

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра "Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент"

"Допущено до захисту"
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
" ____ " _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
"Компенсація реактивної потужності в системі
електропостачання з нелінійним навантаженням"

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Сергій ЖАБКО
« ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Жабка Сергія Віталійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Компенсація реактивної потужності в системі електропостачання з нелінійним навантаженням

Compensation of reactive power in the system power supply with nonlinear load

2. Керівник роботи (проекту) Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук., доц.

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 28.12.2023 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є дослідження питання компенсації реактивної потужності в системі електропостачання з нелінійним навантаженням. Завдання роботи: 1. Провести аналітичний огляд відомих методів та технічних засобів компенсації реактивної потужності за умов нелінійного навантаження. 2. Провести теоретичне дослідження можливості застосування активних та гібридних фільтрів для компенсації реактивної потужності та корекції несинусоїдальності струмів та напруг в системі електропостачання з нелінійними навантаженнями. 3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель системи електропостачання з гібридним фільтром вищих гармонік. 4. Дослідити ефективність застосування гібридного фільтру для компенсації реактивної потужності в системі електропостачання з нелінійними навантаженнями.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>10.10.2023</i>	
<i>2</i>	<i>Аналіз сучасного стану питання компенсації реактивної потужності в мережах з нелінійним навантаженням</i>	<i>13.10.2023</i>	
<i>3</i>	<i>Теоретичне дослідження засобів компенсації реактивної потужності в мережах з нелінійним навантаженням</i>	<i>30.10.2023</i>	
<i>4</i>	<i>Комп'ютерне моделювання режимів роботи системи електропостачання з гібридним фільтром гармонік</i>	<i>15.11.2023</i>	
<i>5</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>30.11.2023</i>	
<i>7</i>	<i>Висновки</i>	<i>07.12.2023</i>	
<i>8</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>11.12.2023</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>14.12.2023</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Жабко С. В. Компенсація реактивної потужності в системі електропостачання з нелінійним навантаженням.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2023 р.

Метою роботи є дослідження питання компенсації реактивної потужності в системі електропостачання з нелінійним навантаженням

Проведено аналітичний огляд відомих методів та технічних засобів компенсації реактивної потужності за умов нелінійного навантаження.

Розроблено комп'ютерну імітаційну модель системи електропостачання з гібридним фільтром вищих гармонік. Було проведено комп'ютерне імітаційне моделювання системи, що складається з мережі живлення, розробленого гібридного фільтра та нелінійного навантаження. Результати показали, що застосування запропонованого фільтра дає змогу повністю компенсувати реактивну потужність в мережі. Ефективність фільтрації гармонік підтверджується зниженням коефіцієнта гармонік (THD) струму з 30% до менше 1% після компенсації. Тобто запропонований гібридний активний фільтр дозволяє істотно покращити якість електроенергії в системі електропостачання за рахунок пригнічення вищих гармонік та коригування реактивної потужності.

Ключові слова: реактивна потужність, вищі гармонік, активний фільтр, гібридний фільтр

THE SUMMARY

Zhabko S. V. Compensation of reactive power in the system power supply with nonlinear load

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2023

The purpose of the work is to study the issue of reactive power compensation in the power supply system with a non-linear load

An analytical review of known methods and technical means of reactive power compensation under nonlinear load conditions was conducted.

A computer simulation model of the power supply system with a hybrid filter of higher harmonics has been developed. Computer simulation modeling of the system consisting of the power network, the developed hybrid filter and the non-linear load was carried out. The results showed that the application of the proposed filter makes it possible to fully compensate the reactive power in the network. The effectiveness of harmonic filtering is confirmed by the reduction of the current harmonic factor (THD) from 30% to less than 1% after compensation. That is, the proposed hybrid active filter makes it possible to significantly improve the quality of electricity in the power supply system due to suppression of higher harmonics and correction of reactive power.

Keywords: reactive power, higher harmonic, active filter, hybrid filter

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ.....	12
1.1 Аналітичний огляд засобів компенсації реактивної потужності	13
1.2 Причини появи несинусоїдальності напруг та струмів в електричних мережах.....	15
1.3 Негативний вплив від погіршення якості електричної енергії.....	19
Висновки до розділу	23
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ.....	24
2.1 Технічні засоби для компенсації реактивної потужності та зниження рівнів вищих гармонік	25
2.1.1 Фільтрокомпенсуючі пристрої	25
2.1.2. Активні силові фільтри	27
2.2 Високовольтні гібридні фільтри.....	35
2.3 Низьковольтні гібридні фільтри	40
2.4 Порівняльне дослідження активних і гібридних фільтрів для зниження несинусоїдальності та компенсації реактивної потужності.....	45
Висновки до розділу	57
РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ГІБРИДНИМ ФІЛЬТРОМ ГАРМОНІК.....	59
3.1 Постановка задачі моделювання режимів роботи системи електропостачання з гібридним фільтром гармонік	59

3.2 Розрахунок параметрів пасивної частини гібридного фільтру гармонік.....	61
3.3 Комп'ютерне імітаційне моделювання системи електропостачання з гібридним фільтром вищих гармонік.....	68
Висновки до розділу	76
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	77
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84

ВСТУП

Актуальність теми. Основними проблемами енергозабезпечення в українських регіонах є зростання попиту на енергоресурси та значні втрати електроенергії в мережах, а також питання якості електропостачання. Щоб подолати ці виклики в Україні та глобально, потрібно впровадити системи, котрі дозволяють боротися з гармонійними спотвореннями - основною причиною погіршення якості електроенергії. Найкращим рішенням є встановлення в електромережах силових фільтрів гармонік, які здатні усунути коливання напруги та зберегти належні показники якості електропостачання.

За даними Держенергоефективності, рівень втрат електроенергії в українських мережах сягає 15-30%, що значно перевищує аналогічні показники розвинутих країн. Причинами є застаріле обладнання, крадіжки електроенергії, недосконалий облік. Впровадження сучасних технологій Smart Grid дозволить автоматизувати енергосистеми та знизити втрати.

Підприємства, задіяні у виробництві, транспортуванні та споживанні енергоресурсів, а також у комерційному і житловому будівництві, часто застосовують активні й пасивні силові фільтри для взаємодії між постачальниками і споживачами енергії. Ця робота пропонує об'єднати зазначені фільтри в гібридну систему, яка вже набула поширення в світових енергосистемах, проте лишається маловідомою в Україні.

За оцінками експертів, використання гібридних силових фільтрів дозволяє підвищити загальну ефективність енергосистем на 15-20%. Перевагами такого підходу є можливість оптимального поєднання властивостей активних і пасивних фільтрів, підвищення надійності та зниження вартості в порівнянні з індивідуальним застосуванням. В Україні подібні технології поки не набули широкого розповсюдження через відсутність стимулів та фінансування.

Гібридні силові фільтри дають змогу об'єднати переваги активних та пасивних рішень, хоча їх впровадження потребує значних початкових інвестицій. Проте покращення якості електроенергії суттєво продовжить термін служби електрообладнання й побутової техніки, що компенсує витрати.

На ринку представлено широкий асортимент систем фільтрації гармонік від різних виробників з описом функціоналу та переваг. Щоб підібрати оптимальне рішення для конкретних потреб, необхідно спочатку дослідити рівень гармонійних спотворень у мережі.

За оцінками Міненерго, частка споживачів з високим рівнем гармонік в Україні сягає 35-40%. Це зумовлено збільшенням частки побутової електроніки та переобладнанням промислових підприємств. Запровадження сучасних систем фільтрації дасть змогу покращити якість електропостачання та підвищити енергоефективність.

Метою роботи є дослідження питання компенсації реактивної потужності в системі електропостачання з нелінійним навантаженням.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналітичний огляд відомих методів та технічних засобів компенсації реактивної потужності за умов нелінійного навантаження.
2. Провести теоретичне дослідження можливості застосування активних та гібридних фільтрів для компенсації реактивної потужності та корекції несинусоїдальності струмів та напруг в системі електропостачання з нелінійними навантаженнями.
3. Розробити комп'ютерну імітаційну модель системи електропостачання з гібридним фільтром вищих гармонік.
4. Дослідити ефективність застосування гібридного фільтру для компенсації реактивної потужності в системі електропостачання з нелінійними навантаженнями.

Об'єкт дослідження - процес передачі та розподілу електроенергії від магістральних і розподільчих мереж до кінцевих споживачів, зокрема побутових.

Предмет дослідження - гібридна система активної фільтрації в точці приєднання нелінійних споживачів до розподільчої мережі.

Методи дослідження включали аналіз електричних кіл, синтез систем автоматичного керування та моделювання запропонованих рішень у середовищі Matlab.

Наукова новизна роботи полягає у наступному:

- розроблено гібридний активний фільтр з відповідною системою керування для повної компенсації реактивної потужності, що генерується нелінійним навантаженням.

- побудовано комп'ютерну модель електричної мережі з досліджуванням гібридним фільтром та нелінійним навантаженням. Модель дозволяє аналізувати режими роботи системи та оцінювати показники якості електроенергії.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні цифрової моделі, придатної для дослідження процесів компенсації реактивної потужності нелінійних навантажень та оцінки впливу на показники якості електроенергії. Розроблена модель дозволяє візуалізувати роботу системи «мережа – гібридний фільтр – нелінійне навантаження» та вивчати перехідні процеси в ній. Це надає можливість оптимізувати параметри запропонованого активного фільтра та налаштування системи керування ним для досягнення найкращих показників компенсації вищих гармонік. Отримані результати моделювання стануть підґрунтям для подальшого впровадження гібридних фільтрів у реальних умовах з метою покращення якості електропостачання в локальних мережах.

Структура роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 87 сторінок. Основна частина викладена на 77 сторінках друкованого тексту, містить 34 рисунки та 1 таблиця. Список використаних джерел містить 27 джерел та викладений на 4 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ

КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ З

НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Щодо реактивної потужності, прийнято такі поняття: споживання, генерація, передача та витрати. Вважається, якщо струм відстає за фазою від напруги (індуктивне навантаження), то відбувається споживання реактивної потужності. Натомість, якщо струм випереджає напругу (ємнісне навантаження), то відбувається генерація реактивної потужності.

З точки зору питань генерації і споживання між активною та реактивною потужностями існують суттєві відмінності. На відміну від активної потужності, де основну частину споживають приймачі, а лише незначна кількість втрачається в елементах системи, то для реактивної потужності втрати в елементах системи можуть бути порівняні з реактивною потужністю, котру споживають приймачі електроенергії.

Джерелами реактивної потужності виступають як генератори електростанцій, так і елементи системи електропостачання а також додаткові компенсувальні пристрої.

Вироблення великої кількості реактивної потужності безпосередньо генераторами в є економічно недоцільним з наступних основних причин:

1. Збільшення втрат активної потужності в елементах мережі за рахунок протікання через них реактивної потужності.
2. Збільшення втрат напруги.
3. Зниження пропускної здатності елементів СЕП

Значного економічного ефекту можна досягти при коректному поєднанні різних заходів з компенсації. Такі заходи повинні бути обґрунтовані.

Критерієм економічної доцільності є мінімум приведених витрат, що враховує як капітальні вкладення в обладнання компенсації, так і експлуатаційні витрати протягом строку служби цього обладнання.

1.1 Аналітичний огляд засобів компенсації реактивної потужності

Класифікація засобів компенсації реактивної потужності приведена на рис. 1.1.

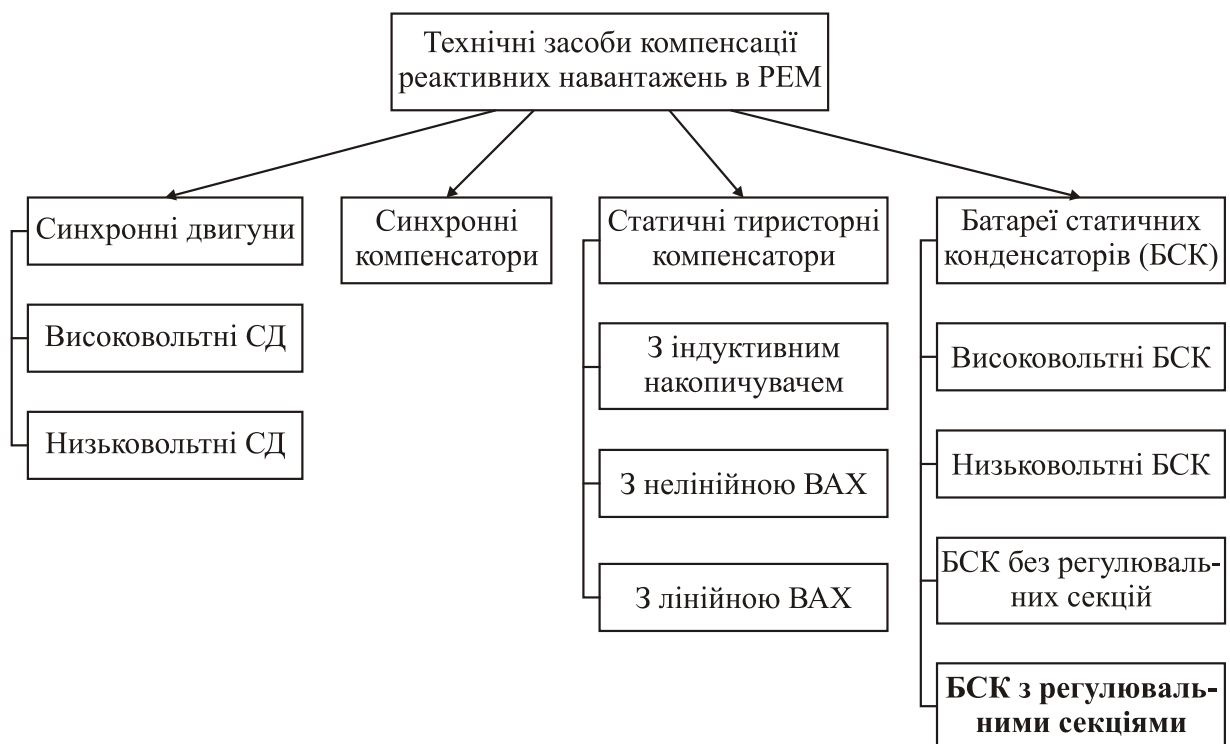


Рис. 1.1. Класифікація засобів компенсації реактивної потужності

Найпоширенішим засобом компенсації реактивної потужності в електричних мережах є батареї статичних конденсаторів. Основною складовою БСК виступають косинусні конденсатори, які завдяки активно-емнісному характеру свого опору генерують реактивну потужність.

Сучасні БСК виготовляються у 3-фазному та 1-фазному виконанні, мають вбудовані розрядні резистори й захист від перенапруг, що можуть виникати під час комутації. Це забезпечує їх досить високу надійність.

До переваг застосування БСК можна також віднести простоту і надійність конструкції, мінімальні витрати на обслуговування, відсутність шуму та вібрацій під час роботи.

Величина реактивної потужності, яку генерують в мережу за допомогою батарей конденсаторів, має дискретний характер. Адже регулювання реактивної потужності цих пристроїв відбувається шляхом підключення різної кількості секцій конденсаторів до мережі. Очевидно, що зі збільшенням кількості таких секцій, тобто зниженням кроку регулювання батарей конденсаторів, знижується й вплив дискретності їх роботи на ефективність керування режимами реактивної потужності.

Батареї статичних конденсаторів використовують для регулювання рівня реактивної потужності та підтримання необхідних параметрів напруги в електричних мережах. Вони мають низку переваг порівняно з традиційними засобами компенсації реактивної потужності, зокрема високу надійність, швидкодію, можливість плавного регулювання тощо. Проте дискретний принцип їх роботи може певною мірою обмежувати точність керування реактивною потужністю.

Ось кілька додаткових аспектів, які варто враховувати при виборі та встановленні батарей статичних конденсаторів:

- слід аналізувати профіль навантаження в мережі та коливання рівня реактивної потужності в часі. Це дозволить оптимізувати потужність БСК та систему керування ними.
- важливо оцінити перспективи розвитку електричної мережі та прогнозовані зміни рівня навантаження. Це вплине на вибір необхідної

потужності конденсаторних батарей.

- слід враховувати наявність в мережі інших джерел реактивної потужності та можливість їх спільної роботи з БСК в єдиній автоматизованій системі регулювання.

- варто проводити техніко-економічні розрахунки щодо строку окупності витрат на встановлення БСК за рахунок зниження втрат електроенергії.

1.2 Причини появи несинусоїдальності напруг та струмів в електричних мережах

Питання забезпечення синусоїдальної форми струму й напруги в системах електропостачання постало у зв'язку із використанням потужних електроспоживачів, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику. Серед них - установки електрозварювання, сталеплавильні печі, вентильні перетворювачі. На сьогодні проблематика виникнення вищих гармонік струму й напруги є однією з найважливіших складових загальної задачі підвищення якості електроенергії.

Причиною спотворення синусоїдальної форми є нелінійні властивості цих електроспоживачів. Вентильні перетворювачі через особливості їх роботи є одним з основних джерел вищих гармонік. Наслідком є погіршення показників якості електроенергії, зокрема відхилення форми кривих струму й напруги від синусоїдальної.

Це призводить до додаткових втрат електроенергії, перевантаження обладнання, порушення роботи чутливих пристроїв тощо. Тому дослідження цієї проблематики та розробка ефективних методів її вирішення є важливим завданням сучасної енергетики.

Спотворення синусоїдальної форми кривої напруги в електромережах призводить до низки негативних наслідків:

- виникають додаткові втрати потужності в лініях електропередачі, трансформаторах, конденсаторних батареях тощо. Це пов'язано з додатковим нагріванням обладнання вищими гармоніками струму;

- прискорюється процес старіння ізоляції машин, апаратів та кабелів. В результаті знижується надійність та термін служби електроустаткування;

- погіршується точність вимірювань електричних величин через вплив вищих гармонік.

- виникають збої в роботі систем автоматики, телемеханіки й релейного захисту через спотворення сигналів керування та вимірювань;

- ускладнюється використання силових ланцюгів для передачі інформаційних сигналів;

- погіршується або порушується робота чутливого електрообладнання споживачів, зокрема обчислювальної техніки, медичної апаратури тощо;

Отже, проблема забезпечення синусоїдальності напруги є важливим завданням для підвищення якості та надійності електропостачання.

Одними з головних джерел спотворення синусоїдальної форми кривих струму й напруги в електричних мережах є вентильні перетворювачі на основі тиристорів та інших напівпровідникових приладів. Характерною особливістю роботи таких пристроїв є те, що вони споживають з мережі струм несинусоїдальної форми, навіть якщо напруга, що підводиться до їхніх затисків, має синусоїдальну форму.

Це пов'язано з процесами керування напівпровідниковими ключами в силових схемах перетворювачів. Через це у ланцюгах живлення вентильних перетворювачів виникають струми з істотним вмістом вищих гармонік. А це, у свою чергу, спричиняє спотворення форми кривої напруги в мережі.

Отже, через широке використання вентильних перетворювачів проблема несинусоїдальності напруги та струму набула особливої гостроти в сучасних системах електропостачання.

На рис. 1.2 наведено схему трифазного тиристорного перетворювача.

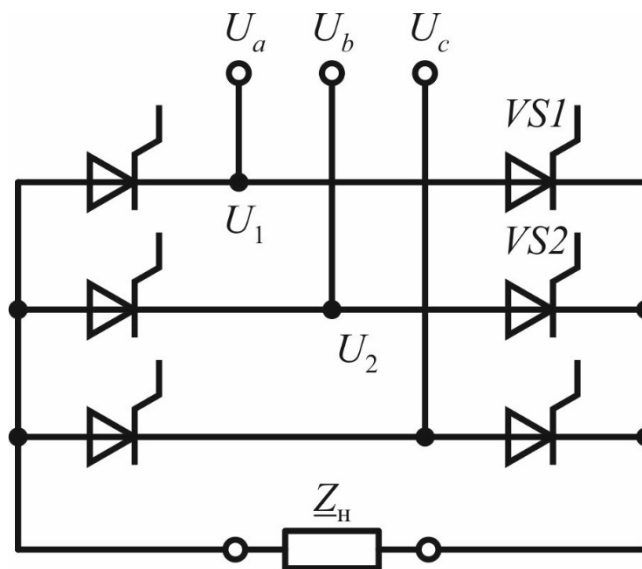


Рис. 1.2. Схема трифазного тиристорного вентильного перетворювача

Графіки напруг в мережі цього перетворювача наведені на рис. 1.3.

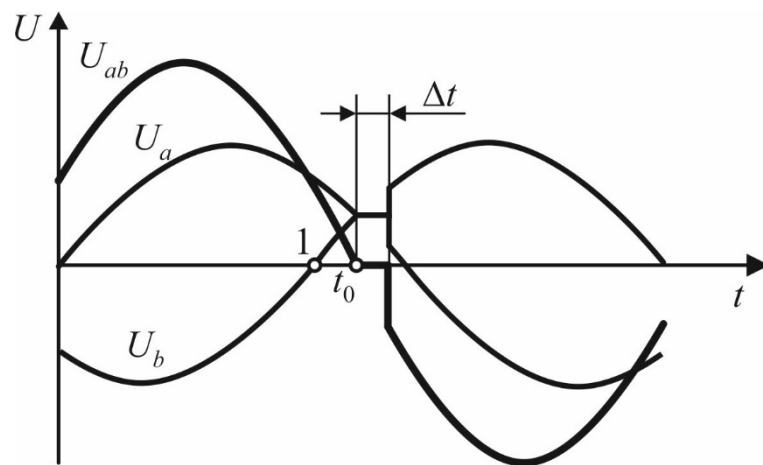


Рис. 1.3. Графіки напруг в мережі з тиристорним перетворювачем

Процеси комутації у вентильних перетворювачах зумовлюють виникнення вищих гармонік струму. Вищими гармоніками називають складові струму або напруги, частота яких перевищує основну частоту 50/60 Гц та є кратною їй. На відміну від основної гармоніки, вищі гармоніки не роблять внеску в активну потужність, проте створюють додаткове теплове

навантаження на мережу.

