої ПН; б) схема заміщення на частоті n -ої вищих гармонійних складових

3.2. Моделювання покращення якості електроенергії за допомогою фільтрокомпенсуючих пристроїв з активними перетворювачами

Розглянуті раніше ДФ, що є основою для структурного та параметричного синтезу ЕТК корекції ПЯЕЕ на основі ФКП з АП, можуть виконувати кілька

Згідно з результатами моделювання АП з різними алгоритмами керування в умовах варіації внутрішнього опору джерела в широких межах при переході з режиму електропостачання з централізованого на автономний або комбінований найбільшу ефективність компенсації вищих гармонійних складових, що є основною функцією ПАФ, продемонстрував алгоритм на основі фазових перетворень системи координат dq . У моделі, наведений на рисунку 3.8, застосовано ПАФ з даним алгоритмом виявлення та компенсації вищих гармонійних складових. Моделювання виконувалося до різних структур ПФ, наведених рисунку 3.8.

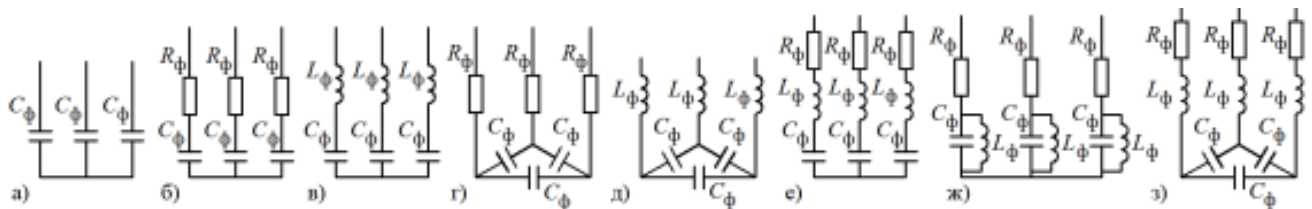


Рисунок 3.8 – Конфігурації ПФ на виході ПАФ

Аналіз результатів імітаційного моделювання дозволяють зробити такі висновки:

- результати теоретичних та експериментальних досліджень показали необхідність встановлення ПФ на виході ПАФ для підвищення ефективності корекції вищих гармонійних складових струму та напруги;

- Наявність ПФ на виході ПАФ дозволяє досягти ефективної корекції вищих гармонійних складових напруги мережі в умовах централізованого та автономного електропостачання;

- модуль повного опору ПФ на виході ПАФ повинен знаходитись в межах від 1 до 15 Ом у частотному діапазоні від 2 до 40 вищих гармонійних складових для збереження ефективності корекції ПКЕ ПАФ;

- АЧХ ПФ, встановленого на виході ПАФ, повинна мати гіперболічний характер без резонансних точок у частотному діапазоні від 2 до 40 вищих гармонійних складових для збереження ефективності корекції ПКЕ ПАФ, при

цьому АЧХ ПФ може бути апроксимована виразом $|z| = \frac{4210 \cdot \pi}{\omega}$ з точністю понад 97 %;

найбільшу ефективність при корекції сукупності ПКЕ, включаючи вищих гармонійних складових струму та напруги, несиметрію струму та напруги, відхилення напруги, а також ступінь зниження споживаного навантаженням струму, демонструє на виході ПАФ активно-ємнісний ПФ, в якому конденсатори з'єднані в трикутник, що також узгоджується з результатами експериментальних досліджень;

- максимальну ефективність корекції відхилень та вищих гармонійних складових напруги, а також ВГС струму демонструє на виході ПАФ активно-індуктивно-ємнісний ПФ, в якому конденсатор та індуктивність з'єднані паралельно, а послідовно з ними резистор;

- максимальну ефективність корекції несиметрії напруги та струму демонструють кілька вихідних ПФ, з яких найбільш простим є ємнісний ПФ;

- максимальну ефективність компенсації неактивних складових струму, споживаних ЛН та ПН та реактивної потужності демонструє на виході ПАФ активно-ємнісний ПФ, в якому конденсатор та резистор з'єднані послідовно.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

В розділі «Аналіз математичних моделей та структури фільтрокомпенсуючих систем із використанням активних перетворювачів» можна виділити наступне.

Проведено детальний аналіз математичних моделей фільтрокомпенсуючих систем, що дозволило визначити основні параметри та характеристики цих систем. Отримані моделі дають можливість точно описати динаміку роботи систем із використанням активних перетворювачів.

Досліджено роботу активних перетворювачів у складі фільтрокомпенсуючих систем. Активні перетворювачі забезпечують більш ефективну компенсацію гармонічних спотворень та реактивної потужності порівняно з традиційними методами, що підвищує загальну ефективність системи.

Завдяки моделюванню і аналізу структури системи вдалося виявити оптимальні режими роботи фільтрокомпенсуючих систем. Це дозволило зменшити втрати потужності, покращити якість електроенергії та підвищити надійність системи.

Активні перетворювачі забезпечують високу адаптивність системи до змін навантаження та електромережі, що робить їх важливим елементом сучасних фільтрокомпенсуючих систем. Вони дозволяють системі швидко адаптуватися до змінних умов експлуатації.

Таким чином, проведений аналіз показав, що використання активних перетворювачів у фільтрокомпенсуючих системах значно підвищує їх ефективність, адаптивність та надійність, що є важливим для сучасних електромереж.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:

В розділі «Активні перетворювачі та їх роль у покращенні якості електричної енергії в електротехнічних комплексах» було розглянуто основні аспекти впливу якості електричної енергії на роботу електроустаткування електротехнічних комплексів. Показано, що погана якість електроенергії, зокрема коливання напруги, гармонічні спотворення та збурення, можуть призводити до зниження ефективності роботи обладнання, прискореного зносу компонентів та підвищення експлуатаційних витрат.

