

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ШУНТОВОГО ФІЛЬТРА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-1
спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____ / Олексій ЯРОШЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Ганна МОСІЄНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

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

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

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

Харків – 2024 рік

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

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти
здобувачу вищої освіти Олексій ЯРОШЕНКО

1. Тема «ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ШУНТОВОГО ФІЛЬТРА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ»
затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації, характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
Вступ. Перелік умовних позначень. Аналіз впливу розміру 6-імпульсного тиристорно-мостового вхідного реактора на ефективність роботи шунтового активного силового фільтра: практичний приклад. Імітаційне дослідження. Висновки. Список посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал): Слайди презентації

6. Консультант:

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

7. Дата видачі завдання« 12 » _____ 10 _____ 2024__ р.

Керівник

(підпис)

Ганна МОСІЄНКО
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

Олексій ЯРОШЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Олексій ЯРОШЕНКО
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота виконана на 62 стор., містить 9 таблиці, 27 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 40 літературних посилань.

Об'єкт дослідження – ефективність роботи шунтового фільтра активної потужності.

Предмет дослідження – шунтовий фільтр активної потужності.

Мета роботи – ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ШУНТОВОГО ФІЛЬТРА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ.

Ступінь впровадження: проектні інститути.

Економічна ефективність значимість роботи: дана робота має високу значимість теоретичного й практичного рівня.

У роботі представлено практичне дослідження, в якому досліджено вплив розміру вхідного реактора з 6-імпульсним тиристорним мостом на продуктивність роботи шунтового фільтра активної потужності (SAPF). Метою використання SAPF в енергосистемі в більшості випадків є компенсація основної гармонічної реактивної потужності, пом'якшення гармонік і асиметрії. Ефективність роботи такого фільтра залежить не тільки від сконструйованої системи керування, інтерфейсного фільтра та параметрів конденсатора ланцюга постійного струму, але й від параметрів електричної системи, до якої він підключений. У цьому документі виконане моделювання та лабораторні експерименти показують, що для кращої ефективності роботи SAPF параметри вхідного реактора слід вибирати на основі не лише ефективного зменшення пульсацій перемикання інвертора або вимог системи керування, але й на основі параметри навантаження, наприклад параметри діодного або тиристорно-мостового вхідного реактора. Окрім експериментальних демонстрацій того, як розмір вхідного реактора впливає на ефективність роботи SAPF, новинками в цьому дослідженні є: сформульовані рекомендації щодо вибору параметрів вхідного реактора SAPF (SAPF є більш ефективним з точки зору гармонік, асиметрії та реактивної енергії). послаблення потужності, коли індуктивність його вхідного реактора (L –фільтр) менша, ніж індуктивність діода або тиристорно-мостовий вхідний реактор); запропонована система управління запропоновані вирази для обчислення індуктивності вхідного реактора SAPF, напруги постійного струму та конденсатора.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, ШУНТОВИЙ ФІЛЬТР, РЕЖИМИ РОБОТИ, ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ, ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА, ВИПРЯМЛЯЧІ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

ABSTRACT

The master's work is published on 62 pages, there are 9 tables, 27 figures that characterize the results of the research, and 40 literary essays are compiled.

The object of investigation is the effectiveness of the active pressure shunt filter.

The subject of investigation is an active pressure shunt filter.

Meta robots – INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF THE ACTIVE TENSION SHUNT FILTER IN DIFFERENT ROBOTI MODES.

Stage of advancement: design institutes.

Economical effectiveness and significance of the robot: this robot has a high significance on a theoretical and practical level.