При цьому практично відсутні гармоніки, кратні трьом. Це пояснюється тим, що такі складові утворюють струми нульової послідовності, які замикаються в обмотці нижчої напруги трансформаторів, з'єднаних за схемою трикутника (рис. 1.4).

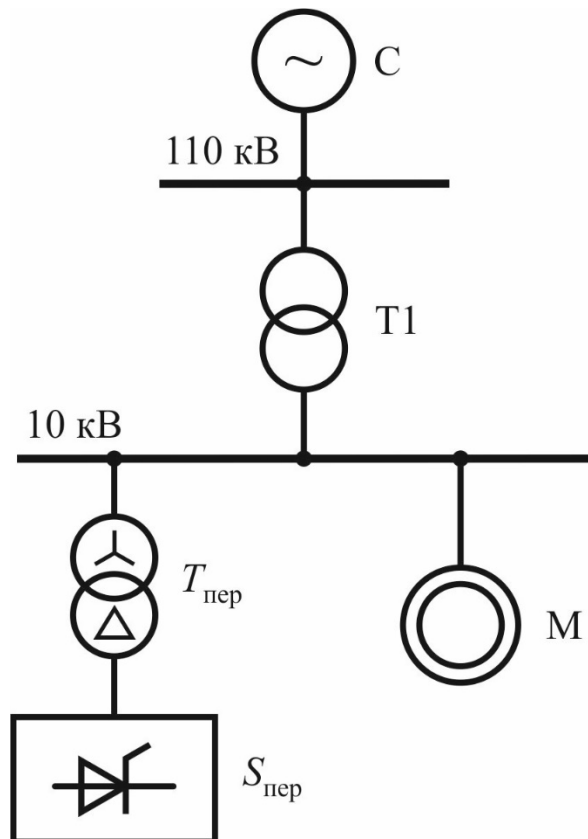


Рис. 1.4. Схема живлення вентильного перетворювача

Отже, наявність вищих гармонік погіршує якість електроенергії та створює додаткове навантаження на обладнання електричних мереж.

Гармоніки струму з 17-ї і вище, як правило, не враховують в розрахунках через їхні незначні амплітуди та відповідно несуттєвий вплив на режим роботи інших електроприймачів і енергосистеми загалом. Їх частка у сумарному спектрі гармонік настільки мала, що нею можна знехтувати при аналізі якості електроенергії та оцінці додаткових втрат в елементах системи

електропостачання.

На рис. 1.5 показано графік струму в колі 6-пульсного вентильного перетворювача

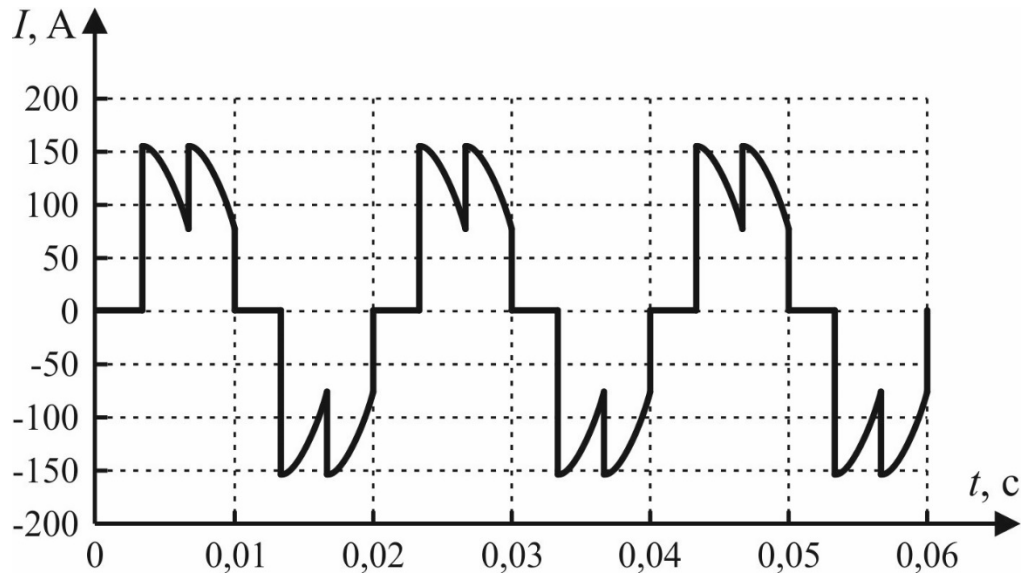


Рис. 1.5. Графік струму в колі 6-пульсного вентильного перетворювача

1.3 Негативний вплив від погіршення якості електричної енергії

Сучасне електрообладнання, що застосовується в галузях телекомунікацій, медицини, транспорту та промисловості, висуває підвищені вимоги до якості електроживлення. Збої в електропостачанні можуть призводити до порушень роботи такого обладнання, зменшення терміну його служби або навіть виходу з ладу.

Однією з ключових проблем, яка негативно впливає на якість електричної енергії, є наявність в електричних мережах нелінійних та несиметричних навантажень. Здебільшого це різноманітні напівпровідникові перетворювачі, які широко застосовуються в системах промислового електроприводу, побутовій техніці тощо.

Заміна застарілого електрообладнання на більш енергоефективне та високопродуктивне на основі вентильних перетворювачів, на жаль, погіршує

показники якості електроенергії. Тому питання забезпечення електромагнітної сумісності такого устаткування є надзвичайно актуальним.

Оскільки робота нелінійних споживачів породжує спотворені за формою струми, залежні від параметрів електричного ланцюга, їх безпосередній вплив на ці пристрої є несуттєвим. Тому вищі гармоніки струму не можуть проникати в інше, лінійне обладнання, крім того, що їх породжує. Водночас, вплив гармонік на систему електропостачання в цілому може бути досить істотним, насамперед через збільшення сумарного струму, що протікає в мережі.

Усі елементи розподільних мереж мають обмеження по допустимому діючому значенню струму. Наприклад, потужність 1000 кВА трансформатора з напругою 380 В розрахована на максимальний струм близько 1200 А. Проте чим більша частка вищих гармонік у спектрі струму навантаження, тим менший основний струм 50 Гц може забезпечити цей трансформатор для живлення корисних споживачів. Тобто наявність гармонік просто витрачає пропускну здатність системи електропостачання, знижуючи кількість споживачів, яких можна підключити до мережі.

Вищі гармоніки струму також призводять до додаткових втрат потужності у вигляді тепла в трансформаторах та електропровідниках. Оскільки імпеданс трансформатора зростає пропорційно номеру гармоніки, на частоті 5-ї гармоніки він у 5 разів більший, ніж на основній частоті. Відповідно, кожен ампер струму п'ятої гармоніки викликає в 5 разів більше тепловиділення, ніж ампер основної гармоніки.

У мережах із глухозаземленою нейтраллю шкідливий вплив гармонік також полягає в тому, що вони зменшують пропускну спроможність системи та кількість навантажень, які можна під'єднати. Особливо небезпечними є струми 3-ї гармоніки, які сумуються в нейтральному провіднику. У мережах з великою кількістю комп'ютерів як нелінійних навантажень струм нейтралі може перевищувати будь-який з фазних струмів. Ці струми 3-ї гармоніки

циркулюють в обмотках трансформаторів, викликаючи додаткове тепловиділення.

Окрім додаткових тепловтрат, іншим основним наслідком несинусоїдальності струму в електричних мережах є спотворення форми напруги. Це спотворення здебільшого матиме незначний вплив безпосередньо на розподільчу систему. Проте, на відміну від струму, воно не залежить від параметрів окремих ланцюгів і тому може поширюватися по всій мережі.

Отже, вищі гармоніки напруги, що генеруються певним навантаженням, з'являтимуться на спільних шинах розподілу електроенергії в межах всього об'єкта. При цьому рівень спотворення напруги зменшується в міру наближення до живильного трансформатора. Але за наявності надмірних вищих гармонік на його вторинній напрузі вони можуть поширюватися мережею і впливати на електрообладнання навіть у віддалених приміщеннях.

У деяких випадках вплив спотвореної напруги на електрообладнання всередині об'єкта може бути досить значним. Наприклад, за наявності екстремальних гармонік крива напруги може мати численні зайві нульові перетини, що порушує умови синхронізації деяких пристроїв. Для електроустаткування, робота якого залежить від правильної послідовності операцій при переході через нуль напруги, це може викликати збої та неправильне функціонування.

Проте більшість сучасного цифрового обладнання з внутрішнім годинником синхронізації значно менше піддається такому впливу. З іншого боку, наявність вищих гармонік напруги слабо впливає на роботу нелінійних навантажень, підключених до мережі заземленої нейтралі.

Водночас, наявність 5-ї гармоніки напруги може створювати суттєві проблеми в роботі трифазних асинхронних електродвигунів. П'ята гармоніка є зворотної послідовності, тому при подачі її на двигун вона прагне обертати його в протилежному напрямку. Іншими словами, така гармоніка намагається гальмувати обертання двигуна та створює негативний (гальмівний) момент.

Щоб подолати цей гальмівний момент і підтримувати нормальну швидкість обертання, двигун вимушений споживати додатковий струм промислової частоти 50 Гц. Як наслідок - виникає надмірний струм в обмотках двигуна, що може призвести або до спрацювання захисних пристроїв, або перевантаження та виходу електродвигуна з ладу внаслідок перегріву. Тому усунення 5-ї гармоніки в системах живлення потужних трифазних навантажень часто є головним завданням на промислових підприємствах.

Опір мереж електропостачання має переважно індуктивний характер і в деяких випадках може сягати досить великих значень. Це стосується, наприклад, тягових мереж електротранспорту зі значними відстанями від підстанцій, а також загальних розподільних мереж з довжиною кабельних трас понад 100 м. Додатковим чинником є частотна залежність індуктивного опору, який зростає пропорційно частоті.

Тому у випадку значної кількості вищих гармонік струму, величина падіння напруги у провідниках і кабелях може суттєво перевищувати гранично допустимі норми через збільшення індуктивного опору на частотах гармонік.

Крім того, в колах із зосередженими та розподіленими параметрами при наявності вищих гармонік існує ризик виникнення резонансних явищ, що також негативно позначається на режимах роботи систем електропостачання.

У трансформаторах, дроселях та інших елементах вищі гармоніки струму створюють додаткові електродинамічні сили, що є джерелом підвищеного акустичного шуму.

Індукційні лічильники, які широко застосовуються для комерційного обліку електроенергії, мають частотні похибки на гармонічних складових. Залежно від того, лінійним чи нелінійним є навантаження, вони можуть або завищувати, або занижувати виміряну потужність. Для усунення таких похибок в умовах несинусоїдальності використовуються мікропроцесорні лічильники з функцією врахування впливу вищих гармонік.

Вищі гармоніки також негативно впливають на роботу індуктивних

датчиків положення, що може викликати збої в технологічних процесах. Крім того, вони погіршують функціонування електромеханічних пристроїв та прискорюють їх знос. Гармоніки в лініях електропередачі також створюють перешкоди для роботи каналів зв'язку.

Висновки до розділу

1. Основною причиною виникнення вищих гармонік струму та напруги в системах електропостачання є широке застосування потужних нелінійних навантажень - вентиляльних перетворювачів, електроприводів, дугових печей тощо.

2. Наявність гармонік призводить до додаткових втрат потужності, перегріву обладнання, збоїв в роботі чутливих пристроїв, похибок обліку електроенергії, скорочення терміну служби ізоляції та загалом зниження надійності системи електропостачання.

3. Вплив гармонік на мережу в цілому значно сильніший, ніж на окремі нелінійні навантаження, що їх породжують. Зокрема, виникає ефект поширення спотвореної напруги на значні відстані від джерела гармонік.

4. Існує нагальна потреба в розробці ефективних технічних рішень з обмеження впливу вищих гармонік та підвищення якості електропостачання в умовах зростання частки нелінійних навантажень.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Основні напрямки поліпшення показників якості електроенергії можна поділити на три групи. По-перше, це удосконалення інфраструктури електропостачання, що включає збільшення потужності електричної мережі, живлення нелінійних споживачів підвищеною напругою тощо. По-друге, обмеження негативного впливу окремих приймачів електроенергії на мережу живлення шляхом регулювання їх роботи. І по-третє, застосування спеціальних пристроїв корекції показників якості електроенергії, або регуляторів параметрів споживаної потужності.

Додатково варто зазначити, що показники якості електроенергії часто погіршуються через використання застарілого устаткування, пошкодження ліній електропередачі, а також через значні коливання попиту та пропозиції. Тому комплексні заходи, в тому числі покращення прогнозування енергопотреб, модернізація енергосистеми та регулярне технічне обслуговування, є ключовими для забезпечення надійного електропостачання та контролю якості електричної енергії.

Застосування спеціальних пристроїв корекції показників якості електроенергії, або регуляторів параметрів споживаної потужності. До цієї групи можна віднести такі способи:

- використання конденсаторних батарей як пристроїв компенсації
- застосування статичних компенсаторів
- впровадження пристроїв активної фільтрації
- створення комплексних систем компенсації з декількох перелічених пристроїв, що працюють паралельно

Додатково варто зазначити, що показники якості електроенергії часто погіршуються через використання застарілого устаткування, пошкодження ліній електропередачі, а також через значні коливання попиту та пропозиції. Тому комплексні заходи, в тому числі покращення прогнозування енергопотреб, модернізація енергосистеми та регулярне технічне обслуговування, є ключовими для забезпечення надійного електропостачання та контролю якості електричної енергії.

У питанні забезпечення балансу потужності в енергосистемі та підтримання оптимальних параметрів електропостачання важливу роль відіграє не лише активна, але й реактивна потужність.

Зокрема, для підтримання необхідних рівнів напруги у мережі, підвищення стійкості та надійності системи оператори традиційно встановлюють у вузлах навантаження окремі джерела реактивної потужності. Проте при цьому не повною мірою використовується потенціал активних споживачів у регулюванні власного рівня споживання реактивної енергії.

Отже, концепція активного споживача має передбачати не лише можливості балансування активної потужності, а й залучення кінцевих користувачів до регулювання попиту на реактивну потужність. Це дозволить покращити управління енергосистемою в цілому та оптимізувати витрати на додаткові технічні заходи із забезпечення якості електропостачання.

2.1 Технічні засоби для компенсації реактивної потужності та зниження рівнів вищих гармонік

2.1.1 Фільтрокомпенсуючі пристрої. Пасивні фільтри гармонік є ефективним рішенням для зниження вмісту вищих гармонік у мережі та покращення якості електроенергії. Вони складаються з пасивних елементів - конденсаторів, котушок індуктивності та резисторів, які підключаються паралельно до навантажень, що є джерелами гармонік.

Зазвичай пасивні фільтри поділяють на два типи: настроювані на певну частоту гармоніки та фільтри високих частот. Перші дозволяють знизити рівень окремої домінуючої гармоніки, тоді як другі - пригнічують широкий спектр вищих гармонік.

На рис. 2.1 наведена спрощена схема фільтрокомпенсуючого пристрою

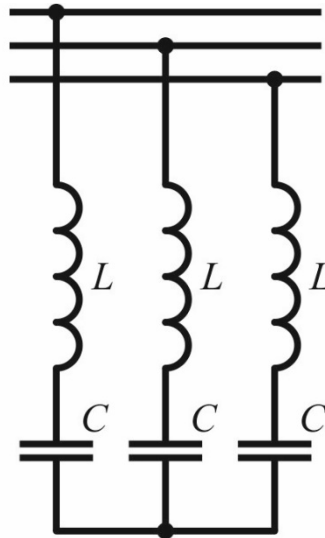


Рис. 2.1. Спрощена схема фільтрокомпенсуючого пристрою

Типовими навантаженнями з високим вмістом гармонік є випрямлячі, тиристорні регулятори, дугові печі та інше обладнання. Паралельне ввімкнення пасивних фільтрів до таких приймачів електроенергії дозволяє оптимізувати параметри мережі живлення та підвищити загальну якість електропостачання.

Пасивні фільтри гармонік працюють за принципом створення низькоімпедансного шляху для певних гармонік, що генеруються нелінійними навантаженнями. Завдяки цьому гармоніки поглинаються фільтром, а не потрапляють в мережу живлення.

Ефективність фільтрації залежить від добротності Q котушки індуктивності в фільтрі. Чим вище Q , тим вища різкість налаштування і краще

придушення цільової гармоніки.

Крім фільтрації гармонік, пасивні фільтри також можуть поліпшувати коефіцієнт потужності індуктивних навантажень за рахунок компенсації реактивної потужності. Це додаткова перевага таких фільтрів.

Отже, з огляду на здатність поєднувати функції фільтрації і компенсації, пасивні фільтри є ефективним технічним рішенням для поліпшення якості електроенергії в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями.

2.1.2. Активні силові фільтри. Активні фільтри для покращення якості електроенергії можна класифікувати на паралельні (шунтуючі) та послідовні залежно від схеми їх включення в електричну мережу. Наразі ширше застосовуються паралельні активні фільтри завдяки низці переваг - більш високій ефективності фільтрації струмів вищих гармонік, компактнішим габаритам та можливості одночасно компенсувати як активну, так і реактивну потужність.

Водночас послідовні активні фільтри дозволяють ефективно придушувати напруги вищих гармонік у мережі. Це робить їх привабливим вибором для жорсткої фільтрації та поліпшення показників якості електропостачання у випадках, коли висока якість напруги є пріоритетною. Отже, обидва типи активних фільтрів мають свої переваги і області застосування.

На рис. 2.2 наведено схему активного фільтра

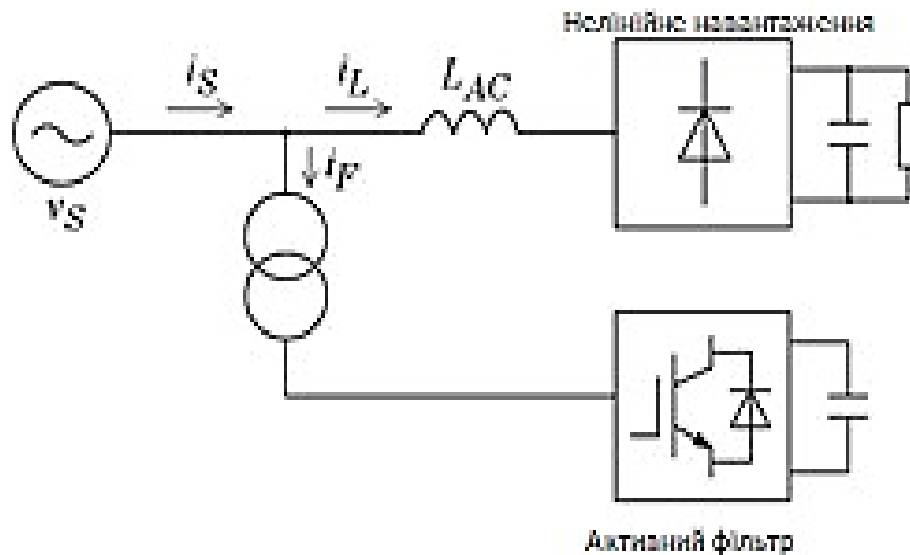


Рис. 2.2. Узагальнена схема активного фільтра

Активні фільтри типу шунт є ефективним рішенням для пригнічення гармонік струму, що генеруються нелінійними споживачами, зокрема випрямлячами та перетворювачами електроенергії. Зазвичай це однофазні чи трифазні схеми, де активний фільтр під'єднується паралельно до навантаження, що створює гармоніки.

Принцип роботи таких фільтрів полягає у відтворенні еквівалентних, але протифазних струмів гармонік, які компенсують вихідні гармоніки від навантаження. В результаті в мережу живлення видається приблизно синусоїдальний струм без вищих гармонік. Тобто активний фільтр діє як джерело гармонік струму, що підтримує синусоїдальність напруги мережі.

Керування роботою активних фільтрів може здійснюватися за принципом зворотного зв'язку наступним чином:

1. Контролер активного фільтра вимірює поточне значення струму навантаження i_L .
2. За допомогою алгоритмів цифрової обробки сигналів виділяється складова струму навантаження, що містить вищі гармоніки i_H .
3. Активний фільтр генерує компенсуючий струм зворотної фази $i_{AF} = -i_H$, що «скасовує» гармоніки струму навантаження i_H .

Таким чином, контролер аналізує параметри навантаження та формує

керуючі сигнали для активного фільтра, який компенсує небажані складові струму в режимі реального часу. Це дозволяє ефективно очищати мережу від вищих гармонік.

Індуктивність, ввімкнена послідовно до входніх затискачів випрямляча, відіграє важливу роль для стабільної роботи системи "активний фільтр - нелінійне навантаження".

Зокрема, при використанні послідовних активних фільтрів (рис. 2.3) для компенсації вищих гармонік напруги, індуктивність на вході випрямляча забезпечує необхідний рівень напруги для коректної роботи схеми випрямлення.