Також було проаналізовано наявні типи активних перетворювачів, які відіграють ключову роль у підвищенні якості електроенергії. Ці пристрої дозволяють ефективно коригувати параметри мережі, забезпечуючи стабільність напруги та зниження рівня гармонічних спотворень.

Особлива увага була приділена сучасним пристроям на основі активних перетворювачів та фільтрокомпенсуючих пристроїв, які забезпечують комплексний підхід до вирішення проблем з якістю електричної енергії. Вони дозволяють оптимізувати роботу електротехнічних комплексів, забезпечуючи їх надійну та стабільну роботу.

В ході аналізу було встановлено, що активні перетворювачі електричної енергії функціонують в умовах постійної зміни зовнішніх і внутрішніх факторів. Зовнішні фактори, такі як зміна напруги живлення, температури навколишнього середовища, вібрації чи електромагнітні перешкоди, можуть суттєво впливати на стабільність та ефективність роботи перетворювачів. Внутрішні фактори, зокрема параметричні зміни елементів схеми, старіння компонентів та зміни в навантаженні, також вимагають врахування для забезпечення високих показників продуктивності й надійності перетворювачів.

Одним із важливих результатів є підтвердження необхідності використання адекватних математичних моделей для опису процесів у перетворювачах в умовах нестабільності. Моделювання дозволяє вивчати різні сценарії роботи перетворювачів при зміні як зовнішніх, так і внутрішніх

факторів, що допомагає передбачити поведінку системи в реальних умовах експлуатації. Основні моделі ґрунтуються на системах рівнянь, що описують електричні, теплові й механічні процеси, а також враховують нелінійність і динаміку компонентів.

Дослідження активних перетворювачів проводиться з використанням комплексу експериментальних методів, зокрема осцилографічних вимірювань, спектрального аналізу та температурного моніторингу. Встановлено, що комплексний підхід до аналізу характеристик перетворювачів, який включає одночасне вимірювання електричних, температурних і механічних параметрів, дозволяє більш точно визначати їхні робочі характеристики та оцінювати вплив різних факторів на стабільність роботи.

Результати досліджень дозволяють визначити оптимальні режими роботи активних перетворювачів при впливі різних зовнішніх і внутрішніх факторів. Використання адаптивних алгоритмів управління дозволяє підвищити стійкість роботи системи в умовах мінливих параметрів. Зокрема, адаптація до зміни напруги чи частоти живлення дозволяє значно знизити втрати енергії та підвищити ККД перетворювачів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення більш складних моделей перетворювачів, зокрема тих, що працюють у надшвидкісних або екстремальних умовах. Крім того, перспективним напрямком є розвиток технологій інтелектуального управління перетворювачами з використанням методів штучного інтелекту, що дозволить забезпечити ще більш високу надійність та ефективність в умовах змінних впливів.

В розділі «Аналіз математичних моделей та структури фільтрокомпенсуючих систем із використанням активних перетворювачів» можна виділити наступне.

Проведено детальний аналіз математичних моделей фільтрокомпенсуючих систем, що дозволило визначити основні параметри та

характеристики цих систем. Отримані моделі дають можливість точно описати динаміку роботи систем із використанням активних перетворювачів.

Досліджено роботу активних перетворювачів у складі фільтрокомпенсуючих систем. Активні перетворювачі забезпечують більш ефективну компенсацію гармонічних спотворень та реактивної потужності порівняно з традиційними методами, що підвищує загальну ефективність системи.

Завдяки моделюванню і аналізу структури системи вдалося виявити оптимальні режими роботи фільтрокомпенсуючих систем. Це дозволило зменшити втрати потужності, покращити якість електроенергії та підвищити надійність системи.

Активні перетворювачі забезпечують високу адаптивність системи до змін навантаження та електромережі, що робить їх важливим елементом сучасних фільтрокомпенсуючих систем. Вони дозволяють системі швидко адаптуватися до змінних умов експлуатації.

Таким чином, проведений аналіз показав, що використання активних перетворювачів у фільтрокомпенсуючих системах значно підвищує їх ефективність, адаптивність та надійність, що є важливим для сучасних електромереж.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. Сиченко В.Г., Кузнецов В.Г., Босий Д.О., Саблін О.І. Енергетика тягових мереж [Текст] : монографія / за загальною редакцією д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка. – Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.
2. Відроджені джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відродженої енергетики НАНУ, 2020. – 392 с
3. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Матеріали наук.-техн. конф., м. Київ 19-22 травня.
4. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. СЗІ Інвертори і перетворювачі частоти : монографія — Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. — 300 с.
5. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с. ISBN 978-966-493-870-6
6. Bettega E., Fiorina J.N. Active harmonic conditioners and unity power factor rectifiers. Cahier technique № 183. Schneider Electric. 1999. 36 p.
7. Bojoi R., Griva G., Limongi L., Pica C., Tenconi A. Performance Comparison of Frequency Selective Current Controllers for Three- Phase Active Power Filters // The 33rd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2007. Taiwan.
8. Bollen M. Understanding power quality problems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1999.
9. Bollen M., Gu I., “Signal processing of power quality disturbances”, Wiley, New York, 2006.
10. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. American national standards institute. 2014. 29 p.

11. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. American national standards institute. 2010. 52 p.