The work presents a practical study that examines the input size of the input reactor with a 6-pulse thyristor bridge on the productivity of the shunt active pressure filter (SAPF). The purpose of reducing SAPF in the energy system in most surges is to compensate for the basic harmonic reactive tension, reduction of harmonics and asymmetry. The effectiveness of such a filter depends not only on the designed heating system, the interface filter and the parameters of the static flow capacitor, but also on the parameters of the electrical system, to which connections are made. In this document, simulations and laboratory experiments show that for the best efficiency of the SAPF operation, the parameters of the input reactor should be selected based on the effective change in the pulsation of the inverter or other system keruvannya, or based on the parameters of the vantage, for example, the parameters of the diode or thyristor-bridge input reactor. In addition to experimental demonstrations of how the size of the input reactor affects the efficiency of the SAPF robot, new additions include the formulation of recommendations for selecting the parameters of the SAPF input reactor (SAPF more efficient in terms of harmonics, asymmetry and reactive energy). weakening of pressure, if the inductance of the input reactor (L-filter) is lower, the lower inductance of the diode or the thyristor-bridge input reactor); A control system has been installed to calculate the inductance of the SAPF input reactor, the steady-state voltage of the capacitor.

KEY WORDS: ENERGY SAFETY, SHUNT FILTER, ROBOTIC MODES, EFFICIENCY OF ROBOTICS, TRANSFORMATIONAL TECHNOLOGY, VIRCULATORS, ELECTRICAL ENERGY POWER

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗМІРУ 6-ІМПУЛЬСНОГО ТИРИСТОРНО-МОСТОВОГО ВХІДНОГО РЕАКТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ШУНТОВОГО АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФІЛЬТРА: ПРАКТИЧНИЙ ПРИКЛАД	10
1.1. Вступ	10
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	14
РОЗДІЛ 2. ІМІТАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ	16
2.1. Презентація імітованої енергетичної системи	16
2.1.1. Опис запропонованої системи контролю	17
2.1.2. Запропоновані вирази для обчислення параметрів SAPF	19
2.2. Симуляційне припущення	22
2.3. Результати моделювання	24
2.4. Перші результати моделювання	27
2.5. Результати другого моделювання	38
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	46
РОЗДІЛ 3. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	47
3.1. Опис моделі лабораторії	47
3.2. Лабораторні результати	50
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	55
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	56
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	58

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- PF – коефіцієнт потужності
- SAPF – фільтр активної потужності
- ШИМ – широтно–імпульсна модуляція
- LPF – фільтр низьких частот
- BPF – смуговий фільтр
- PV – фотоелектрична система
- ЕМ – електрична мережа
- ММ – математичні моделі
- МКЕ – метод кінцевих елементів
- МКР – метод кінцевих різниць
- MPPT – точка максимальної потужності
- ПП – первинна підстанція
- ПС – вторинна підстанція
- РМ – розподільчі мережі
- РПН – регулювання напруги під напругою
- СНАУ – система нелінійних алгебраїчних рівнянь
- СЛАУ – система лінійних алгебраїчних рівнянь
- FEMM – Finite Element Method Magnetics
- ПДЕ – поновлювальні джерела енергії
- СЕП – система електропостачання
- ФЕУ – фотовольтаїчна електрична станція

ВСТУП

У цьому дослідженні представлено практичне дослідження, в якому досліджено вплив розміру вхідного реактора з 6-імпульсним тиристорним мостом на продуктивність роботи шунтового фільтра активної потужності (SAPF). Метою використання SAPF в енергосистемі в більшості випадків є компенсація основної гармонічної реактивної потужності, пом'якшення гармонік і асиметрії. Ефективність роботи такого фільтра залежить не тільки від сконструйованої системи керування, інтерфейсного фільтра та параметрів конденсатора ланцюга постійного струму, але й від параметрів електричної системи, до якої він підключений. Тому необхідно вивчити та знати енергосистему (сторону постачальника та споживача) перед її встановленням. Наприклад, в електричній системі з діодним або тиристорним мостом як навантаженням ефективність роботи SAPF може бути незадоволеною через високу швидкість зміни струму (di/dt) у точках комутаційних вирізів. У цьому документі виконане моделювання та лабораторні експерименти показують, що для кращої ефективності роботи SAPF параметри вхідного реактора слід вибирати на основі не лише ефективного зменшення пульсацій перемикавання інвертора або вимог системи керування, але й на основі параметри навантаження, наприклад параметри діодного або тиристорно-мостового вхідного реактора. Окрім експериментальних демонстрацій того, як розмір вхідного реактора впливає на ефективність роботи SAPF, новинками в цьому дослідженні є: сформульовані рекомендації щодо вибору параметрів вхідного реактора SAPF (SAPF є більш ефективним з точки зору гармонік, асиметрії та реактивної енергії). послаблення потужності, коли індуктивність його вхідного реактора (L –фільтр) менша, ніж індуктивність діода або тиристорно-мостовий вхідний реактор); запропонована система управління запропоновані вирази для обчислення індуктивності вхідного реактора SAPF, напруги постійного струму та конденсатора.