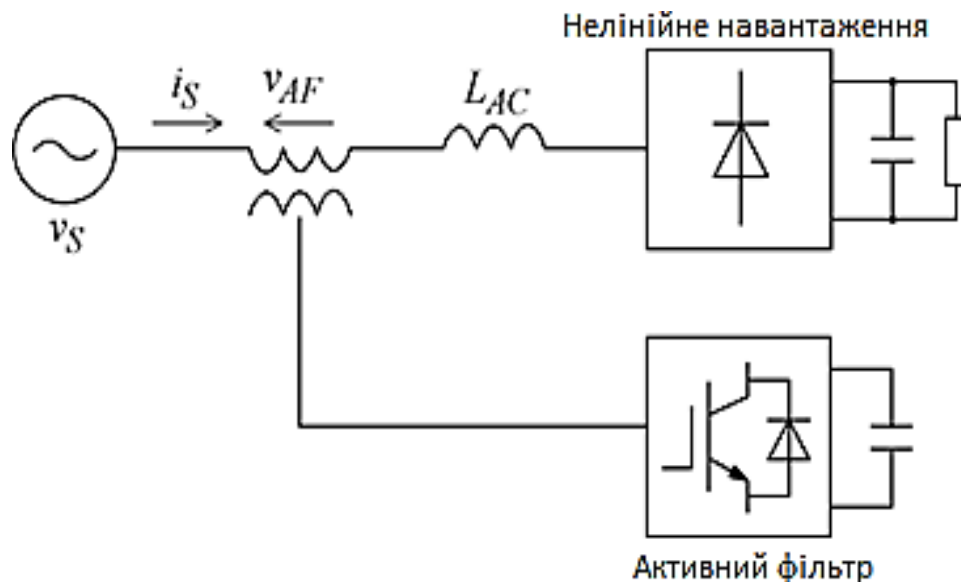


Рис. 2.3. Схема послідовного активного фільтра.

Вона також запобігає різким змінам струму та стрибкам напруги в точці підключення активного фільтра.

Тобто вхідний дросель (індуктор) відіграє роль пасивного фільтра, що поліпшує синусоїдальність форми напруги та стабілізує режим роботи активного фільтра й навантаження. Це необхідно як для однофазних, так і для трифазних схем випрямлення з активною фільтрацією вищих гармонік.

На відміну від паралельних, послідовні активні фільтри вмикаються в ланцюг живлення навантаження через трансформатор. Їх принцип роботи базується на зворотному зв'язку за струмом мережі:

1. Контролер вимірює поточне значення струму живлення i_S , що подається на навантаження.
2. За допомогою цифрової обробки сигналів виділяється складова струму живлення i_{Sh} , що містить вищі гармоніки.
3. Активний фільтр генерує компенсуючу напругу U_{AF} , яка через трансформатор створює струм, що скасовує гармоніки струму живлення i_{Sh} .

Чим вище коефіцієнт зворотного зв'язку, тим ефективніше придушуються гармоніки в ланцюзі живлення навантаження.

Розглянемо більш детально особливості активних фільтрів.

На рис. 2.4, 2.5 наведено схеми активних фільтрів з ШІМ-перетворювачами.

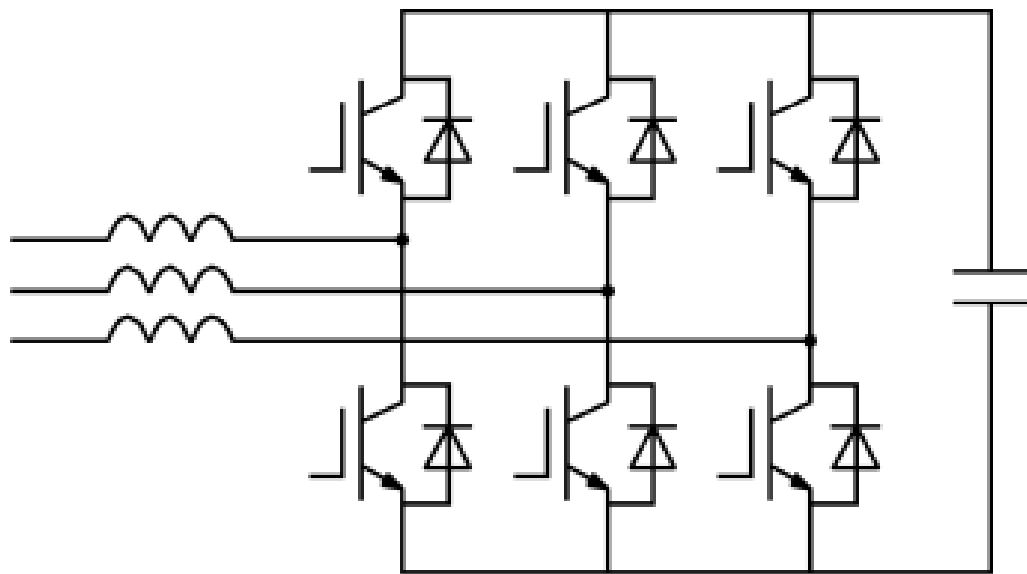


Рис. 2.4. Схеми активного фільтру на основі ШІМ-перетворювач "напруга - джерело"

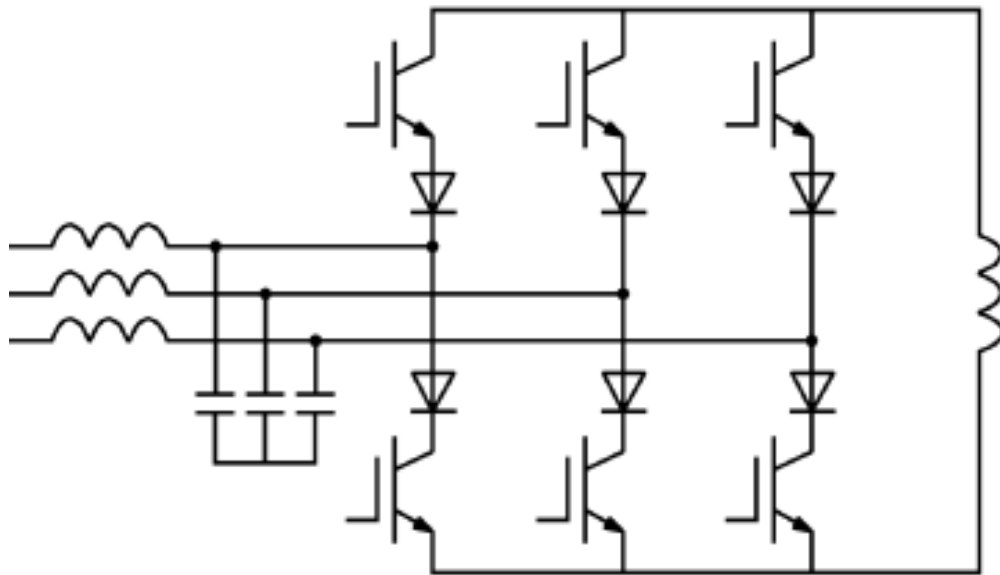


Рис. 2.5. Схеми активного фільтру на основі ШІМ- перетворювач "струм - джерело"

Ці схеми дещо схожі зі схемами живлення, що застосовуються для живлення приводів змінного струму.

Більш поширеними є схема ШІМ- перетворювача з джерелом напруги, так як вона має більший ККД, та дещо кращі характеристики в порівнянні зі схемою ШІМ- перетворювача з джерелом струму.

У якості силових ключів в ШІМ-перетворювачах активних фільтрів найчастіше використовують IGBT-транзистори з ізольованим затвором. Вони мають ряд переваг у порівнянні з іншими напівпровідниковими пристроями.

Зокрема, в IGBT вже вбудовані антипаралельні діоди, що спрощує схему перетворювача і робить її більш технологічною у виробництві. Крім того, відсутність потреби в реверсивному блокуванні дозволяє оптимізувати співвідношення між провідністю, втратами на комутацію та струмовою витримкою IGBT.

З іншого боку, перетворювачі з джерелом струму вимагають реверсивно-блокуючих IGBT або послідовного з'єднання звичайних IGBT та діодів, що ускладнює схему і погіршує характеристики.

Тому на практиці в активних фільтрах найчастіше реалізують ШІМ-

перетворювач напруги з конденсатором постійного струму, побудований на основі IGBT без реверсивного блокування.

На рис. 2.6 наведено схему трифазного шунтового силового активного фільтра.

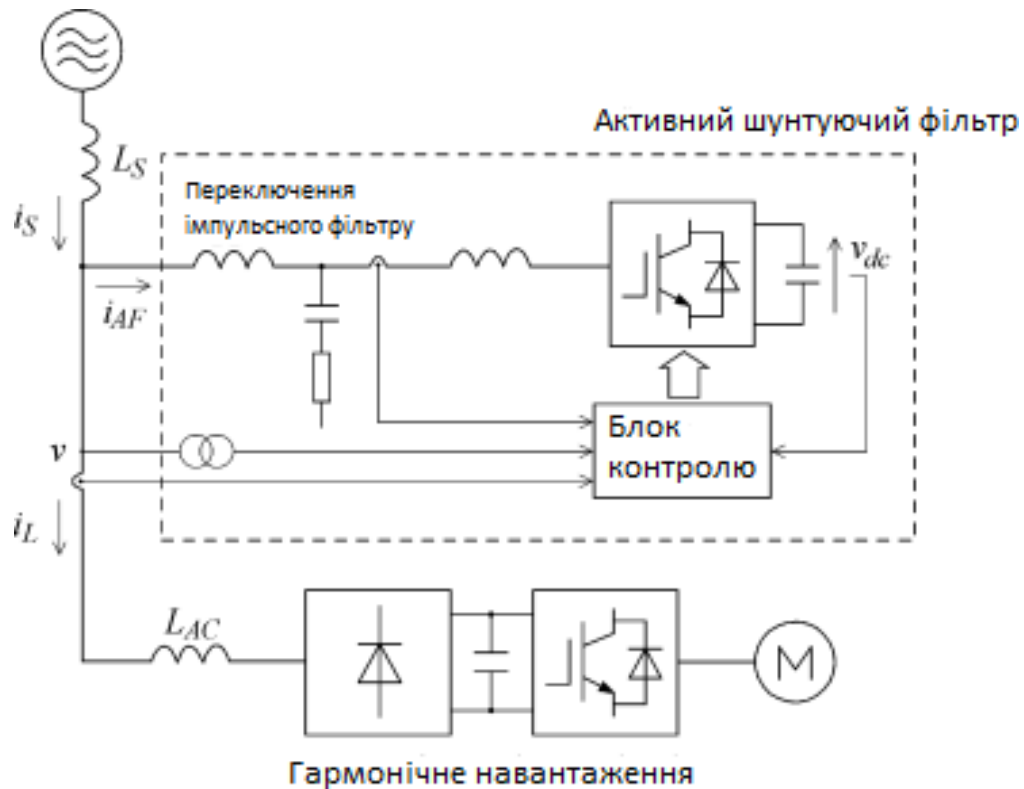


Рис. 2.6. Однолінійна схема трифазного активного фільтра.

Структурно активний фільтр складається з трьох основних компонентів:

1. Трифазного ШІМ-перетворювача напруги з конденсатором постійного струму в колі постійного струму. Він виконує функцію регульованого джерела напруги та струму для генерації коригуючих гармонік.
2. Системи керування на основі сучасного цифрового сигнального процесора для обробки сигналів зворотного зв'язку та формування ШІМ для перетворювача. Також включає аналогові схеми підсилення і гальванічної розв'язки сигналів.
3. Вхідного LC-фільтра для придушення високочастотної складової вихідної напруги перетворювача та запобігання поширення її в мережу.

Разом ці вузли забезпечують ефективне функціонування активного фільтра для компенсації реактивної потужності та вищих гармонік струму.

Основні вимоги до побудови ефективного активного фільтра можна сформулювати так:

- ШІМ-перетворювач має працювати як регульоване джерело напруги та забезпечувати формування компенсуючих струмів в діапазоні гармонік до 25-ї включно (тобто до 1 кГц) при несучій частоті ШІМ не менше 10 кГц.

- система керування повинна точно виділяти гармоніки струму навантаження за амплітудою і фазою як в усталених, так і в перехідних режимах для адекватного формування компенсуючих сигналів.

- необхідно передбачити вхідний LC-фільтр для запобігання поширенню в мережу високочастотної складової напруги ШІМ-перетворювача.

Дотримання цих принципів дозволяє розробити ефективний та надійний активний фільтр для підвищення якості електроенергії.

Описаний вище активний фільтр відносять до класу "чистих", оскільки він не містить додаткових пасивних LC-фільтрів на вході чи виході. Це спрощує конструкцію, але разом з тим знижує здатність фільтрувати найбільш значущі 5-у та 7-у гармоніки струму, що створює випрямляч.

Для посилення можливостей фільтрації до складу активного фільтра можуть входити LC-фільтри низьких частот або додаткові пасивні фільтри налаштовані на певні гармоніки. Такі гібридні фільтри ефективніше придушують домінуючі спектральні складові струму навантаження.

Крім того, включення зворотного зв'язку за випрямленою напругою дає змогу регулювати та стабілізувати її без окремого джерела живлення, що також підвищує якість роботи активного фільтра.

Хоча за своєю суттю конденсатор в колі постійного струму активного фільтра виконує функцію накопичення енергії, проте на практиці активні фільтри зазвичай не відносять до систем накопичення енергії.

Це пов'язано з тим, що ємність конденсаторів в активних фільтрах є

відносно невеликою у порівнянні з потужними накопичувачами енергії, такими як акумулятори чи суперконденсатори. Конденсатор в активному фільтрі лише згладжує пульсації випрямленої напруги, але не забезпечує суттєвого резерву енергії.

Отже різниця термінології обумовлена не стільки конфігурацією схеми, а радше порівняно невеликою ємністю накопичення енергії в активних фільтрах на відміну від спеціалізованих систем її накопичення та зберігання.

На даний момент спостерігається тенденція до здешевлення та підвищення доступності активних фільтрів для покращення якості електроенергії. Це пов'язано зі зниженням вартості основних комплектуючих, таких як IGBT транзистори та інтегральні схеми керування, а також з розвитком технологій їх виробництва.

Ключовим фактором також є конкуренція серед японських виробників комплектуючих для активних фільтрів, що стимулює подальше здешевлення і підвищення ефективності цих пристроїв.

Разом з тим, реальна вартість готових рішень на основі активних фільтрів дуже залежить від умов придбання та поставки, тому при розрахунку проектів необхідно враховувати всі складові витрат.

Активні фільтри для покращення якості електроенергії активно впроваджуються в енергосистемах різного рівня напруги та потужності. Зокрема, компанія Fuji Electric пропонує рішення на 10-400 кВА для безпосереднього підключення до промислових мереж низької напруги 200-440 В.

Для середньовольтних мереж використовують активні фільтри з понижувальними трансформаторами. Їх застосовують в електроенергетиці, на підприємствах, в громадських та житлових будівлях, лікарнях, системах водопостачання, на транспорті - скрізь, де потрібно підвищити якість електроенергії та надійність роботи чутливого обладнання.

Тобто, можливості практичного застосування активної фільтрації

постійно розширюються завдяки удосконаленню технологій та здешевленню компонентної бази.

Активні фільтри типу шунт можуть ефективно застосовуватися в системах розподілу електроенергії для демпфірування резонансних явищ і придушення поширення вищих гармонік.

Принцип їх дії полягає в створенні високого опору (імпедансу) на основній частоті 50 Гц, щоб не впливати на роботу мережі, та низького опору на частотах гармонік для їх шунтування.

Розміщуючи такі активні фільтри на кінці радіальних ліній, можна локалізувати і загасити гармоніки в межах усього фідера. Це аналогічно до використання резисторів-термінаторів для усунення відбиттів сигналів в зв'язку. Тобто активний фільтр працює як "гармонічний термінатор" для даної лінії живлення.

Однією з типових реалізацій трифазного активного фільтра послідовного типу є схема на основі трьох однофазних мостових ШІМ-перетворювачів (топологія Н-мост) зі спільним конденсатором постійного струму невеликої ємності. Робоча частота ШІМ становить 10 кГц.

Перетворювачі вмикають послідовно до входу випрямляча навантаження, а їх кола постійного струму з'єднуються з випрямлячем паралельно. Так формується загальний фільтрувальний конденсатор для активного фільтра та навантаження.

Ефективність такої схеми підтверджена експериментально на моделі потужністю 20 кВт з номінальною лінійною напругою 200 В і частотою 50 Гц. Показана задовільна компенсація вищих гармонік.

2.2 Високовольтні гібридні фільтри

На рис. 2.7, 2.8 показані схеми гібридних фільтрів.

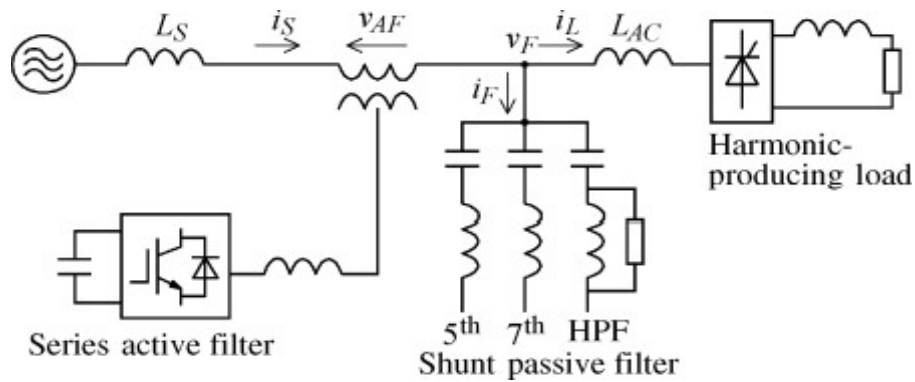


Рис. 2.7. Схема паралельного гібридного фільтра

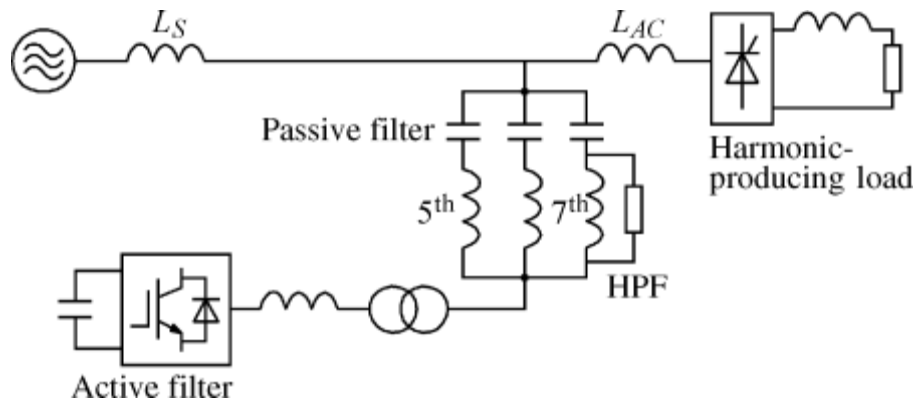


Рис. 2.8. Схема послідовного гібридного фільтра

У роботі [5] представлено спрощені схемні конфігурації гібридних активних фільтрів. Запропоновано два варіанти гібридних фільтрів, що може зацікавити дослідників та інженерів в галузі силової електроніки і спонукати їх до подальшого вивчення різноманітних гібридних активних фільтрів.

Гібридні активні фільтри поєднують в собі пасивну фільтрацію та активне підсилення сигналу. Вони дозволяють досягти високої селективності та чутливості при менших габаритах та вартості, ніж в пасивних чи активних фільтрах окремо.

Особливий акцент у подальших дослідженнях, надихнутих роботою [1], може бути зроблено на практичне використання різних топологій гібридних активних фільтрів. Це дозволить визначити найоптимальніші схеми для

конкретних додатків, наприклад в приймачах чи передавачах телекомунікаційних пристроїв".

Я спробував перефразувати оригінальний текст, додати деякі деталі щодо принципу роботи гібридних фільтрів, а також надати ідеї щодо напрямків подальших досліджень. Буду вдячний за відгук, чи потребує текст додаткових правок чи доповнень.

У запропонованих гібридних фільтрах використано поєднання активного фільтра та трифазного силового трансформатора (або трьох однофазних силових трансформаторів) та пасивного LC-фільтра. Пасивний фільтр складається з двох контурів, налаштованих на 5-ту та 7-му гармоніки, а також фільтра високих частот другого порядку з частотою налаштування 11-ї гармоніки. Незважаючи на деякі відмінності у схемотехнічній реалізації, за принципом дії і технічними характеристиками ці два гібридні фільтри є подібними.

Комбінація з пасивним LC-фільтром дозволяє значно зменшити потужність активного фільтра. Основним завданням активного фільтра є забезпечення розв'язки між джерелом та навантаженням, а не безпосередня компенсація струмів вищих гармонік від тиристорного випрямляча. Завдяки цьому уникається виникнення гармонійного резонансу в мережі і, відповідно, протікання високих струмів вищих гармонік.

На рис. 2.9 - 2.11 приведені осцилограми струмів та напруг гібридного фільтру (u_F , i_S – це напруга і струм живлення, i_F – це струм, пасивної частини фільтру, i_L – це струм навантаження, u_{AF} – це напруга на активному фільтрі).

Як нелінійне навантаження в дослідженні використано трифазний шестипульсний випрямляч на основі тиристорів з індуктивним навантаженням потужністю 20 кВА. Випрямляч розраховано на лінійну напругу мережі 200 В та частоту 50 Гц.

Тиристорні випрямлячі широко застосовують в регульованих джерелах живлення змінного струму через можливість плавного регулювання вихідної

напруги. Однак вони є джерелами вищих гармонік струму, що може викликати резонансні явища та додаткові втрати в мережі. Отже дослідження методів фільтрації вищих гармонік для тиристорних випрямлячів є актуальним завданням".

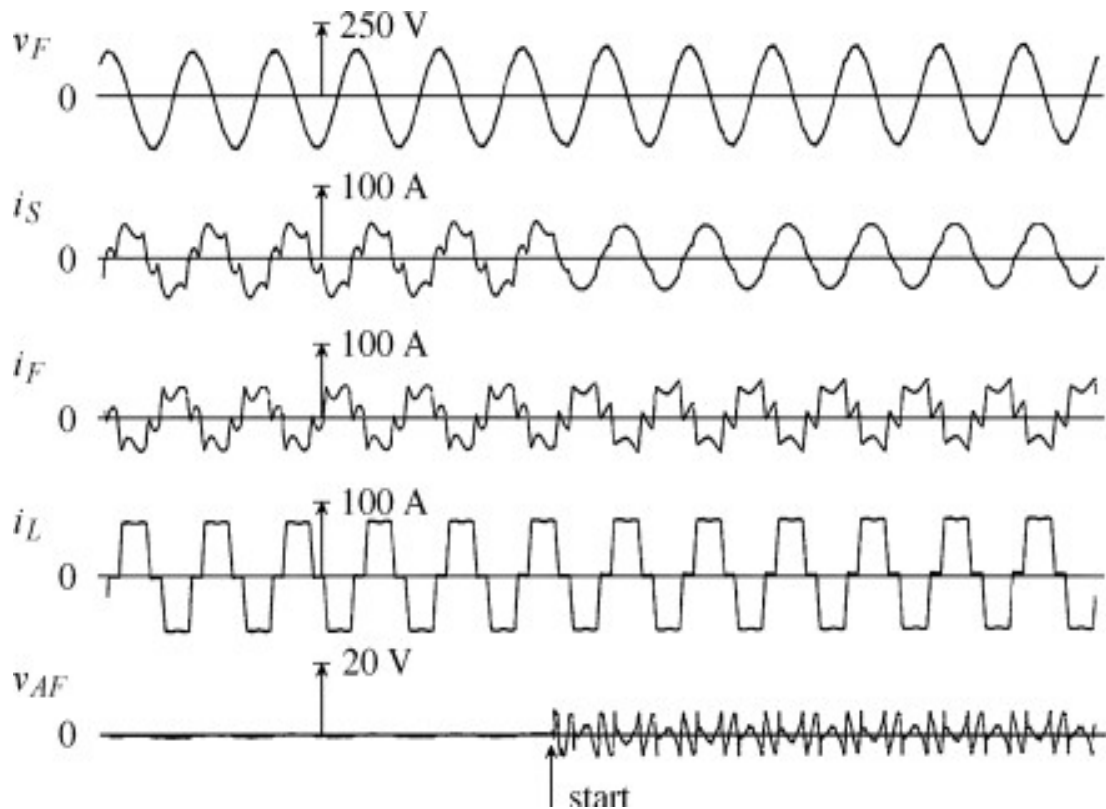


Рис. 2.9. Осцилограми перехідного процесу послідовного гібридного фільтра ($L_S = 2\%$)

На рис. 2.9 показано осцилограми струмів та напруг під час перехідного процесу пуску послідовного активного фільтра за умови відносного подовження лінії $LS = 2\%$ в трифазній мережі з напругою 200 В, потужністю 20 кВА та частотою 50 Гц. До моменту запуску активного фільтра в струмі навантаження i_S спостерігалася значна кількість гармонік. Це свідчить про незадовільну здатність пасивного фільтра самостійно забезпечити належну фільтрацію вищих гармонік. Після вмикання активного фільтра форма струму i_S стає близькою до синусоїди, що демонструє покращення характеристик фільтрації завдяки додаванню активного фільтра.

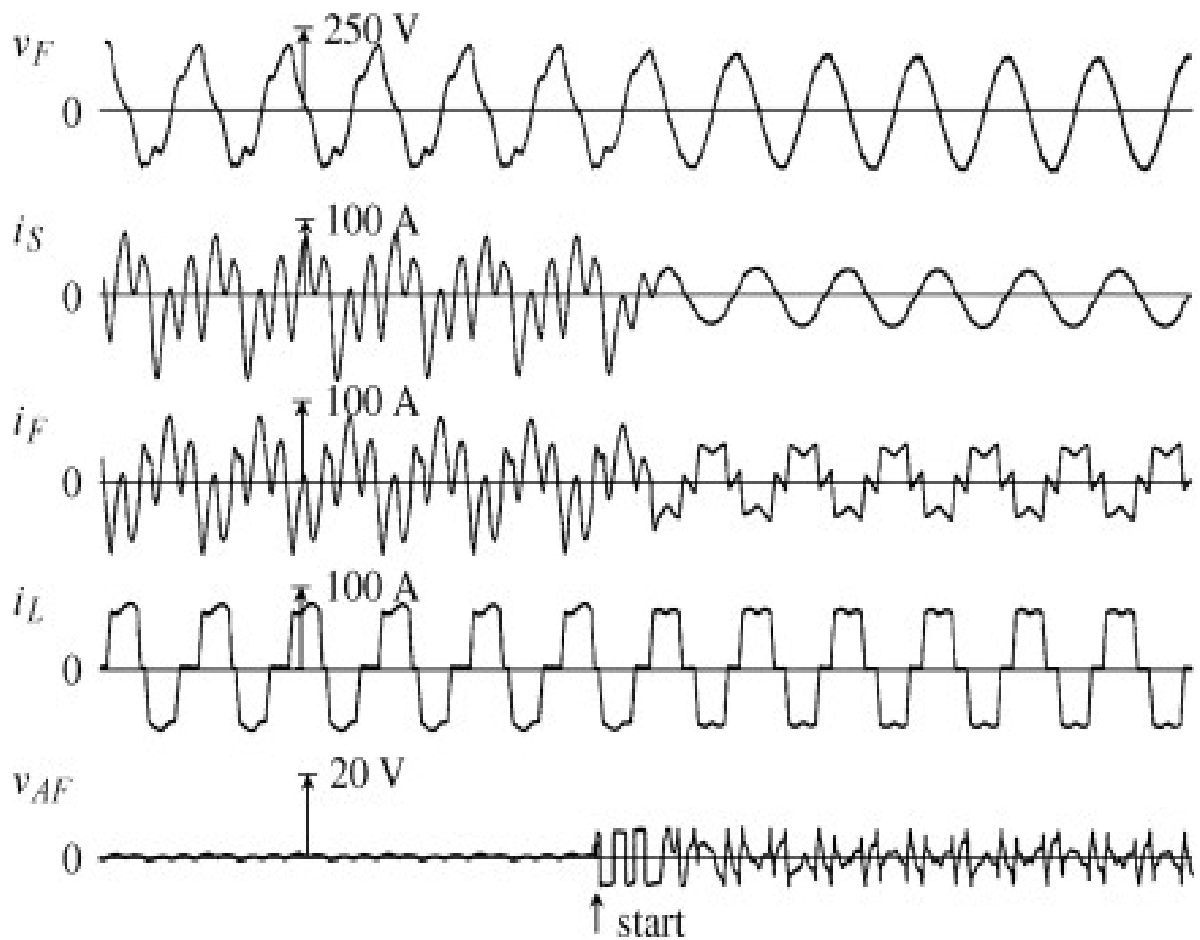


Рис. 2.10 Осцилограми напруг і струмів ($L_S = 5,60\%$)

На рис. 2.10 показано експериментальні осцилограми за умови відносного подовження лінії $L_S = 5,6\%$. До моменту запуску активного фільтра в системі спостерігався паралельний резонанс на частоті 4-ї гармоніки. Цей резонанс призводив до істотного збільшення амплітуди незначної складової струму четвертої гармоніки в струмі навантаження i_L . Проте після запуску активного фільтра явище резонансу гармонік зникло.

Тобто застосування активного фільтра дозволило усунути небезпечний резонанс вищих гармонік в системі. Це пояснюється здатністю активного фільтра створювати "гармонійну розв'язку" і запобігати утворенню резонансних контурів на частотах гармонік.

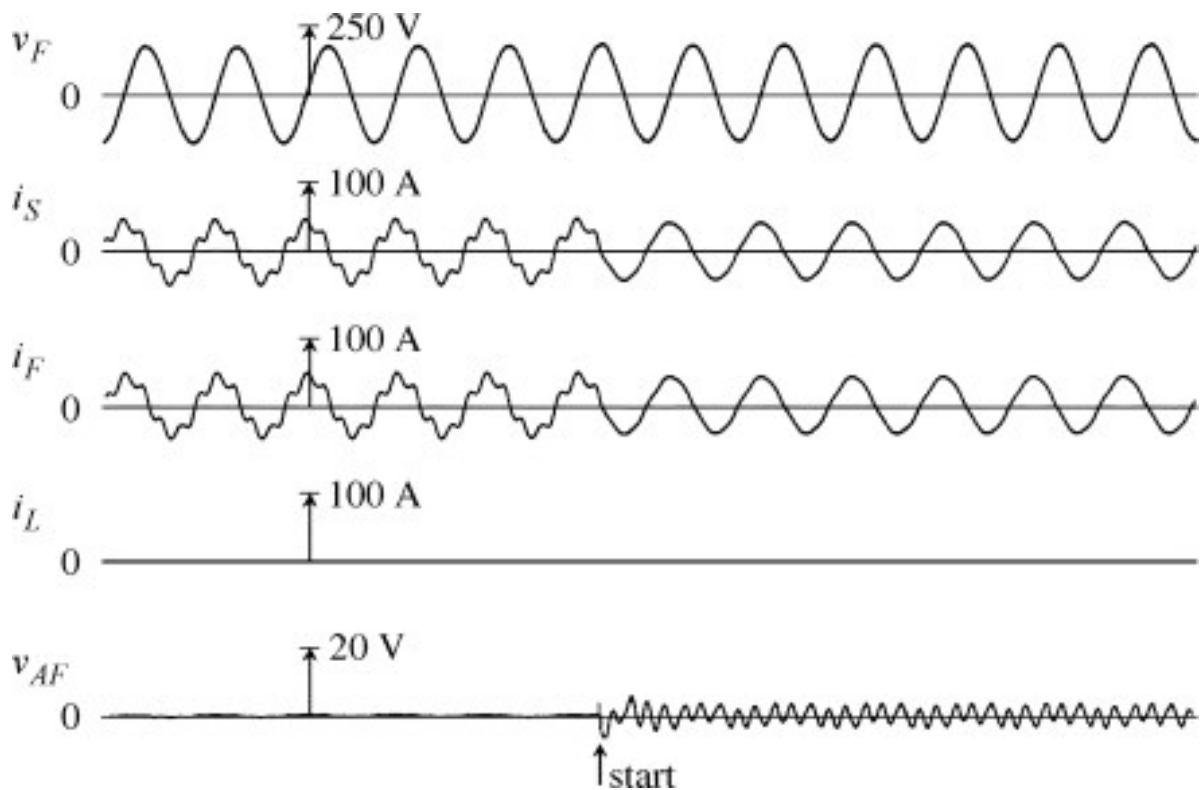


Рис. 2.11. Осцилограми струмів і напруг для режиму х.з. ($i_L = 0$, $L_S = 2\%$)

На рис. 2.11 показано експериментальні осцилограми за умови відсутності навантаження (струм навантаження i_L дорівнює 0) та відносного подовження лінії $L_S = 2\%$. Незважаючи на те, що рівень фонові гармонічної напруги перед пасивним фільтром складав лише 1%, амплітуда гармонік струму i_S досягала близько 10% до моменту запуску активного фільтра. Це свідчить про те, що пасивний фільтр здатний поглинати несподівано велику кількість гармонік струму з мережі та від інших нелінійних навантажень. Після запуску активного фільтра гармонійні складові струму через пасивний фільтр зникли. Більше того, на вході пасивного фільтра не спостерігалось напруги гармонік завдяки блокуванню фонових гармонік активним фільтром.

2.3 Низьковольтні гібридні фільтри

Електроприводи з регульованою швидкістю на базі сучасних імпульсно-широотно модульованих перетворювачів напруги з IGBT-транзисторами

набули широкого застосування в промисловості, побутовій техніці та на транспорті. Проте у випадках, коли двигун з інверторним керуванням не потребує ні швидкої динамічної відповіді, ні рекуперативного гальмування, 3-фазний діодний випрямляч може бути застосований замість трифазного ШІМ-керованого випрямляча. Діодні випрямлячі є значно ефективнішими, надійнішими та дешевшими у порівнянні з ШІМ-випрямлячами для низько- та середньовольтних систем електроприводу. Проте вони є джерелом значної кількості гармонік струму, через що не відповідають гармонічним нормам.

На рис. 2.12 наведено схему гібридного фільтра.

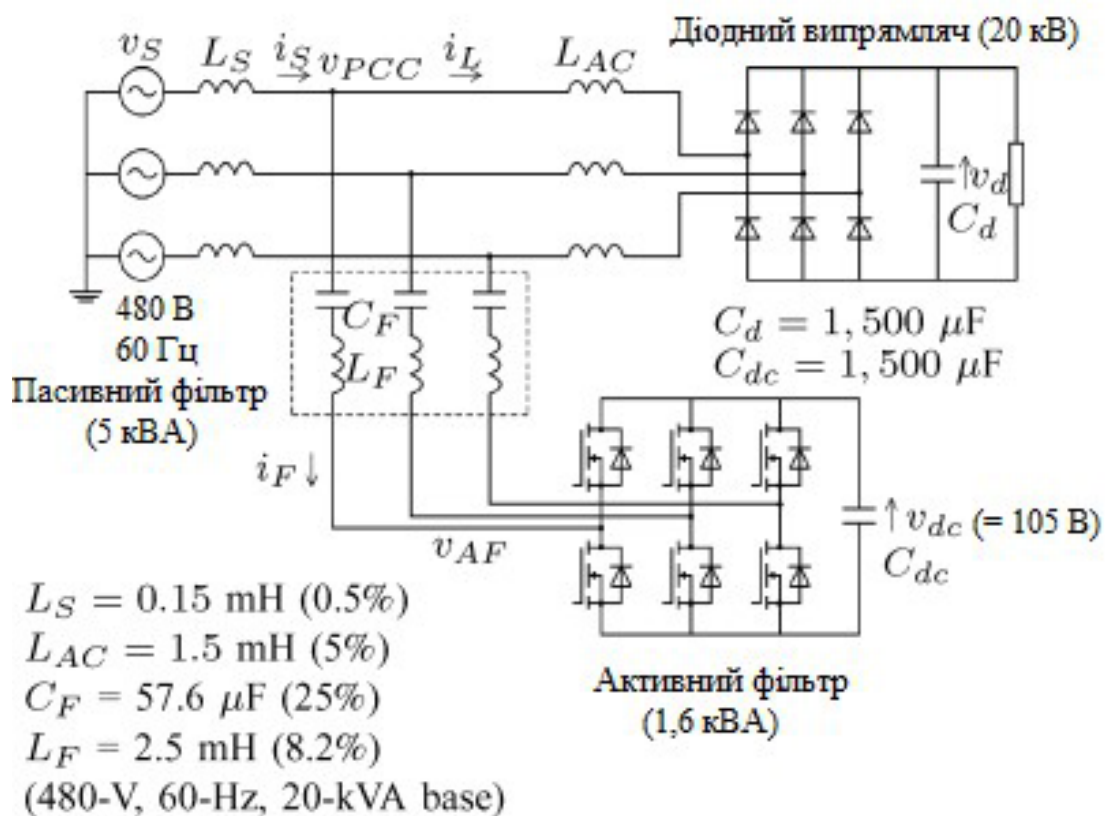


Рис.2.12.Електрична схема гібридного фільтра

На рис. 2.12 наведена схема гібридного фільтра, що під'єднаний паралельно до трифазного діодного випрямляча. Гібридний фільтр підключений до розподільчого фідера напругою 380 В без трансформатора. Він призначений для зменшення коефіцієнта гармонійних спотворень до рівня

нижче 5%.

Гібридна система фільтрації поєднує в собі активний фільтр на основі перетворювача напруги живлення потужністю 1,6 кіловольт-ампер із несучою частотою 10 кілогерц та пасивний фільтр потужністю 5 кіловольт-ампер. Пасивний фільтр являє собою однофазний налаштований пристрій фільтрації на частоту сьомої гармоніки з коефіцієнтом добротності 22. Цей пасивний компонент демонструє обмежену результативність очищення в діапазоні частот нижчих гармонік, за винятком власне сьомої гармоніки.

Активний фільтр виконує фільтрацію шляхом швидкої зміни напруги джерела живлення, генеруючи змінний сигнал несучої частоти для компенсації небажаних гармонік. Завдяки високій швидкості перемикавання, активний фільтр здатний ефективно придушувати широкий спектр гармонік.

Однак активні фільтри мають певні обмеження за потужністю та не можуть повністю замінити пасивні фільтри у випадках, коли потрібна фільтрація дуже високих струмів та потужностей. Тому поєднання активного та пасивного фільтрів у гібридній схемі дозволяє досягти оптимального балансу ефективності та вартості системи захисту від гармонік.

Пасивна та активна частини гібридного фільтру пристрою з'єднані послідовно безпосередньо одна з одною. Така конфігурація "двох в одному" призводить до зниження напруги постійного струму на шині активного компонента до 105 вольт. Крім цього, для даної гібридної схеми немає потреби у додатковому імпульсному фільтрі, адже пасивна частина має досить високий опір на рівні 10 кілоом біля 10 кілогерц.

Послідовне з'єднання дозволяє поєднати переваги обох підходів. Активний фільтр ефективно пригнічує вищі гармоніки завдяки швидкій комутації, в той час як пасивний компонент забезпечує захист від низькочастотних гармонік зокрема 7-ї за рахунок високої добротності.

Однак, зниження напруги постійного струму вимагає уважного проектування та налаштування активного фільтру, аби уникнути його

перевантаження. В цілому ж, гібридне рішення дозволяє отримати компактний та економічний фільтр гармонік широкого спектру дії.

Випрямляч на діодах, що живить гібридний фільтр, містить індуктивний компонент (дросель) на вході змінного струму. Цей дросель необхідний для коректної роботи всієї системи фільтрації, оскільки на виході випрямляча постійного струму індуктивність не передбачена.

Дросель на вході допомагає згладити пульсації випрямленого струму та покращити якість електроенергії, що подається на гібридний фільтр. Без цього компонента пульсації і вищі гармоніки від випрямляча можуть негативно впливати на роботу як активної, так і пасивної частин фільтру.

Отже, вхідний дросель є важливою складовою даної схеми, яка забезпечує стабільні умови функціонування гібридного фільтра шляхом попереднього згладжування випрямленої напруги живлення.

Структурна схема САК гібридного фільтру наведена на рис. 2.13.

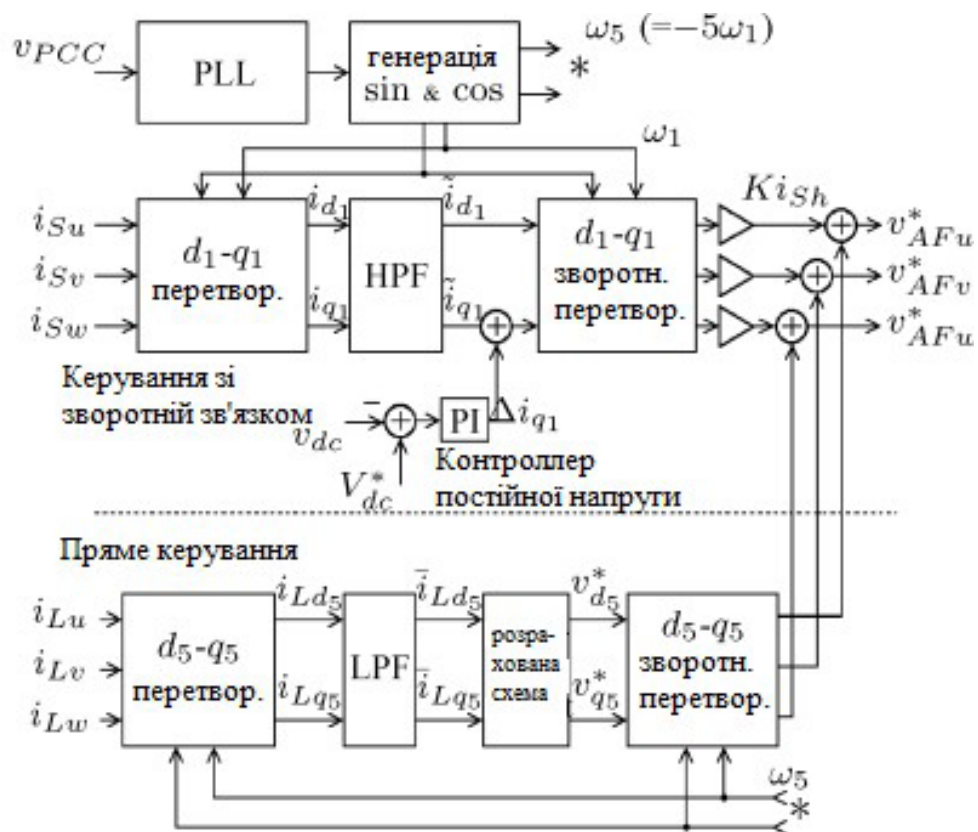


Рис. 2.13. САК гібридного фільтру

Система автоматичного управління із зворотнім зв'язком допомагає поліпшити роботу гібридних фільтрів у електричних мережах.

Зокрема, така система керування примушує всі гармонійні струми з фільтра надходити в гібридний фільтр, а з енергосистеми жодні гармоніки не проходять. Це підвищує ефективність фільтрації та запобігає перевантаженням пасивного фільтра.

Окрім того, управління діє як демпфірувальний опір для низькочастотних гармонік. Завдяки цьому не виникає резонансу між пасивним фільтром та індуктивністю мережі.