У зв'язку з цим метою цієї магістерської роботи є ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ШУНТОВОГО ФІЛЬТРА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ.

Об'єкт дослідження – ефективність роботи шунтового фільтра активної потужності.

Предмет дослідження – шунтовий фільтр активної потужності.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗМІРУ 6-ІМПУЛЬСНОГО ТИРИСТОРНО-МОСТОВОГО ВХІДНОГО РЕАКТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ШУНТОВОГО АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФІЛЬТРА: ПРАКТИЧНИЙ ПРИКЛАД

2.1. Вступ

Останніми роками збільшення кількості нелінійних пристроїв стало серйозною проблемою для електричної системи, оскільки вони споживають реактивну потужність і є джерелом збурень, таких як гармоніки, асиметрія, мерехтіння, падіння та здуття напруги, перехідні процеси тощо. Ці збурення можуть бути призводять до низької якості електроенергії та провокують багато проблем в електричній системі [1, 2]. Наприклад, реактивна потужність, якщо її не компенсувати, може спричинити нестабільність системи, підвищення напруги та струму, втрати потужності тощо [3, 4, 5]. Гармоніки, якщо їх не пом'якшити в енергосистемі, можуть спричинити збільшення дійсного середньоквадратичного значення напруги та струму, перевантаження, перегрів і навіть пошкодження елементів електричної системи (наприклад, трансформаторів, генераторів, кабелів, електродвигунів, конденсаторів тощо.) та інших підключених пристроїв, скорочення терміну служби пристроїв, порушення нормальної роботи пристроїв і збільшення експлуатаційних витрат, неточні вимірювання енергії та потужності, зниження коефіцієнта потужності (PF) тощо [6, 7, 8, 9, 10]. Дисбаланс напруги або струму може призвести до додаткових втрат потужності обладнання (наприклад, кабелів, асинхронного двигуна, перетворювачів силової електроніки, трансформаторів тощо) через температуру, збільшуючи експлуатаційні витрати та скорочуючи термін служби [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. Це також може бути джерелом нехарактерних гармонік, як зазначено в [19].

Щоб підтримувати якість електропостачання мережі відповідно до стандарту (наприклад, стандарту IEC61000–2–4 [20]), пропонується багато

рішень, включаючи пасивні фільтри гармонік (PHF), гібридні пасивні фільтри гармоній (HPHF), фільтри активної потужності (APF) і гібридні фільтри активної потужності (HAPF) [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27].

PHF зазвичай використовуються на практиці, оскільки вони недорогі, прості за структурою, легкі в обслуговуванні, дуже ефективні з точки зору зменшення індивідуальних гармонік і легко застосовні в низькій напрузі (LV), середній напрузі (MV) і високій напрузі (HV) системи [28, 29, 30, 31]. Але в порівнянні з шунтуючим фільтром активної потужності (SAPF) і HAPF, вони менш ефективні з точки зору поліпшення якості електроенергії, а їх ефективність роботи з точки зору пом'якшення гармонік залежить (у деяких випадках) від опору мережі [32, 33].