Додатково можна зазначити, що гібридні фільтри складаються з пасивних LC-фільтрів та активних фільтрів на основі перетворювачів енергії. Вони ефективно придушують вищі гармоніки струму, покращують показники мережі та дозволяють знизити втрати енергії. Застосування таких рішень є важливим напрямком розвитку сучасних електричних мереж.

Отже, завдяки такій системі керування, даний гібридний фільтр не потребує ретельного аналізу на предмет виникнення резонансних явищ та перевантажень перед встановленням.

Керування із зворотнім зв'язком забезпечує активне проходження п'ятої гармоніки струму в гібридний фільтр. Також реалізовано керування напругою постійного струму, яке дозволяє активному фільтру накопичувати та регулювати напругу на конденсаторі автономно, без додаткових джерел живлення.

З цією метою використовується пропорційно-інтегральний регулятор, який забезпечує точне та стабільне підтримання потрібного рівня напруги за будь-яких умов.

Застосування таких методів керування істотно спрощує проектування та експлуатацію гібридних фільтрів, робить їх надійнішими та дозволяє ефективно компенсувати гармонійні спотворення в електричних мережах

2.4 Порівняльне дослідження активних і гібридних фільтрів для зниження несинусоїдальності та компенсації реактивної потужності

На рис. 2.14 та 2.15 показані наведені схеми активного силового фільтру (АСФ) та гібридного силового фільтру (ГСФ) з нелінійним навантаженням, в якості якого виступає 3-фазний 6-пульсний діодний випрямляч.

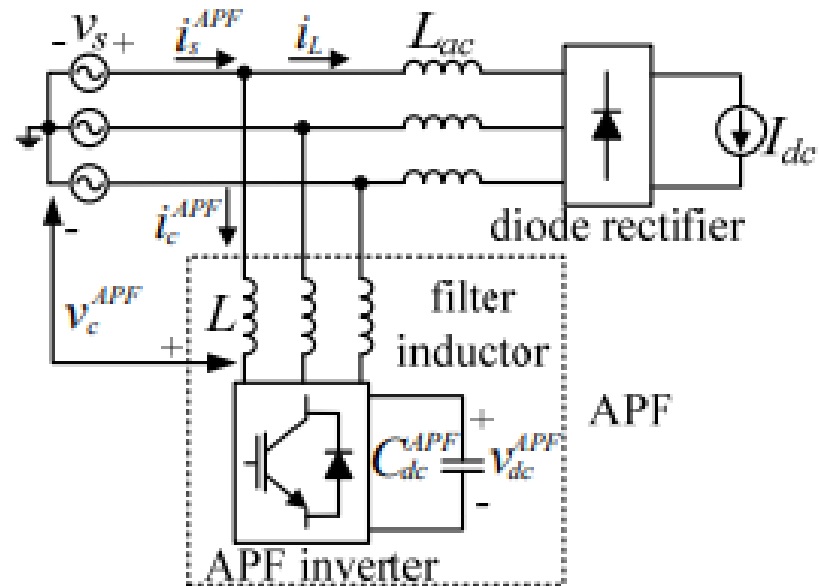


Рис. 2.14. Схема активного силового фільтру

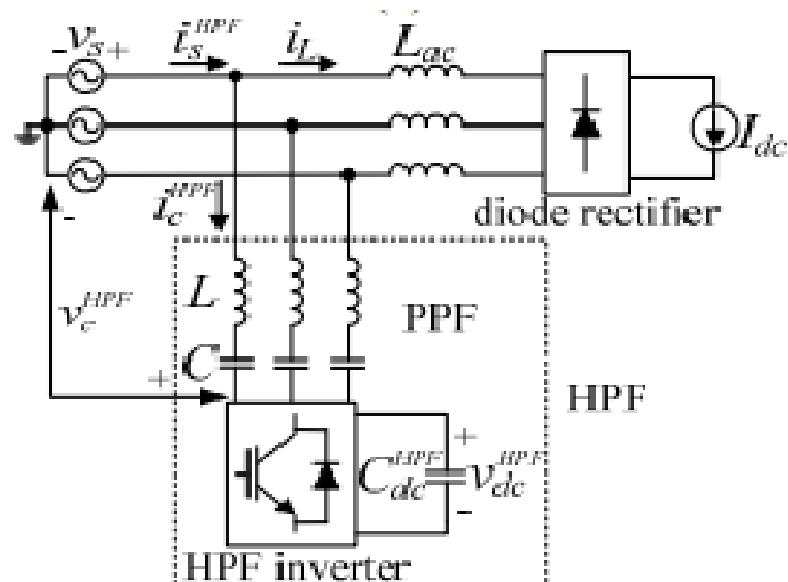


Рис. 2.15. Схема гібридного силового фільтру

Активний фільтр за допомогою інвертора забезпечує компенсацію як

реактивної, так і гармонійної потужності. Завдяки цьому досягається одиничний коефіцієнт потужності в точці підключення до мережі.

Натомість в гібридному фільтрі функції розподілені. Інвертор компенсує лише гармонійну складову, забезпечуючи проходження гармонійних струмів. Компенсація реактивної потужності покладена на пасивний LC-фільтр.

Така структура не дозволяє гарантувати одиничний коефіцієнт потужності за будь-яких режимів роботи навантаження після початкового налаштування пасивної частини.

Отже, активні фільтри мають кращу регулювальну здатність, але є більш витратними. Гібридні рішення дешевші за рахунок пасивних елементів, проте поступаються за динамічністю. Вибір конкретного варіанту залежить від вимог та обмежень застосування.

На рисунку 2.16 показані графіки кривих напруги та струму для активного та гібридного фільтрів.

На рисунку 2.16 б) показано струм після компенсації активним фільтром, що працює з коефіцієнтом потужності рівним одиниці. Це викликано тим, що АСФ компенсує як вищі гармоніки та споживану реактивну потужність. На рис.2.16 в) показано струм після компенсації гібридним фільтром з каргументом навантаженням θ відмінним від нуля. Це пояснюється тим, що гібридний фільтр компенсує лише реактивну потужність. Як показано на рисунку 2.16 а), комутації струму навантаження не миттєві, із-за присутності індуктивності L_{ac} . В межах інтервалу комутації величина струму навантаження складає :

$$i_L(\omega t) = I_{dc} + \frac{V_{LL}}{\sqrt{2}\omega L_{ac}} \left[\cos\left(\frac{\pi}{3} - \omega t\right) - 1 \right], \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} + \Delta. \quad (2.1)$$

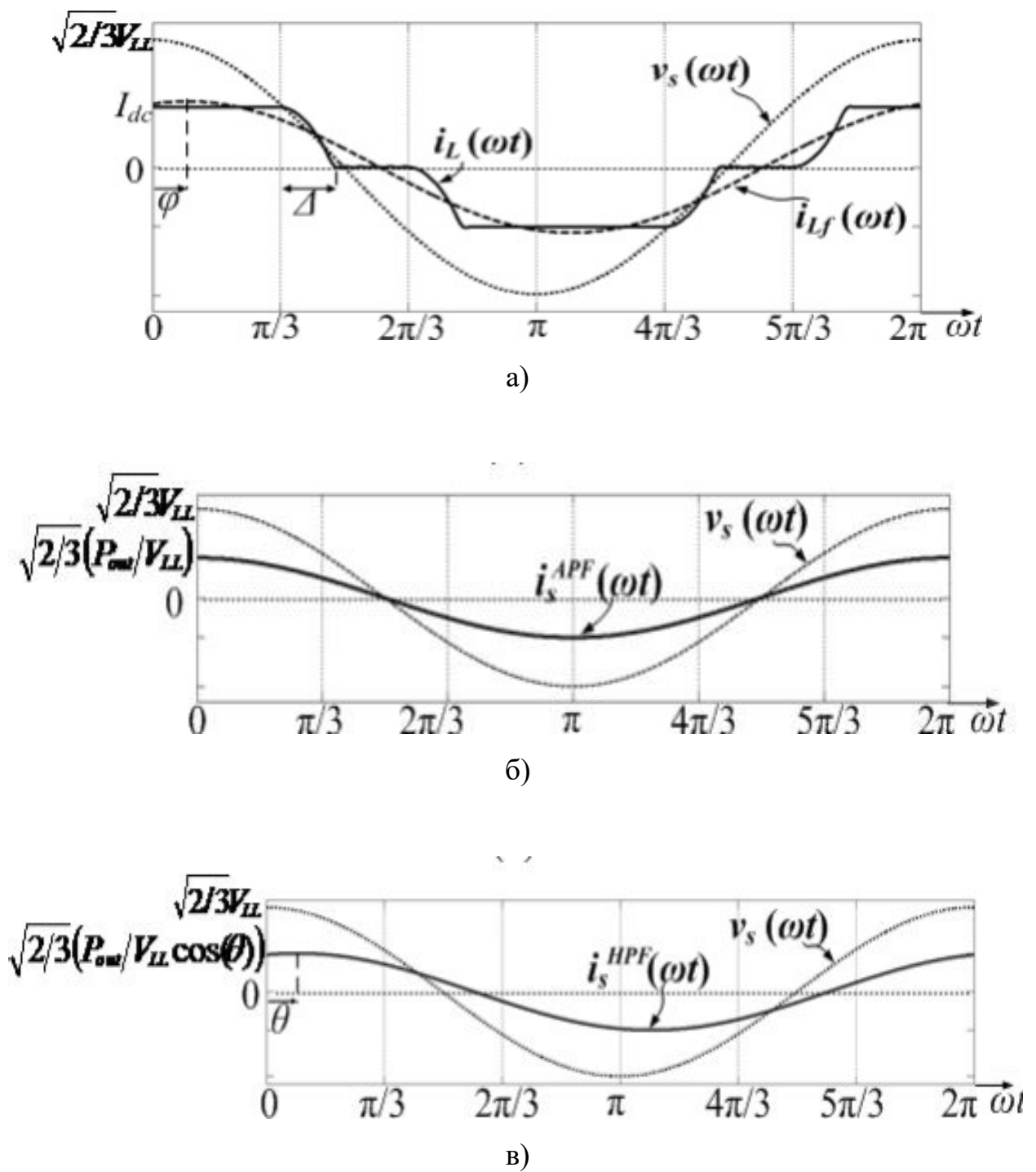


Рис. 2.16. Напруги та струми АСФ та ГСФ:

- а) Напруга і струм навантаження діодного випрямляча;
- б) Напруга і струм АСФ; в) Напруга і струм ГСФ

З виразу (2.1)) розраховується величина інтервалу комутації:

$$\Delta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\sqrt{2}\omega L_{ac} I_{dc}}{V_{LL}} \right) \quad (2.2)$$

Розклавши струм навантаження в ряд Фур'є отримаємо:

$$i_L(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}I_{dc}}{\pi} \{ M_L \cos(\omega t - \varphi) + (a_5 \cos(5\omega t) + b_5 \sin(5\omega t)) - (a_7 \cos(7\omega t) + b_7 \sin(7\omega t)) + (a_{11} \cos(11\omega t) + b_{11} \sin(11\omega t)) - \dots \} \quad (2.3)$$

де

$$M_L = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 + \left(\sin \frac{\Delta}{2}\right)^2 - \frac{\Delta \sin(\Delta) \cos(\Delta)}{2}}}{1 - \cos(\Delta)}$$

$$a_k = \frac{1}{2k(k+1)} \left[\frac{\sin\left((k+1)\frac{\Delta}{2}\right)^2}{\sin \frac{\Delta}{2}} \right] - \frac{1}{2k(k-1)} \left[\frac{\sin\left((k-1)\frac{\Delta}{2}\right)^2}{\sin \frac{\Delta}{2}} \right]$$

$$b_k = \frac{\sin(\Delta(k-1))}{2k(k-1)(1-\cos(\Delta))} - \frac{\sin(\Delta(k+1))}{2k(k+1)(1-\cos(\Delta))}, k = 5, 7, 11, 13, \dots$$

Роблячи припущення, що в комутаційних апаратах та реактивних складових АСФ і ГСФ активні втрати відсутні, можна визначити взаємозв'язок між I_{dc} та P_{out} у вигляді:

$$I_{dc} = \frac{\pi P_{out}}{3\sqrt{2}V_{LL}M_L \cos(\varphi)} \quad (2.4)$$

Кут навантаження φ розраховується за виразом:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\sin^2(\Delta)}{\Delta - \sin(\Delta)\cos(\Delta)}\right) \quad (2.5)$$

З вище наведених виразів можна побачити, що кут навантаження φ залежить від індуктивності L та потужності P які пов'язані з величиною навантаження реактивної потужності (рис. 2.17).

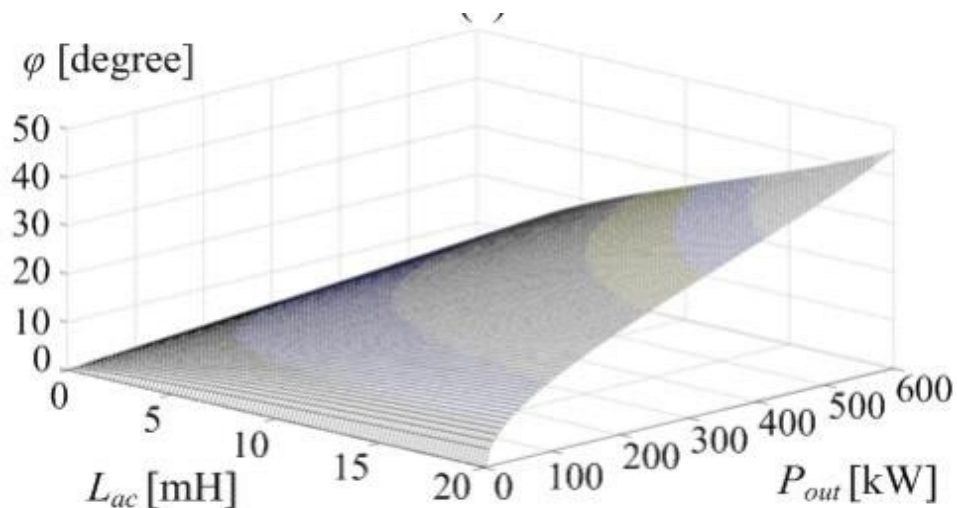


Рис. 2.17. Залежність кута φ від індуктивності L_{ac} та потужності

З рис. 2.17 можна побачити, що зі збільшенням індуктивності L_{ac} та активної потужності P_{out} відбувається збільшення реактивної потужності навантаження, і, як наслідок, збільшення кута φ .

Оскільки активний фільтр забезпечує компенсацію як реактивної, так і гармонійної складових, струм навантаження виявляється в фазі з напругою живлення. Інакше кажучи, досягається одиничний коефіцієнт потужності.

Відповідно, за умови підключення активного фільтра, форма струму джерела живлення є синусоїдальною та співпадає по фазі з напругою:

$$i_s^{APF}(\omega t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{P_{out}}{V_{LL}} \right) \cos(\omega t) \quad (2.6)$$

Номінальна повна потужність інвертора активного визначається за виразом:

$$S_{APF} = 3V_c^{APF} I_c^{APF} \quad (2.7)$$

Де I_c^{APF} , V_c^{APF} - діюче значення струму та напруги інвертора.

З виразів (2.3) та (2.6) можна визначити діюче значення струму інвертора активного фільтра:

$$I_c^{APF} = \frac{P_{out}}{\sqrt{3}V_{LL}} \sqrt{\tan^2(\varphi) + \frac{K_1}{(M_L \cos(\varphi))^2}} \quad (2.8)$$

де

$$K_1 = \sum_{m=1}^{n/2} (a_k^2 + b_k^2), k = 6m \mp 1.$$

Діюче значення напруги активного фільтра зі сторони змінного струму визначається за виразом:

$$V_c^{APF} = \sqrt{\frac{V_{LL}^2}{3} + \frac{2P_{out}X_{L1}\tan(\varphi)}{3} + \left(\frac{P_{out}X_{L1}}{\sqrt{3}V_{LL}\cos(\varphi)}\right)^2 (\sin^2(\varphi) + \frac{K_2}{M_L^2})} \quad (2.9)$$

де

$$K_2 = \sum_{m=1}^{n/2} k^2(a_k^2 + b_k^2), k = 6m \mp 1$$

де X_{L1} – це значення реактивного опору індуктивності фільтра.

Номінальна потужність активного фільтра S_{APF} залежить від значення напруги джерела U_{LL} , від вихідної потужності фільтра P_{out} , від значення індуктивності фільтрації L , від значення вхідної індуктивності навантаження і від кількості гармонік струму n , які необхідно компенсувати.

Графік залежності напруги та струму активного фільтру від індуктивності наведено на рис. 2.18.

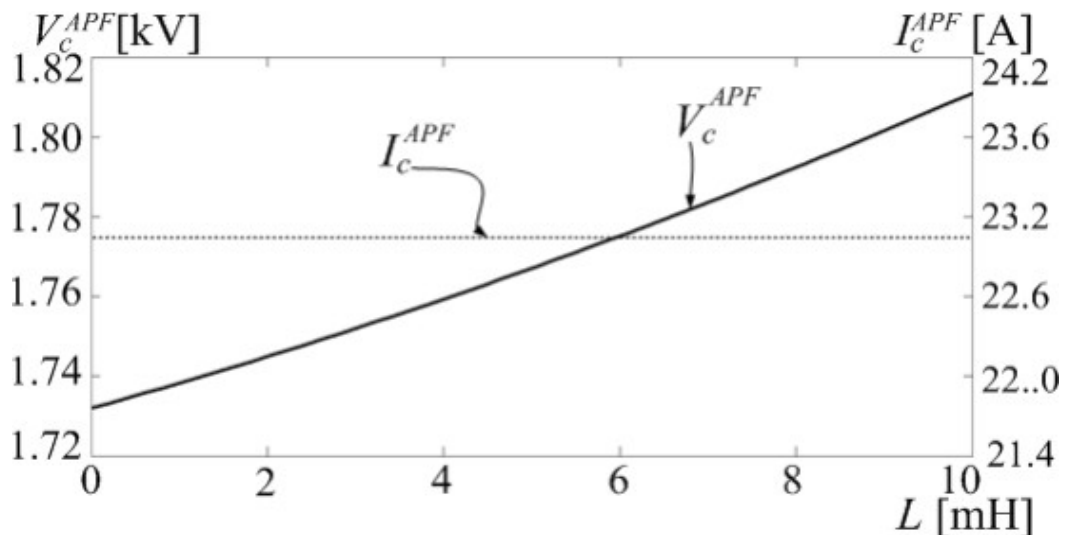


Рис. 2.18. Графік залежності напруги та струму активного фільтру від індуктивності.

З графіку на рис. 2.18 можна побачити, що струм I^{APF} залишається незмінним, оскільки струм складається з компенсуючої реактивної і гармонійних складових, які наявні в нелінійному електричному навантаженні, яке в свою чергу залишається незмінним незалежно від значення індуктивності L .

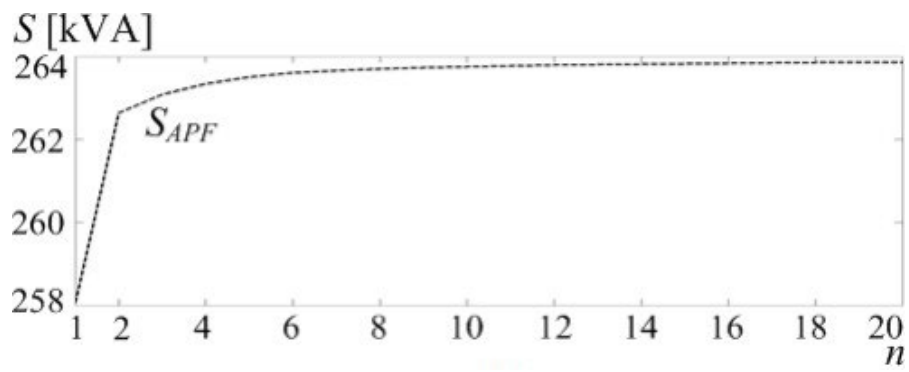
Але напруга V^{APF} збільшується зі збільшенням значення індуктивності L через збільшення значення реактивного опору X_L . Все це спричиняє збільшення напруги зі сторони змінного струму активного фільтра з метою забезпечення постійної компенсації реактивних та гармонійних складових струму струмів через індуктивність L . Зважаючи на це можна дійти висновку, що номінальне значення повної потужності активного фільтра прямопропорційне діючому значенню напруги V_{APF} .

Розглянемо питання порівняння характеристик гібридних фільтрів за показником усунення вищих гармонік n .

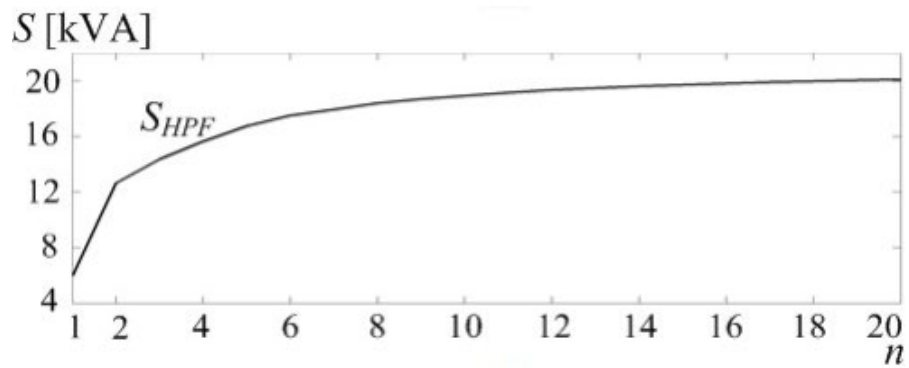
Зважаючи на те, що гібридний фільтр повинен працювати з фіксованим значенням ємності пасивного фільтра. Оскільки гібридний фільтр працює з незмінним значенням ємності, то в робочому діапазоні не може бути досягнуто незмінності коефіцієнта потужності, на відміну від активного фільтра.