Рішення HAPF також використовуються на практиці [34, 35, 36, 37]. Вони являють собою комбінацію APF і PHF. Основною метою їх застосування є підвищення якості електроенергії при низьких експлуатаційних витратах. У поєднанні з PHF APF потребує меншої потужності, ніж коли він працює окремо [38, 39, 40, 41, 42]. У [43] було досліджено приклад HAPF з малою потужністю (напруга постійного струму інвертора близько 70 В).

APF організовані за кількома категоріями, і найпоширенішими є серійні APF (SAPF) і шунтові APF [44]. Серія APF застосовується для покращення напруги живлення, захисту чутливих навантажень від перешкод, таких як гармоніки напруги, коливання (наприклад, стабілізатор напруги), дисбаланс, падіння, здуття (наприклад, динамічне відновлення напруги (DVR)) тощо [45, 46].

Шунтові фільтри активної потужності (SAPF) існують у різних топологіях (наприклад, три та чотири дроти) і, незважаючи на їхні недоліки (висока вартість [47], складна система керування, труднощі у великомасштабному впровадженні [48, 49] тощо), вони все ще використовуються в промисловості, а також в системах низької та середньої напруги [50, 51]. Вони застосовуються в більшості випадків для компенсації основної гармоніки реактивної потужності, дисбалансу струму та пом'якшення

гармонік струму [52, 53, 54, 55, 56]. Принцип їхньої роботи полягає у вилученні збурень струму навантаження (наприклад, гармоніки струму, дисбаланс) за допомогою алгоритму системи керування та введенні їх протилежного знаку в РСС (точці загального зв'язку), щоб вони були скасововані збуреннями, що надходять від на стороні навантаження, що забезпечує хорошу якість електроенергії на стороні мережі.

Продуктивність SAPF базується на його здатності покращувати якість електроенергії на стороні мережі шляхом значного пом'якшення збурень, що надходять з боку навантаження. SAPF складається з трьох важливих частин: системи керування, конденсатора ланцюга постійного струму та інтерфейсного фільтра на його вході. Щоб підвищити ефективність роботи SAPF, багато досліджень у літературі зосереджені на вдосконаленні цих трьох частин і пропонуються нові рішення. Щодо системи управління ДППЗ запропоновано багато нових стратегій [57, 58, 59, 60, 61]. У [57], наприклад, пропонується нова стратегія генерації опорного струму в рамках теорії dq (теорії синхронної системи відліку). З метою вдосконалення контролера напруги ланцюга постійного струму та зменшення ємності ланцюга постійного струму також було запропоновано багато стратегій [62, 63].

Інтерфейсний фільтр на вході SAPF відіграє дуже важливу роль у продуктивності SAPF, оскільки він фільтрує пульсаційні гармоніки перемикавання, що містяться у вихідній напрузі та струмі інвертора, і забезпечує динамічну реакцію струму інвертора (відповідь швидкого відстеження струму) [64]. Він існує в кількох структурах (L, LC, LCL, LCL–LC, LLCL тощо), але ті, що мають конденсатор, мають спільну проблему резонансу, яка може поставити під загрозу стабільність енергосистеми [65, 66].

У випадку L –фільтра він більш кращий (у деяких випадках), ніж фільтри з конденсатором, оскільки він не створює проблеми резонансу, незважаючи на його нижчу ефективність (порівняно з фільтрами з конденсатором) з точки зору пульсацій перемикавання, пом'якшення та динамічної реакції [67, 68, 69]. Крім того, він громіздкий і вимагає реактора великого розміру для ефективної

роботи з точки зору зменшення пульсацій комутації. Недоліками L –фільтра великого розміру є втрати потужності, збільшення експлуатаційних витрат, негативний вплив на динамічні характеристики SAPF та характеристики компенсації [70]. У літературі зменшення пульсацій перемикавання та покращення динамічної реакції SAPF з точки зору швидкого відстеження струму інвертора є двома основними критеріями, які пропонується брати до уваги під час розробки L –фільтра. Однак у цьому дослідженні пропонується додатковий новий критерій: розмір вхідного реактора навантаження (випадок діода або тиристорного моста з реактором інтерфейсної лінії), який також відіграє важливу роль у динамічній реакції струму інвертора.

Ефективність продуктивності SAPF повинна залежати не тільки від параметрів інвертора (наприклад, частоти перемикавання, інтерфейсного фільтра (L, LC, LCL, LCL–LC тощо)) або розробленої системи керування, а й від параметрів системи живлення для з якою він пов'язаний. Наприклад, в електричній системі з діодним або тиристорним мостом як навантаження прийнятний ККД SAPF (з L –фільтром) може не досягатися через високу швидкість зміни струму навантаження (d_i/d_t) при комутаційні виїмки. Тому перед монтажем необхідно вивчити енергосистему з точки зору еквівалентних параметрів (сторони мережі та навантаження). Цю проблему також досліджено в [71].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У даній роботі досліджується САПФ з вхідним реактором L_{nv} (див. рисунок 2.1.). Доведено, що для отримання кращої ефективності роботи SAPF параметри його вхідного реактора слід вибирати, виходячи не лише з ефективного зменшення пульсацій перемикання інвертора або вимог системи керування (наприклад, швидкого динамічного відгуку), але й з параметрів навантаження, наприклад, параметри діодного або тиристорно–мостового вхідного лінійного реактора (див. LT на рисунку 2.1.). Для пояснення в цьому дослідженні розглядаються два приклади: у першому представлено вплив розміру вхідного реактора SAPF (параметри вхідного реактора навантаження постійні) на його ефективність роботи. У другому представлено вплив навантаження вхідного реактора на ефективність роботи САПФ (параметри вхідного реактора САПФ постійні). Стаття складається з трьох частин: перша базується на дослідженнях моделювання (MATLAB/SIMULINK, версія R2015a та R2021b [72]) і представляє запропоновані вирази, які використовуються для обчислення параметрів SAPF; також включає дослідження впливу розміру вхідного реактора інвертора на ефективність роботи SAPF, а також дослідження впливу розміру тиристорно–мостового вхідного реактора на ефективність роботи SAPF. У другій частині подано лабораторні дослідження, а в третій – висновки.