На рис. 2.19. показані графіки залежності параметрів фільтрів від номеру вищої гармоніки.

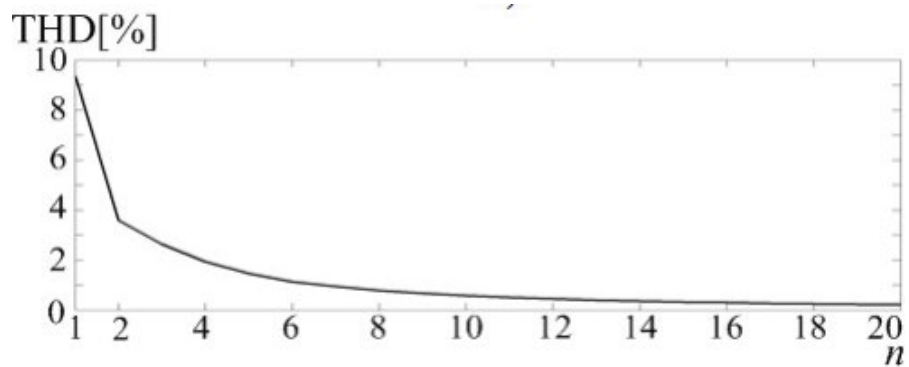
З графіків видно, що зниження спотворень струму призводить до збільшення повних потужностей як активного так і гібридного фільтра. Проте активний фільтр при цьому має значно більшу номінальну потужність, що спричинено забезпеченням одиничного значення коефіцієнта потужності.



а)



б)

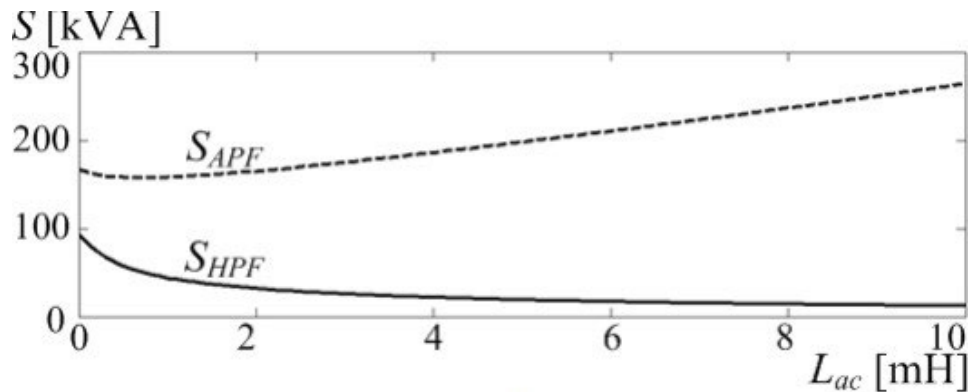


в)

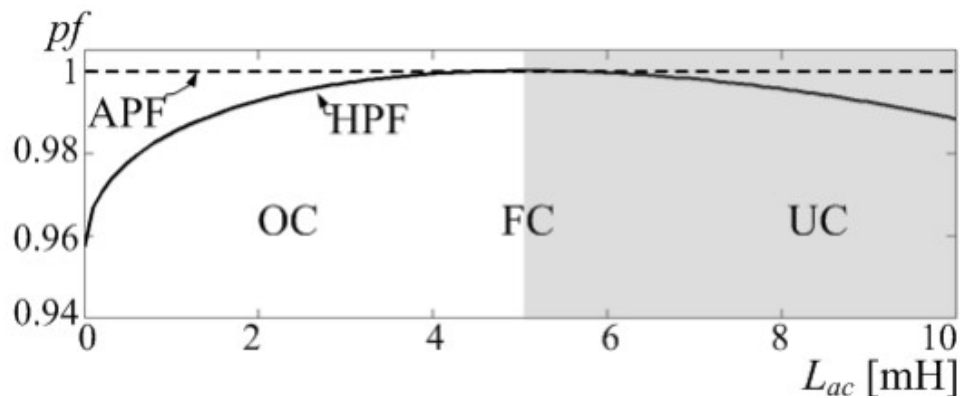
Рис. 2.19. Графіки залежності параметрів фільтрів від номеру вищої гармоніки:

- а) залежність повної потужності S активного фільтру від n ;
- б) залежність повної потужності S гібридного фільтру від n ;
- в) залежність THD від n ;

На рис. 2.20 показані графіки залежностей характеристик активного та гібридного фільтру від індуктивності L_{ac} діодного випрямляча:



а)



б)

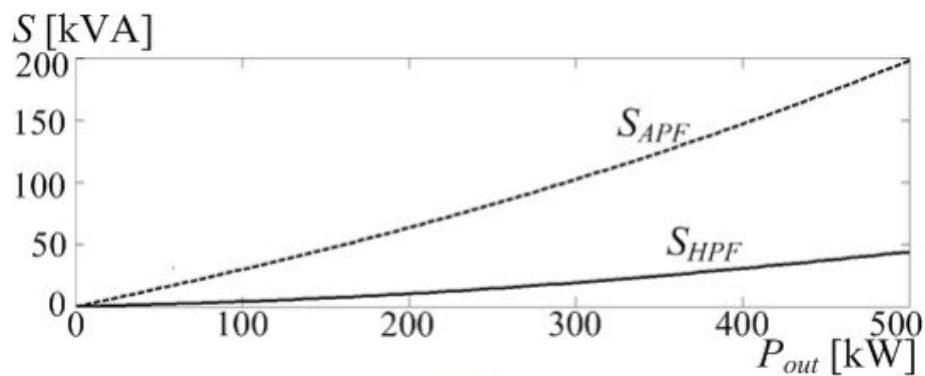
Рис. 2.20. Графіки залежностей характеристик активного та гібридного фільтру від індуктивності L_{ac} діодного випрямляча:

- а) графіки залежності повної потужності S від L_{ac} ;
- б) графіки залежності коефіцієнта потужності від L_{ac} ;

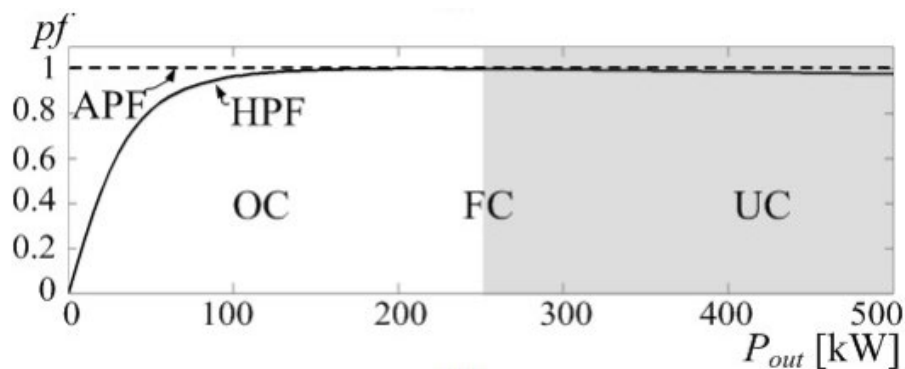
Як можна побачити з цих графіків, збільшення значення L_{ac} призводить до значного згладжування гармонійних складових струмів, які знижують стрибки напруги зі сторони змінного струму інвертора фільтрів. В зв'язку з цим номінальні значення потужності активного та гібридного фільтру знижуються із зростанням індуктивності L_{ac} в діапазоні низьких значень індуктивності. Проте, як показано на рис. 2.20 б), при цьому зростає реактивна потужність навантаження..

Оскільки інвертор активного фільтру повинен здійснювати компенсацію реактивної потужності навантаження, то значення S_{APF} спочатку знижується через зниження відношення diL/dt , а потім зростає зі зростанням індуктивності L_{ac} , що спричинене збільшенням реактивної потужності електричного навантаження, яку необхідно компенсувати. На відміну від активного фільтру, повна потужність гібридного фільтру S_{HPF} продовжує знижуватись зі зниженням індуктивності L_{ac} , що викликане відсутністю компенсації реактивної потужності гібридним фільтром.

На рис. 2.21 наведені графіки залежностей повної потужності фільтрів та коефіцієнта потужності від вихідної потужності фільтрів P_{out} .



а)



б)

Рис. 2.21. Графіки залежностей параметрів активного і гібридного фільтру від вихідної потужності:

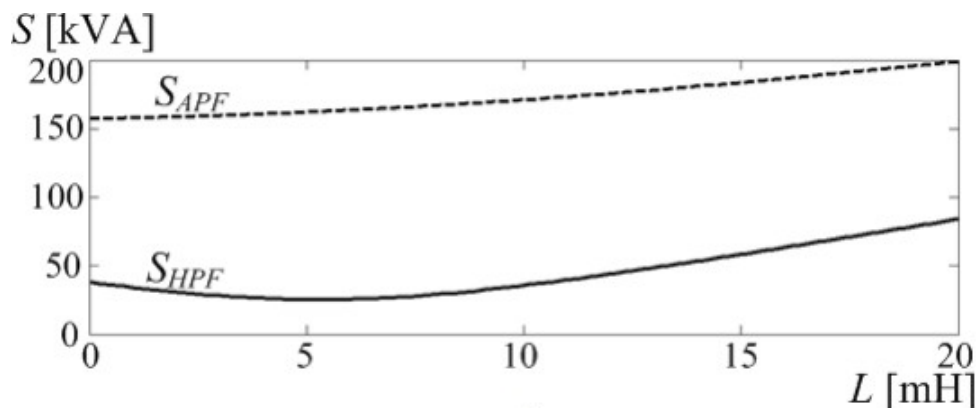
- а) графіки залежності потужностей S від P_{out} ;
- б) графіки залежності коефіцієнта потужності від P_{out} ;

Як можна побачити з рис. 2.22, номінальні потужності інверторів як активного так і гібридного фільтрів зростають зі зростанням потужності P_{out} , що викликане зростанням потужності вищих гармонік, які підлягають компенсації. Проте, інвертор активного фільтру також забезпечує компенсацію реактивної потужності, що спричиняє більший приріст повної потужності S_{APF} порівняно з приростом потужності S_{HPF} . Збільшення потужності P_{out} переміщує робочу область гібридного фільтру з області перекомпенсації (ОС) в область недокомпенсації (УС). Слід відмітити, що зміна потужності P_{out} також суттєво впливає на значення коефіцієнта потужності мережі з гібридним фільтром. Це пояснюється тим, що зростання потужності P_{out} спричиняє збільшення значення реактивної потужності навантаження, а коефіцієнт потужності пасивної частини гібридного фільтру при цьому залишається незмінним.

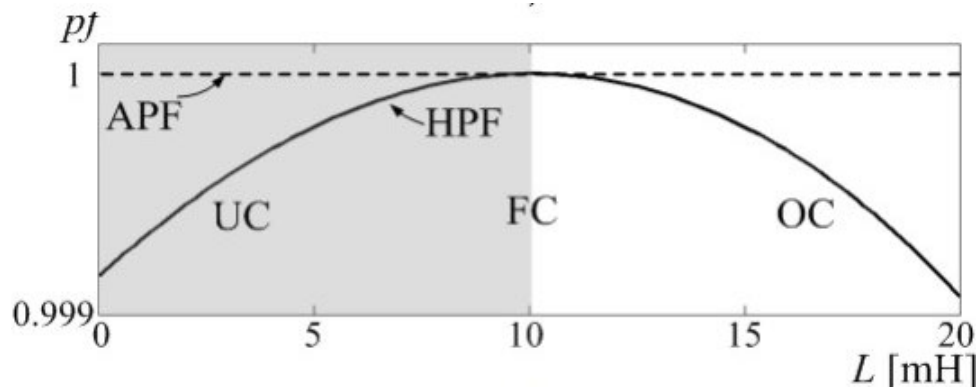
На рис. 2.22 наведено графіки залежності повної потужності активного та гібридного фільтрів (а) та коефіцієнту потужності (б) від індуктивності L .

Слід відмітити, що потужність активного фільтру S_{APF} збільшується зі збільшенням індуктивності L за рахунок збільшення значення напруги V^{APF} . При цьому потужність гібридного фільтру S_{HPF} спочатку дещо зменшується, а потім зростає зі зростанням індуктивності L через зміну реактивного опору пасивної частини активного фільтру на частотах вищих гармонік. Збільшення індуктивності L переміщує робочу точку гібридного фільтру з області недокомпенсації (УС) в область перекомпенсації.

Індуктивність L несуттєво впливає на значення коефіцієнту потужності мережі з гібридним фільтром.



а)



б)

Рис. 2.22. Графіки залежності повної потужності активного та гібридного фільтрів (а) та коефіцієнту потужності (б) від індуктивності L .

Висновки до розділу

1. Активні фільтри є ефективним технічним рішенням для поліпшення якості електроенергії в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями. Вони дозволяють компенсувати реактивну потужність та придушувати вищі гармоніки струму.

2. Основними компонентами активних фільтрів є регульований ШІМ-перетворювач, система керування на цифровому сигнальному процесорі та вхідний LC-фільтр для очищення високочастотної складової напруги перетворювача.

3. Перспективним є застосування активних фільтрів в розподільчих мережах для демпфірування резонансних явищ та поширення гармонік..

Активний фільтр не лише очищує струм від гармонік, але й коригує коефіцієнт потужності навантаження до оптимального значення. Це дозволяє підвищити ефективність та якість електропостачання споживачів у мережі.

4. САК зі зворотним зв'язком в гібридних фільтрах сприяє ефективній фільтрації гармонік та попереджає перевантаження і неоптимальний режим роботи.

5. Активні фільтри мають кращу регулювальну здатність і забезпечують високий коефіцієнт потужності, гібридні є більш економними завдяки наявності пасивних елементів.

6. Застосування активних і гібридних фільтрів є ефективним способом покращення якості електропостачання за наявності нелінійних споживачів в мережі. Вибір конкретного типу фільтра залежить від вимог та обмежень конкретної задачі.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ГІБРИДНИМ ФІЛЬТРОМ ГАРМОНІК

3.1 Постановка задачі моделювання режимів роботи системи електропостачання з гібридним фільтром гармонік

Останнім часом у складі струму систем електроживлення промислових підприємств помічається тенденція до зростання частки вищих гармонік. Це зумовлено тим, що електрообладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками стає все потужнішим.

Детальніше, сучасні технології вимагають застосування пристроїв, які спотворюють форму струму - як-от випрямлячі, інвертори, дугові печі тощо. Відповідно зростає і частка спотворень, або гармонік, у загальному струмі.

Це може негативно впливати на роботу іншого обладнання через додаткові втрати, виникнення резонансних явищ, помилкові спрацьовування захистів. Тому питання фільтрації вищих гармонік та підвищення якості електроенергії набуває все більшої актуальності.

На рис. 3.1 наведена принципова схема однієї секції шин підстанції напругою 110/10 кВ з різними джерелами реактивної потужності і фільтрами вищих гармонік. Зазвичай, коефіцієнт реактивної потужності системи електропостачання підприємства без застосування спеціальних компенсуючих пристроїв (його ще називають природним коефіцієнтом реактивної потужності) рідко коли відповідає вимогам, що висуваються в нормативних документах.

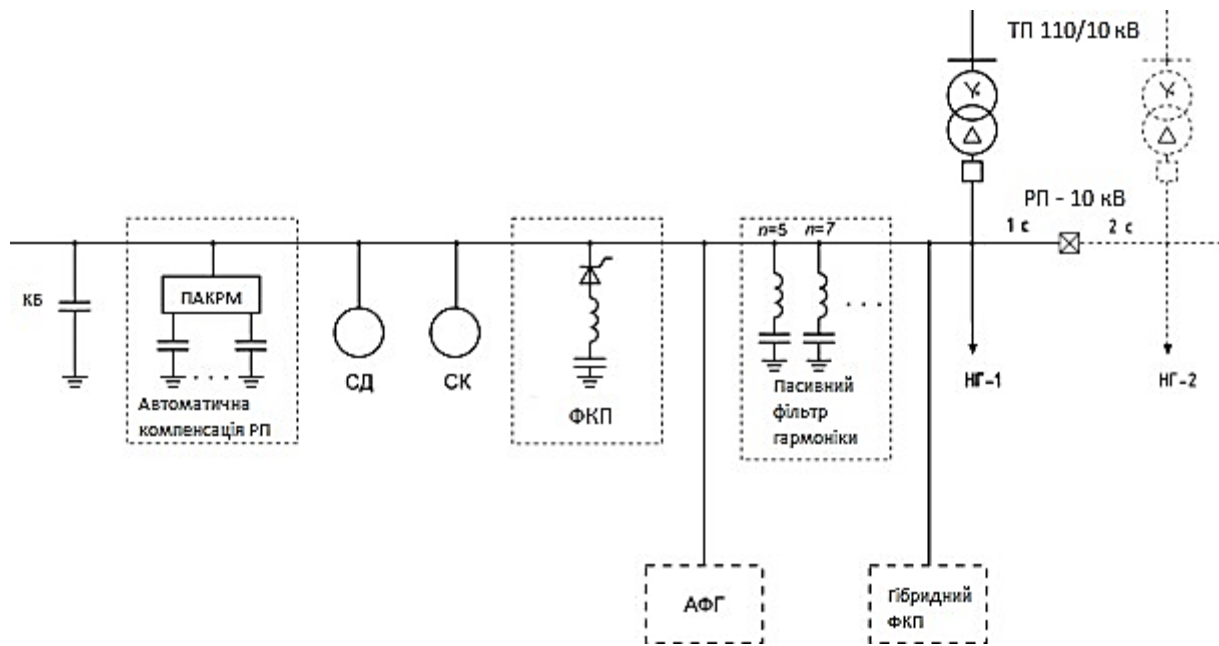


Рис. 3.1 Схема підстанції напругою 110/10 кВ з різними джерелами реактивної потужності і силовими фільтрами вищих гармонік

Компенсація реактивної потужності в системі електропостачання може бути здійснена різними засобами:

- синхронними двигунами в разі їх наявності на шинах 10 кВ;
- у разі відносно невеликого значення реактивної потужності можливе використання батарей статичних конденсаторів;
- у випадку, коли електричне навантаження має досить нестабільний графік реактивної потужності, то доцільним застосування пристроїв автоматичної компенсації;
- у разі необхідності компенсації значного обсягу реактивної потужності доцільно застосовувати синхронні компенсатори.

В складі електричного навантаження НГ-1 є як лінійне, так і значна частка нелінійного навантаження. Це зумовлює появу в даній системі електропостачання вищих гармонік напруги та струму. З метою зменшення їх рівня зачасту використовуються пасивні фільтри гармонік (фільтрокомпенсуючі пристрої).

Головними перевагами цих пристроїв є їх відносна простота та економічна доцільність. Пасивні фільтри є багатофункціональними пристроями, які одночасно зі зниженням рівня вищих гармонік здійснюють компенсацію реактивної потужності та регулювання напруги. Їх головний недолік – це ймовірність появи в електричній мережі резонансних явищ а також неможливість фільтрування вищих гармонік від різкозмінних нелінійних навантажень.

Як зазначалось в попередніх розділах, найбільш досконалим засобом зниження рівнів вищих гармонік є активний фільтр. Проте головним недоліком цього пристрою є те, що його встановлена потужність співрозмірна з потужністю навантаження, що спричиняє його значну дороговизну. Компромісним рішенням між активним та пасивним фільтром є гібридний фільтр, який поєднав в собі всі їх переваги (а також деякі недоліки).

3.2 Розрахунок параметрів пасивної частини гібридного фільтра гармонік

Існують різні способи розрахунку силової частини пасивного фільтра гармонік. Найпростішим вважається метод послідовних наближень, метою якого є отримання потрібних частотних властивостей окремих ланок фільтра та величини реактивної потужності, що генерується ним.

При цьому пасивний фільтр розглядається у вигляді чотиріполюсника, на входах якого присутні джерела гармонік. Для опису фільтра використовують рівняння з гібридними параметрами. На наступному етапі здійснюють синтез цього чотиріполюсника та нормування параметрів фільтра відносно частоти основної гармоніки.

Інші методики можуть базуватися на використанні матриць розсіяння або проведенні оптимізації за певними критеріями. Вибір конкретного підходу залежить від поставлених вимог, складності схеми фільтра тощо. Але в будь-

якому випадку правильний розрахунок дозволяє отримати ефективний пристрій для фільтрації вищих гармонік

Розглянемо схему вузькосмугового пасивного фільтра вищих гармонік, яка зображена на рис. 3.2.

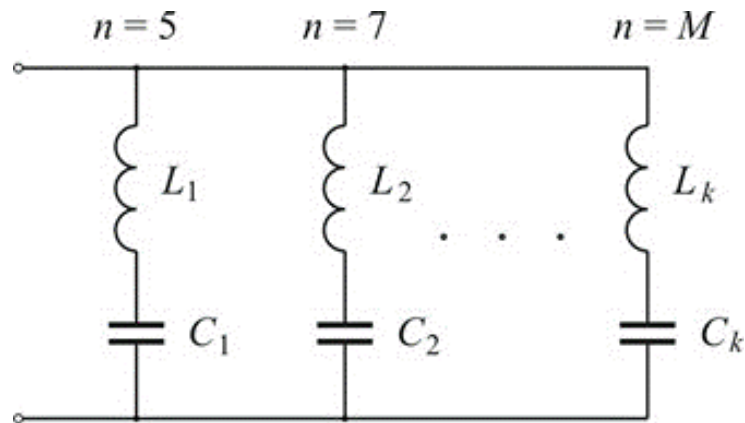


Рис. 3.2 Схема вузькосмугового пасивного фільтра вищих гармонік

Даний фільтр складається зі з'єднаних паралельно L - C ланок (2-га канонічна схема Фостера).