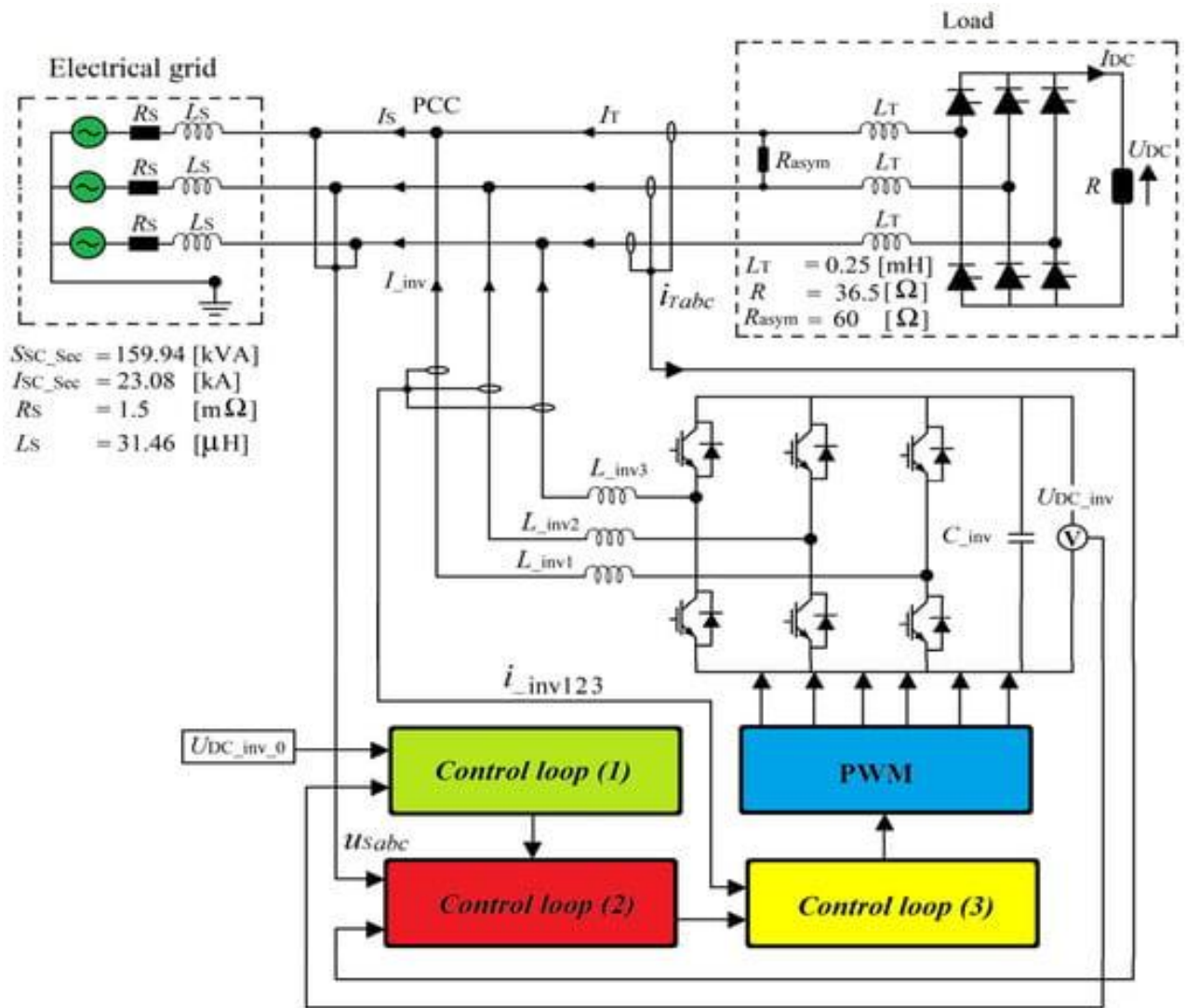


Рисунок 2.1. – Еквівалентна схема змодельованої електричної системи

S_{SC_Sec} — потужність короткого замикання на вторинній стороні трансформатора; I_{SC_Sec} — початковий струм короткого замикання на вторинній стороні трансформатора; (R_s , L_s) — еквівалентний опір та індуктивність мережі відповідно.

РОЗІДЛ 2. ІМІТАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Презентація імітованої енергетичної системи

Еквівалентна схема змодельованої енергосистеми представлена на рисунку 2.1. Він складається з трьох частин: електричної мережі, навантаження та SAPF. Еквівалентні параметри електричної мережі на рисунку 2.1 обчислюються на основі реальної електричної мережі, що живить лабораторну установку (див. рисунок 2.2.). На рисунку 2.2. видно, що параметри електричної мережі розраховані від середньої до низької напруги. Навантаження є трифазним тиристорним мостом з опором (R_{DC}) на стороні постійного струму та реактором (L_T) на стороні змінного струму. Опір (R_{asym}) підключається між фазами, щоб забезпечити стан дисбалансу струму. Параметри навантаження взяті з лабораторної установки, крім R_{asym} . Для компенсації гармонік, реактивної потужності та несиметрії використовується SAPF з системою керування (рис. 2.1). Це трипровідний інвертор із дроселем (L_{inv}) на стороні змінного струму та конденсатором (C_{inv}) на стороні змінного струму.