Кожна з цих L - C ланок розрахована на зниження рівня певної вищої гармоніки канонічного ряду (порядку $n < 20$). Загальний результуючий опір кожної i -ї ланки фільтру для резонансної гармоніки з порядковим номером

$$n_p = \frac{f_F}{f_0}$$

близький до нульового значення:

$$x_{L(n)} - x_{C(n)} \approx 0,$$

На резонансній частоті фільтру справедлива наступна рівність:

$$x_{\text{л}} = x_L - x_C \quad (3.1)$$

де x_L, x_C – це реактивні опори реактора та конденсатора для 1-ї (основної) гармоніки.

Значення реактивних опорів x_L і x_C визначаються через резонансні опори:

$$x_L = \frac{x_{L(n)}}{n_p}, \quad (3.2)$$

$$x_C = n_p x_{L(n)} \quad (3.3)$$

Реактивний опір $x_{\text{л}}$ визначається наступним чином:

$$x_{\text{л}} = \frac{x_{L(n)}}{n_p - n_p x_{L(n)}}$$

Враховуючи вираз (3.1) маємо:

$$x_{\text{л}} = \frac{x_{C(n)}}{n_p - n_p x_{L(n)}} \quad (3.4)$$

Реактивний опір $x_{\text{л}}$ розраховується за наступною формулою:

$$x_{\text{л}} = \frac{1 - n_p^2}{n_p^2}$$

З урахуванням того, що $n_p > 1$ можна дійти висновку, що реактивний опір ланки носить ємнісний характер ($x_{\text{л}} < 0$), а співвідношення між цими

опорами задовольняє умові $x_L < x_C$.

Якщо знехтувати активними опорами реактора та конденсатора, то вектор струму ланки випереджає напругу, що прикладена до неї на 90° . Якщо співставити вектор напруги з дійсною віссю (+1) комплексної площини, то напрямок вектору струму буде співпадати з уявною віссю (+j). Зважаючи на це буде справедливою наступна рівність:

$$jI_L = \frac{U_L}{jx_L}$$

Якщо врахувати опори елементів ланки, то цей вираз набуває вигляду:

$$jI_L = \frac{U_L}{jx_L - jx_C}$$

Значення напруги, прикладеної до ланки згідно другого закону Кірхгофа розраховується за виразом:

$$U_L = jI_L jx_L - jI_L jx_C,$$

$$U_L = U_C - U_L$$

Отже, значення напруги на конденсаторі ланки фільтру залежить від величини спаду напруги на реакторі фільтра:

$$U_C = U_L + U_L$$

Проаналізувавши отриманий вираз можна дійти висновку, що значення

напруги на ємнісному елементі пасивного фільтра більше за значення прикладеної напруги на величину спаду напруги на реакторі фільтру. Як наслідок, ємнісний елемент у складі силового фільтру генерує більше реактивної потужності, ніж окремо від нього:

$$Q_C = \frac{U_C^2}{x_C} = \frac{(U_L + U_L)^2}{x_C}$$

Величину реактивної потужності ланки можна знайти за наступним виразом:

$$Q_C = \frac{U_{\text{ном}}^2}{x_C}$$

З урахуванням формули (3.4) величина реактивної потужності ланки визначається за виразом:

$$Q_{\text{зв}} = \frac{U_{\text{ном мережі}}^2}{x_C} \frac{n_p^2}{(n_p^2 - 1)}$$

що свідчить про збільшення рівня генерованої реактивної потужності ланкою у порівнянні з окремим ємнісним елементом.

Значення резонансної частоти L - C контуру визначається за формулою:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (3.5)$$

Таким чином можна дійти висновку, значення резонансної частоти

ланки фільтра залишиться незмінним, якщо збільшити або зменшити ємність конденсатора та відповідно зменшити або збільшити величину індуктивності реактора фільтру в K разів. Ця залежність резонансної частоти фільтру від параметрів ланки фільтру надає змогу визначити значення індуктивності L_i та ємності C_i , які забезпечують або необхідне значення генерованої реактивної потужності, або мінімальне значення вартості силового фільтру вищих гармонік.

Генерована фільтром реактивна потужність визначається за наступною формулою:

$$Q_{\Phi} = \sum_{i=1}^m \frac{U_{\text{ном}}^2}{\frac{1}{2\pi f_0 C_i} - 2\pi f_0 L_i} \quad (3.6)$$

де m – це кількість ланок фільтру вищих гармонік.

Розрахунок значень параметрів пасивного фільтра вищих найбільш доцільно виконувати у два кроки.

На першому кроці визначаються величини індуктивностей $L_{i\text{поч}}$ та ємностей $C_{i\text{поч}}$ кожної з ланок ланки з урахуванням значень резонансних гармонік n_i . В цьому випадку як вихідні параметри приймаються довільні значення індуктивності $L_{i\text{поч}}$ (або ємності $C_{i\text{поч}}$) ланок фільтру. Слід врахувати, що є можливість задати певні співвідношення між значеннями індуктивностей (ємностей) окремих ланок силового фільтра гармонік. Значення ємності кожної з ланок за відомих значень індуктивностей визначаються за виразом:

$$C_{i\text{поч}} = \frac{1}{L_{i\text{поч}}(2\pi f_{pi})^2}$$

Якщо у якості вихідного параметру прийнято значення ємності ланки

фільтру, то відповідні значення індуктивності ланок розраховуються наступним чином:

$$L_{i\text{поч}} = \frac{1}{C_{i\text{поч}}(2\pi f_{pi})^2}$$

На другому кроці проводиться уточнення одержаних значень індуктивностей та ємностей ланок фільтру з врахуванням необхідної реактивної потужності силового фільтра вищих гармонік:

- проводиться розрахунок значення генерованої реактивної потужності фільтра $Q_{\text{фпоч}}$ з розрахованими на першому кроці значеннями $L_{i\text{поч}}$ та $C_{i\text{поч}}$;
- розраховується відношення K_Q необхідного значення величини реактивної потужності силового фільтра $Q_{\text{ф}}$ до отриманого на 1-му кроці значення реактивної потужності $Q_{\text{фпоч}}$:

$$K_Q = \frac{Q_{\text{ф}}}{Q_{\text{фпоч}}}$$

- кінцеві значення параметрів силового фільтра вищих гармонік визначаються з урахуванням співвідношення (3.5) постійності резонансної частоти ланки фільтру у випадку пропорційного змінення значень індуктивності і ємності:

$$\begin{cases} L_i = \frac{L_{i\text{поч}}}{K_Q} \\ C_i = K_Q C_{i\text{поч}} \end{cases}$$

- згідно виразу (3.6) розраховується величина реактивної потужності, яка генерується фільтром вищих гармонік.

3.3 Комп'ютерне імітаційне моделювання системи електропостачання з гібридним фільтром вищих гармонік

У цій роботі для моделювання обрано програмне середовище MatLab. Воно являє собою потужний інструмент для математичних обчислень, оснований на матричному представленні даних.

MatLab містить велику кількість вбудованих функцій для обробки масивів, розв'язання рівнянь, побудови графіків, а також засоби для розробки користувацьких алгоритмів і програм. Це робить його зручним для різноманітних інженерних та наукових задач - від статистичного аналізу до проектування систем керування.

Окрім вбудованих функцій, MatLab дозволяє підключати сторонні бібліотеки для розширення можливостей. Також є інструменти для створення графічного інтерфейсу та розгортання розроблених моделей і додатків. Загалом, MatLab по праву вважається одним з лідерів у галузі технічних обчислень і є чудовим вибором для моделювання різноманітних систем.

На рис. 3.2 наведена Simulink-модель системи електропостачання з гібридним фільтром вищих гармонік та нелінійним навантаженням (мостовим перетворювачем)

Для оцінки роботи силового активного фільтра використано наступні показники: осцилограми струму електричної мережі, струму ел. навантаження, струму самого активного фільтра; активна й реактивна потужності навантаження, активного фільтра і мережі; спектр фазного струму.

Зазначені параметри проаналізовано для всіх задіяних елементів: навантаження, фільтра та мережі живлення. Осцилограми дають наочне уявлення про форми струмів та напруг. Потужності характеризують енергообмін між компонентами схеми. А частотний склад струму відображає наявність гармонік.

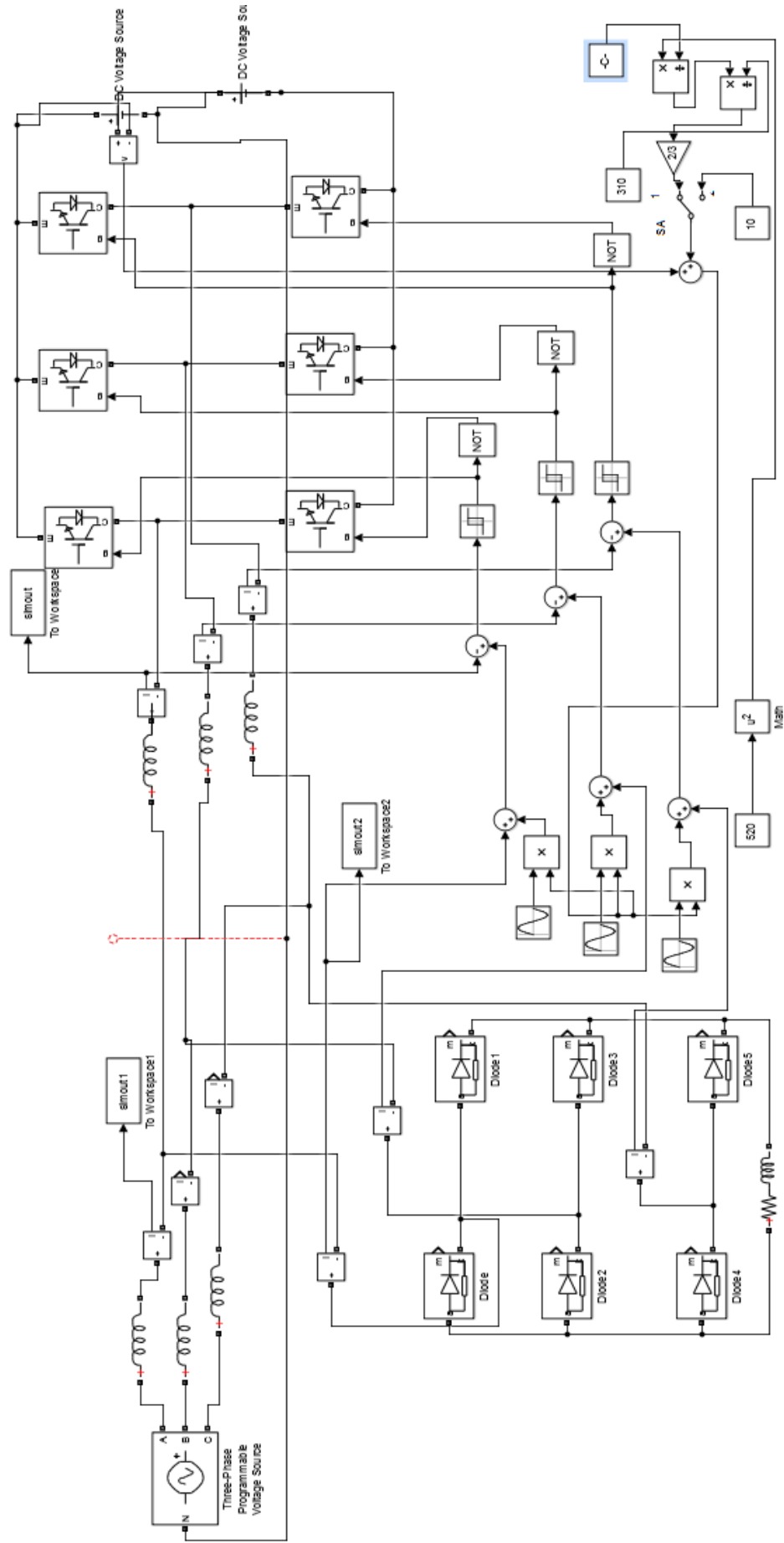


Рис. 3.3 – Simulink-модель системи електропостачання з гібридним фільтром вищих гармонік та нелінійним навантаженням (мостовим перетворювачем)

Такий комплексний аналіз дозволяє всебічно оцінити якість роботи активного фільтра по відношенню як до мережі живлення, так і споживача. Наприклад, спотворення синусоїдальної форми та наявні гармоніки у струмі навантаження свідчатимуть про недостатню ефективність фільтрації. А їх відсутність при ненульових величинах струму і потужності самого активного фільтра буде підтвердженням успішної роботи для компенсації перешкод.

На рис. 3.4 наведено осцилограму струму трифазного мостового перетворювача потужністю 30 кВт та його спектральний аналіз.

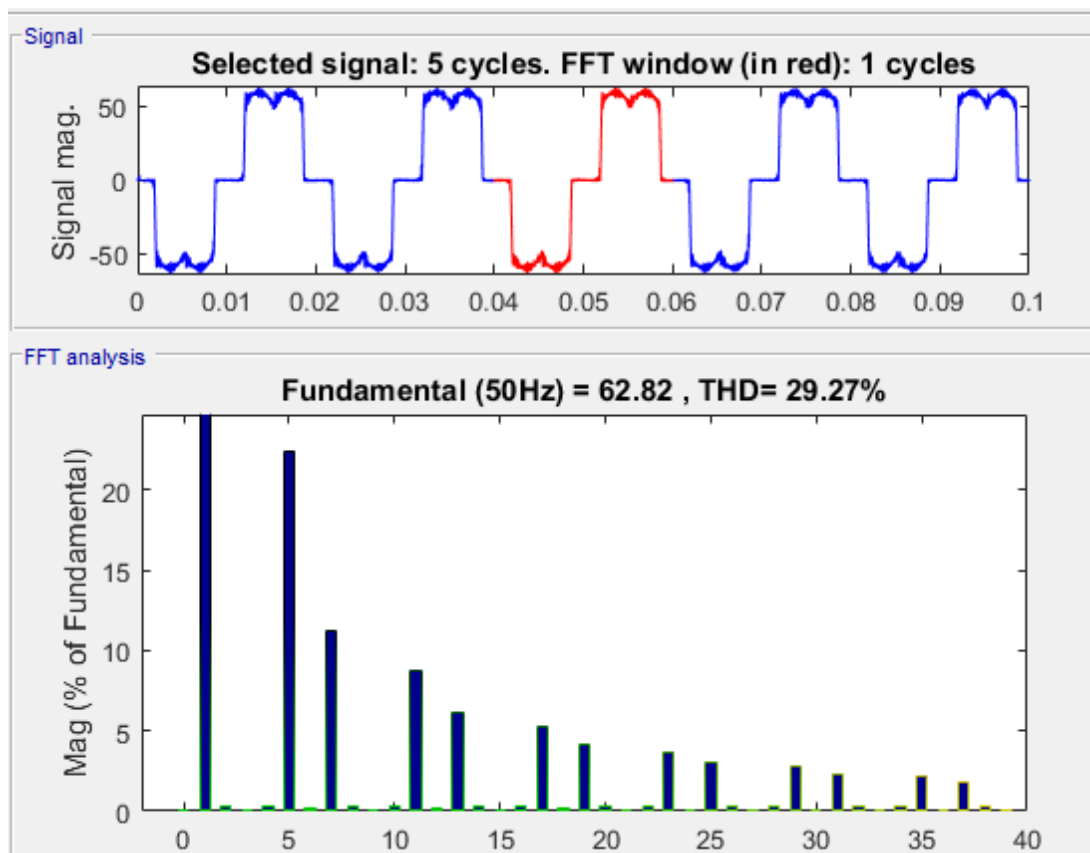


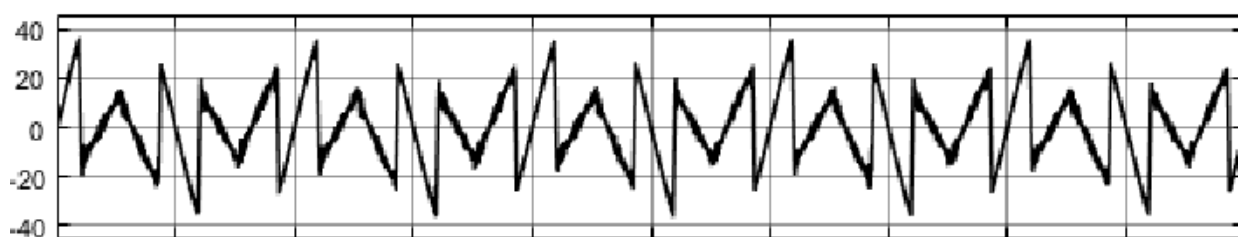
Рис. 3.4 Осцилограма струму вентиляного перетворювача та результати його спектрального аналізу

Як видно, при відсутності в мережі технічних засобів покращення якості електроенергії коефіцієнт гармонійних спотворень складає 29,3 %.

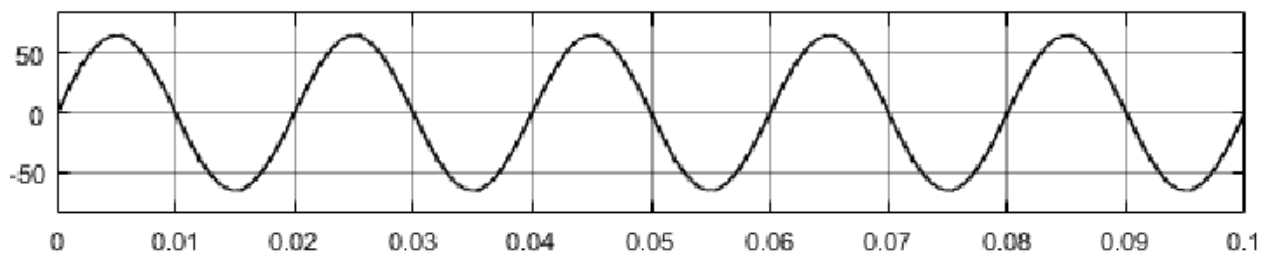
На рис. 3.5-3.6 наведені результати комп'ютерного моделювання у вигляді графіків струму та його спектрального аналізу.



а)



б)



в)

Рис. 3.5. Осцилограми струмів:

а) осцилограма струму навантаження (мостового перетворювача)

б) осцилограма струму, що генерується фільтром

в) осцилограма результуючого струму

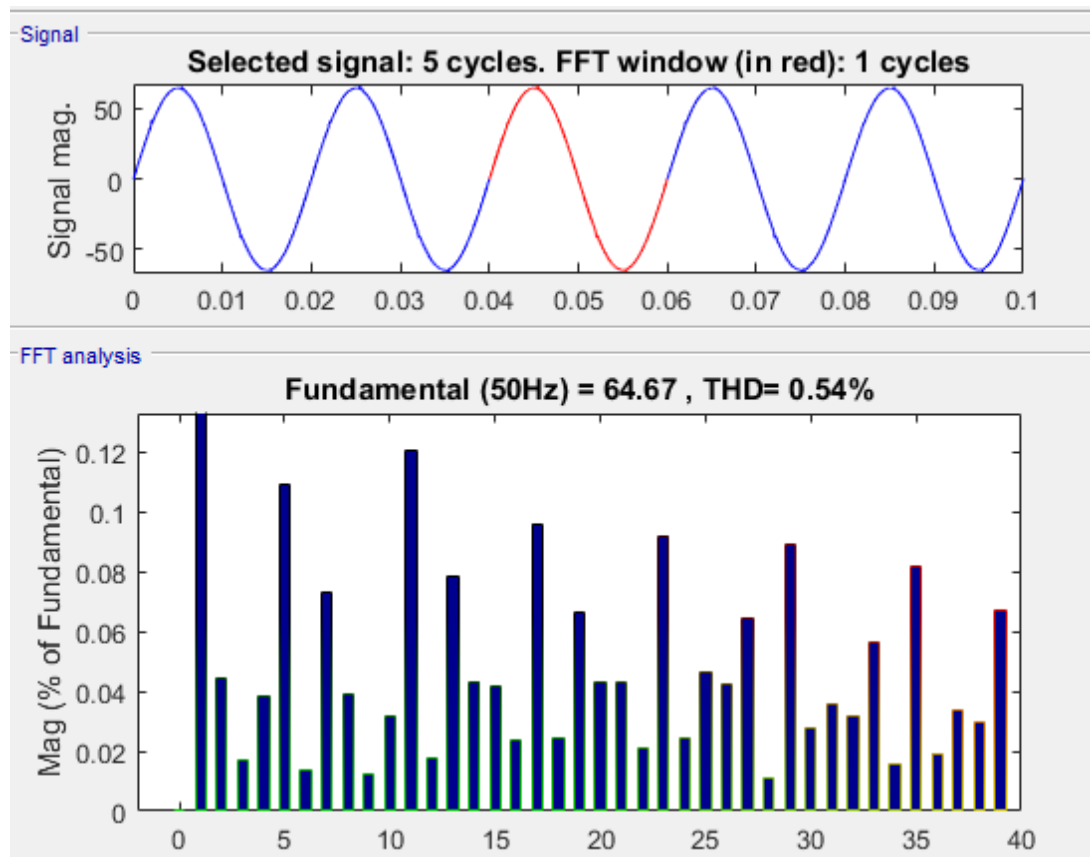


Рис. 3.6. Осцилограма та результати спектрального аналізу результуючого струму

Як видно з рис. 3.5 а, струм навантаження є значно спотворений. При цьому струм, що генерується фільтром містить в своєму спектрі ті ж самі вищі гармоніки, що і струм навантаження. Результуючий струм фільтру та навантаження є практично не спотвореним ($\text{THD} = 0,54\%$, рис. 2.6).

На рис. 3.7 наведено графік зміни активної та реактивної потужності мережі з фільтром.

Активна потужність електричної мережі рівна потужності навантаження, а значення реактивної потужності дорівнює нулю. Фільтр генерує реактивну потужність, яка знаходиться в протифазі потужності навантаження.

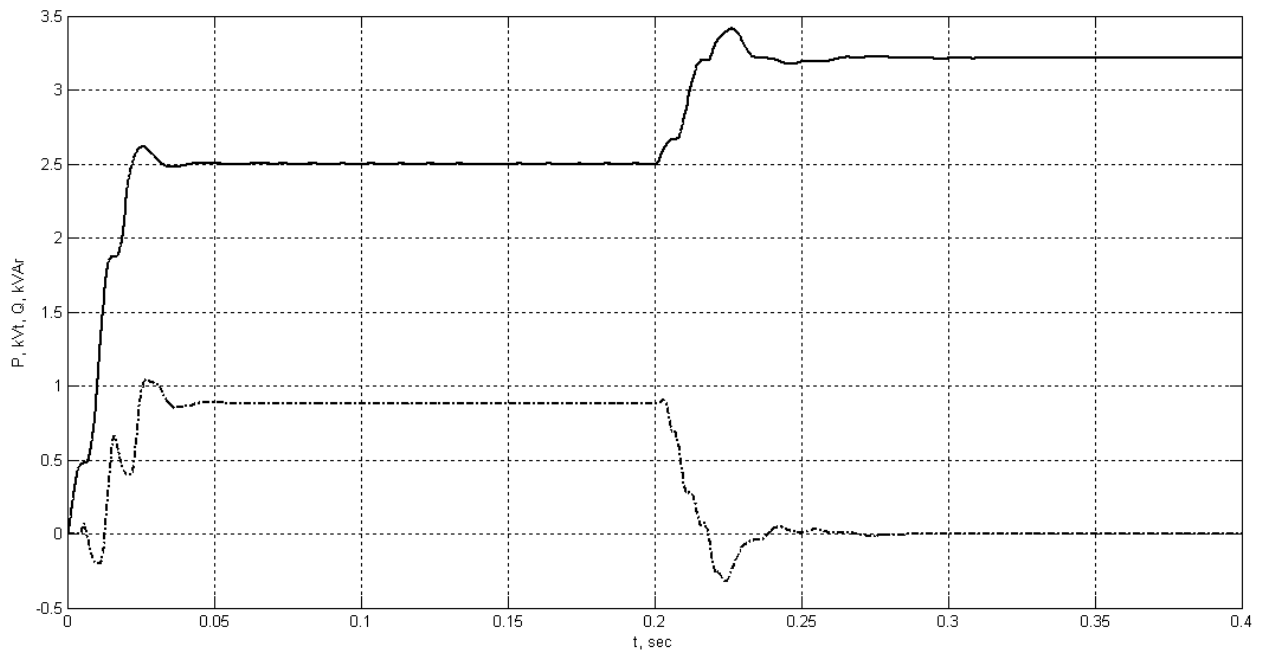


Рис. 3.7. Графік зміни сумарної активної та реактивної потужностей мережі з фільтром

Проведемо розрахунок пасивної частини фільтру.

Спектральний аналіз струму навантаження показав, що серед вищих гармонік найбільшу амплітуду мають п'ята та сьома гармоніки. Тому саме для цих гармонік проведемо розрахунок ланок пасивного фільтру, з метою зменшення встановленої потужності активної частини гібридного фільтру.

В таблиці 3.1 приведені значення параметрів пасивної частини фільтра з 2-ма L-C ланками.

Таблиця 3.1 Результати розрахунку пасивної частини фільтру для 5-ї та 7-ї гармонік

№ з/п	Параметр	5-та гармоніка	7-ма гармоніка
1	Індуктивність L , мГн	1,83	5,54
2	Ємність C , мкФ	50,0	20,0
3	Реактивна потужність, Q , квар	3,50	1,50

Величина дефіциту реактивної потужності на одну фазу в точці приєднання фільтра складає 5 квар.

В якості вихідного параметру було задано значення ємностей фільтру (50 мкФ для фільтру п'ятої гармоніки, та 20 мкФ для фільтру сьомої гармоніки). Значення індуктивностей ланок визначаються розрахунком.

$$L_{5\text{поч}} = \frac{1}{C_{5\text{поч}}(2\pi f_{p5})^2} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 250)^2} = 8,11 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Величина генерованої фільтром реактивної потужності:

$$\begin{aligned} Q_{\phi 5\text{поч}} &= \frac{U_{\text{ном}}^2}{\frac{1}{2\pi f_o C_{5\text{поч}}} - 2\pi f_o L_{5\text{поч}}} = \\ &= \frac{220^2}{\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} - 8,11 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,792 \text{ кВар} \end{aligned}$$

Відношення K_Q необхідного значення реактивної потужності $Q_{\phi 5}$ до отриманого на 1-му кроці значення потужності $Q_{\phi 5\text{поч}}$:

$$K_{Q5} = \frac{Q_{\phi 5}}{Q_{\phi 5\text{поч}}} = \frac{3,5}{0,792} = 4,42$$

Значення індуктивності та ємності пасивної частини гібридного фільтру для 5-ї гармоніки складають:

$$\begin{cases} L_5 = \frac{L_{5\text{поч}}}{K_Q} = \frac{8,11 \cdot 10^{-3}}{4,42} = 1,835 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \\ C_5 = K_{Q5} C_{5\text{поч}} = 4,42 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 221 \text{ мкФ} \end{cases}$$

Аналогічним чином здійснюється розрахунок і для фільтру сьомої гармоніки:

$$L_{7\text{поч}} = \frac{1}{C_{7\text{поч}}(2\pi f_{p5})^2} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 350)^2} = 10,387 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$Q_{\phi 7\text{поч}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{\frac{1}{2\pi f_o C_{7\text{поч}}} - 2\pi f_o L_{7\text{поч}}} =$$

$$= \frac{220^2}{\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} - 10,387 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,801 \text{ кВар}$$

$$K_{Q7} = \frac{Q_{\phi 7}}{Q_{\phi 7\text{поч}}} = \frac{1,5}{0,801} = 1,873$$

$$\begin{cases} L_7 = \frac{L_{7\text{поч}}}{K_Q} = \frac{10,387 \cdot 10^{-3}}{1,873} = 5,546 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \\ C_7 = K_{Q7} C_{7\text{поч}} = 1,873 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 37,46 \text{ мкФ} \end{cases}$$

Як показали результати комп'ютерного моделювання, у випадку наявності пасивної частини фільтру струм через активну частину гібридного фільтру виявився на 21 % меншим, ніж без пасивної частини. Таким чином, застосування пасивної частини дає змогу знизити встановлену потужність активної частини гібридного фільтру, що значно впливає на його вартісні показники.

Висновки до розділу

1. У складі струму систем електропостачання спостерігається тенденція до зростання частки вищих гармонік у зв'язку із застосуванням потужних нелінійних навантажень. Це вимагає вжиття заходів із фільтрації гармонік та врахування їх при здійсненні заходів з компенсації реактивної потужності..

2. Для проектування ефективних пасивних фільтрів існують різні методики розрахунку, серед яких найбільш поширеним є метод послідовних наближень для досягнення бажаних характеристик фільтрів.

3. При моделюванні систем компенсації реактивної потужності та фільтрації вищих гармонік зручно використовувати спеціалізоване середовище MatLab з широкими можливостями для інженерних та наукових обчислень.

4. Для поліпшення якості споживаного струму та компенсації реактивної потужності використовувався гібридний паралельний активний фільтр.

5. Було проведено комп'ютерне імітаційне моделювання системи, що складається з мережі живлення, розробленого гібридного фільтра та нелінійного навантаження. Результати показали, що застосування запропонованого фільтра дає змогу повністю компенсувати реактивну потужність в мережі. Ефективність фільтрації гармонік підтверджується зниженням коефіцієнта гармонік (THD) струму з 30% до менше 1% після компенсації. Тобто запропонований гібридний активний фільтр дозволяє істотно покращити якість електроенергії в системі електропостачання за рахунок пригнічення вищих гармонік та коригування реактивної потужності.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Згідно з чинними положеннями, електромонтажні роботи класифікують на три групи залежно від рівня електробезпеки.

Перша група – це роботи після відімкнення живлення і унеможливлення контакту зі струмоведучими частинами. Такі заходи забезпечують максимальний захист працівників.

Друга група передбачає виконання робіт безпосередньо на струмоведучих елементах або поруч з ними. Це вимагає особливих запобіжних заходів та підвищеної уваги.

Найменш безпечною є третя група - роботи на неструмоведучих конструкціях під напругою. Хоча безпосередній контакт зі струмом тут відсутній, проте існує високий ризик ураження через можливість короткого замикання.

Якщо на об'єкті виконуються одночасно роботи з різними рівнями напруги, то загальна категорія визначається за найвищим показником. Наприклад, якщо паралельно здійснюються монтажні роботи на ділянках до 1000 В та понад 1000 В, то всі роботи автоматично відносяться до вищої категорії за рівнем напруги.

Така градація допомагає чітко окреслити можливі загрози на робочих місцях та визначити необхідні запобіжні заходи для забезпечення безпеки персоналу під час виконання електромонтажних та експлуатаційних робіт.

Виконання робіт безпосередньо на струмоведучих частинах або поруч із ними без відключення живлення допускається лише за підвищених вимог безпеки.

Згідно з регламентом, такі роботи мають здійснюватися щонайменше двома кваліфікованими фахівцями: керівник робіт повинен мати групу допуску не нижче IV, решта - не нижче III.

Крім того, обов'язковим є використання засобів захисту від ураження електричним струмом, зокрема ізолюючих костюмів, рукавичок, килимків тощо. У випадку робіт на неізольованих струмоведучих частинах додатково використовують спеціальне заземлення.

Якщо напруга в електроустановці перевищує 1000 В, перелічені запобіжні заходи є обов'язковими. Роботи здійснюють суворо за спеціальними інструкціями та технологічними картами, що визначають усі необхідні дії з безпеки.

Отже, виконання електромонтажних та ремонтних робіт на діючому обладнанні вимагає максимум уваги й дотримання всіх вимог техніки безпеки. Лише за таких умов можна уникнути травматизму працівників та забезпечити якісне виконання поставлених завдань.

Під час виконання робіт на струмоведучих частинах або поруч з ними в електроустановках напругою до 1000 В без відключення живлення необхідно вживати низку запобіжних заходів.

По-перше, слід ізолювати всі сусідні струмоведучі елементи, до яких є ризик випадкового дотику під час роботи. Це унеможливить замикання та ураження працівників.

По-друге, персонал зобов'язаний працювати виключно у діелектричному взутті, стоячи на спеціальних ізолювальних підставках або гумових килимках.

По-третє, допускається застосування лише інструменту з ізолювальними рукоятками та стрижнями. За відсутності такого спеціального інструменту обов'язкове використання діелектричних рукавичок.

Отже, дотримання перелічених вимог дозволить мінімізувати ризики ураження електричним струмом під час виконання робіт на діючому обладнанні напругою до 1000 В та забезпечити безпечні умови праці.

Використання ізолювальних засобів захисту під час робіт на струмоведучих частинах, що перебувають під напругою, вимагає дотримання певних правил.

По-перше, тримати ізолювальні елементи таких засобів необхідно строго за спеціальні рукави до обмежувального кільця. Це забезпечить надійну ізоляцію рук працівника.

По-друге, розміщувати ізолювальні частини потрібно так, щоб уникнути замикання між фазами або на землю.

По-третє, допускається використовувати лише абсолютно сухі та чисті ізолятори з неущкодженем захисним лаковим покриттям.

І вкрай важливо: за наявності будь-яких дефектів на ізолювальних елементах, користуватися ними суворо заборонено через високий ризик ураження електричним струмом.

Дотримання цих нескладних вимог зводить до мінімуму ймовірність травматизму під час робіт на діючих електроустановках.

Використання спеціальних електрозахисних засобів, зокрема ізолювальних штанг, кліщів чи вимірювальних приладів, дозволяє працівникам безпечно виконувати певні операції на невідключених струмоведучих частинах.

За умови дотримання відповідних норм та правил експлуатації, такі засоби забезпечують електроізоляцію та можливість наближення персоналу до струмоведучих елементів на регламентовану безпечну відстань. Її значення залежить від рівня напруги в електроустановці та типу застосовуваного обладнання і повинно вказуватись у супровідній документації.

Отже, використання належних електрозахисних засобів і дотримання безпечних відстаней дає можливість уникнути ураження електричним струмом під час виконання робіт в електроустановках, що перебувають під напругою.

На основі наведених матеріалів можна зробити такі узагальнені висновки:

1. Електромонтажні та ремонтні роботи в діючих електроустановках пов'язані з підвищеною небезпекою, тому їх виконання вимагає особливих запобіжних заходів.

2. Залежно від умов робіт, всі електротехнічні операції поділяють на три категорії за рівнем безпеки. Це дозволяє чітко визначити можливі ризики і необхідні засоби захисту.

3. Для запобігання травматизму під час робіт на діючих електроустановках існує низка обов'язкових вимог та правил, що регламентуються відповідними нормативними документами.

4. Особливо пильної уваги потребують роботи безпосередньо на струмоведучих частинах під напругою, адже вони пов'язані з максимальним ризиком ураження.

5. Дотримання всіх перелічених вище вимог дає змогу безпечно та ефективно здійснювати необхідні технічні операції в електроустановках та значно знизити вірогідність травматизму персоналу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Основною причиною виникнення вищих гармонік струму та напруги в системах електропостачання є широке застосування потужних нелінійних навантажень - вентиляльних перетворювачів, електроприводів, дугових печей тощо.

2. Наявність гармонік призводить до додаткових втрат потужності, перегріву обладнання, збоїв в роботі чутливих пристроїв, похибок обліку електроенергії, скорочення терміну служби ізоляції та загалом зниження надійності системи електропостачання.

3. Вплив гармонік на мережу в цілому значно сильніший, ніж на окремі нелінійні навантаження, що їх породжують. Зокрема, виникає ефект поширення спотвореної напруги на значні відстані від джерела гармонік.

4. Існує нагальна потреба в розробці ефективних технічних рішень з обмеження впливу вищих гармонік та підвищення якості електропостачання в умовах зростання частки нелінійних навантажень.

5. Активні фільтри є ефективним технічним рішенням для поліпшення якості електроенергії в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями. Вони дозволяють компенсувати реактивну потужність та придушувати вищі гармоніки струму.

6. Основними компонентами активних фільтрів є регульований ШІМ-перетворювач, система керування на цифровому сигнальному процесорі та вхідний LC-фільтр для очищення високочастотної складової напруги перетворювача.

7. Перспективним є застосування активних фільтрів в розподільчих мережах для демпфірування резонансних явищ та поширення гармонік.. Активний фільтр не лише очищує струм від гармонік, але й коригує коефіцієнт потужності навантаження до оптимального значення. Це дозволяє підвищити ефективність та якість електропостачання споживачів у мережі.

8. САК зі зворотним зв'язком в гібридних фільтрах сприяє ефективній фільтрації гармонік та попереджає перевантаження і неоптимальний режим роботи.

9. Активні фільтри мають кращу регульовальну здатність і забезпечують високий коефіцієнт потужності, гібридні є більш економними завдяки наявності пасивних елементів.

10. Застосування активних і гібридних фільтрів є ефективним способом покращення якості електропостачання за наявності нелінійних споживачів в мережі. Вибір конкретного типу фільтра залежить від вимог та обмежень конкретної задачі.

11. У складі струму систем електропостачання спостерігається тенденція до зростання частки вищих гармонік у зв'язку із застосуванням потужних нелінійних навантажень. Це вимагає вжиття заходів із фільтрації гармонік та врахування їх при здійсненні заходів з компенсації реактивної потужності..

12. Для проектування ефективних пасивних фільтрів існують різні методики розрахунку, серед яких найбільш поширеним є метод послідовних наближень для досягнення бажаних характеристик фільтрів.

13. При моделюванні систем компенсації реактивної потужності та фільтрації вищих гармонік зручно використовувати спеціалізоване середовище MatLab з широкими можливостями для інженерних та наукових обчислень.

14. Для поліпшення якості споживаного струму та компенсації реактивної потужності використовувався гібридний паралельний активний фільтр.

15. Було проведено комп'ютерне імітаційне моделювання системи, що складається з мережі живлення, розробленого гібридного фільтра та нелінійного навантаження. Результати показали, що застосування запропонованого фільтра дає змогу повністю компенсувати реактивну

потужність в мережі. Ефективність фільтрації гармонік підтверджується зниженням коефіцієнта гармонік (THD) струму з 30% до менше 1% після компенсації. Тобто запропонований гібридний активний фільтр дозволяє істотно покращити якість електроенергії в системі електропостачання за рахунок пригнічення вищих гармонік та коригування реактивної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / [П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017 - 48 с.
4. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.
5. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
6. Бурбело М.Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків / Бурбело М.Й. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 148 с
7. Juha Turunen Series active power filter in power conditioning: PhD thesis / Juha Turunen, Tampere. – 2009
8. E. B. Makram, E. V. Subramaniam, A. A. Girgis, and R. Catoe, "Harmonic filter design using actual recored data," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29,

no. 6, pp. 1176-1183, Nov./Dec. 1993.

9. H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Узагальнена теорія миттєвої реактивної потужності в трифазних колах", Conf. Rec. IEEE- IPEC, 1983 1983, с. 1375-1386.

10. "Миттєві компенсатори реактивної потужності, що включають комутаційні пристрої без компонентів накопичувачів енергії", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630, May/Jun. 1984.

11. I. Takahashi and A. Nabae, "Universal power distortion compensator of line communicated thyristor convertor," in Conf. Rec. IEEE- IAS Annu. Meeting 1980, pp. 858-864.

12. S. Bhattacharya, P. T. Cheng, and D. M. Divan, "Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, no. 3, с. 732-747, may/june 1997

13. H. Akagi, "Стратегія керування та вибір місця розташування шунтуючого активного фільтра для демпфування поширення гармонік в системах розподілу електроенергії", IEEE Trans. Power Del., vol. 12, no. 1, pp. 354-363, Jan. 1997.

14. H. Akagi, H. Fujita, and K. Wada, "Шунтуючий активний фільтр на основі детектування напруги для гармонічного закінчення радіальної лінії розподілу електроенергії", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 35, no. 3, с. 638-645, May/June 1999.

15. P. Jintakosonwit, H. Fujita, and H. Akagi, "Control and performance of a fully digital-controlled shunt active filter for installation on power distribution system," IEEE Trans. Power Electron, vol. 17, no. 1, pp. 132-140, Jan. 2002.

16. P. Jintakosonwit, H. Akagi, H. Fujita, and S. Ogasawara, "Implementation and performance of automatic gain adjustment in a shunt active filter for harmonic damping throughout the power distribution system," IEEE Trans. Power Electron, vol. 17, no. 3, pp. 438-447, May 2002.

17. K. Wada, H. Fujita, and H. Akagi, "Розгляд шунтуючого активного

фільтра на основі виявлення напруги для встановлення на довгому розподільчому фідері", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 4, с. 1123-1130, July/August 2002.

18. P. Jintakosonwit, H. Fujita, H. Akagi, and S. Ogasawara, "Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout the power distribution system," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 2, pp. 556-564, Mar./ Apr. 2003.

19. S. Srianthumrong, H. Fujita, and H. Akagi, "Аналіз стабільності послідовного активного фільтра, інтегрованого з двосерійним діодним випрямлячем", IEEE Trans. Power Electron, vol. 17, no. 1, pp. 117-124, Jan. 2002.

20. F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "Новий підхід до компенсації жорсткості в енергосистемах - комбінована система шунтуючих пасивних і послідовних активних фільтрів", в конф. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting 1988, с. 874- 880.

21. "Компенсаційні характеристики комбінованої системи шунтуючих пасивних і послідовних активних фільтрів", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 1, pp. 144-152, Jan./Feb. 1993.

22. Н. Фудзіта та Х. Акагі, "Практичний підхід до компенсації гармонік в енергосистемах: Послідовне з'єднання пасивних і активних фільтрів", в конф. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting 1990, с. 1107-1112.

23. F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "Новий підхід до компенсації жорсткості в енергосистемах - комбінована система шунтуючих пасивних і послідовних активних фільтрів", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 26, no. 6, pp. 983-990, Nov./Dec. 1990

24. H. Fujita and H. Akagi, "Практичний підхід до компенсації гармонік в енергосистемах: Послідовне з'єднання пасивних і активних фільтрів", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, no. 6, pp. 1020-1025, Nov./Dec. 1991

25. Міхєєв Г.М., Атаманов М.М., Афанасьєва О.В., Дрей Н.М. Про

компенсацію реактивної потужності в системах електропостачання з косинусними конденсаторами // Електротехніка. 2019. № 4. ст. 32-41.

26. Chaladying S., Charlangsut A., Rugthaichareoncheep N. Вплив паралельного резонансу на поліпшення коефіцієнта потужності в енергосистемі з гармонійними спотвореннями. TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, 2015, ст. 1-5.

27. Понтт Дж., Родрігес Дж., Мартін Дж. С., Агуілера Р., Бернал Р., Ньюман П. Пом'якшення резонансу та динамічна поведінка систем із фільтрами гармоній для підвищення надійності гірничодобувних установок. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, 2006, ст. 1298-1302.