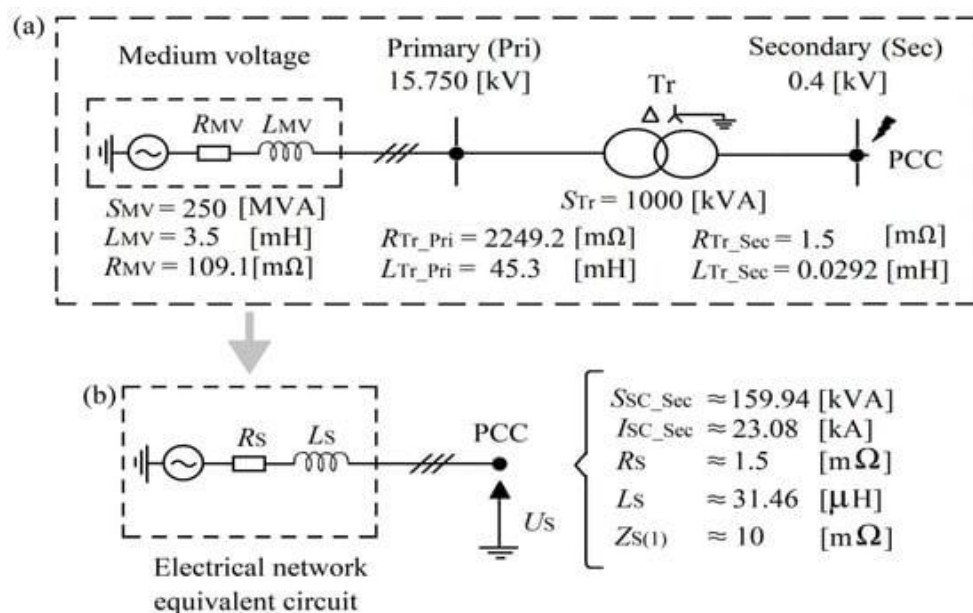


Рисунок 2.2. (a) – Параметри електричної мережі, що живить лабораторні установки; (b) еквівалентна схема електричної мережі. Sec—вторинний; Pri—

основний

2.1.1. Опис запропонованої системи контролю

Пропонована система керування ДНПФ представлена на рисунку 2.3. Її алгоритм базується на теорії миттєвої p – q у часовій області [73, 74, 75]. Він організований у три важливі контури керування (контури керування (1), (2) і (3)).

Роль контуру керування (1) (див. рис. 2.3) полягає в підтримці напруги постійного струму SAPF (U_{DC_inv}) на постійному рівні та на рівні, що забезпечується опорною напругою (U_{DC_ref}) [43, 76]. Досягнута максимальна напруга під час перехідного стану (наприклад, заряджання конденсатора) та його тривалість залежать від значення ємності конденсатора та параметрів ПП–регулятора (див. рисунок 2.3).

У контурі керування (2) застосовано алгоритм p – q . Його роль полягає в тому, щоб розділити спотворений миттєвий струм навантаження (i_{Tabc}) на чотири різні компоненти (див. рисунок 2.3.): активний ($i_{abc(p)}$), реактивний ($i_{abc(q)}$), пов'язані з асиметрією ($i_{abc(asym)}$), а також гармонічні спотворення ($i_{abc(armono)}$). Таким чином, вихідний сигнал контуру керування (2) є миттєвим опорним струмом (i_{abc_ref}), який складається з трьох компонентів (реактивний, асиметричний і гармонічний струм), як показано на рисунку 2.3 (активний компонент ($i_{abc(p)}$) не враховується).

Спостерігаючи за алгоритмом контуру керування (2), можна побачити, що розщеплення миттєвого струму навантаження (i_{Tabc}) на різні компоненти, починаючи з його вимірювання, а також вимірювання миттєвої напруги РСС (u_{Sabc}). Напруга живлення фільтрується («фільтрація напруги живлення»), щоб уникнути її спотворень у опорному струмі. Миттєві дійсні (p) та уявні (q) потужності отримують після перетворення миттєвої напруги та струму РСС з координат abc у прямокутні координати $\alpha - \beta$.

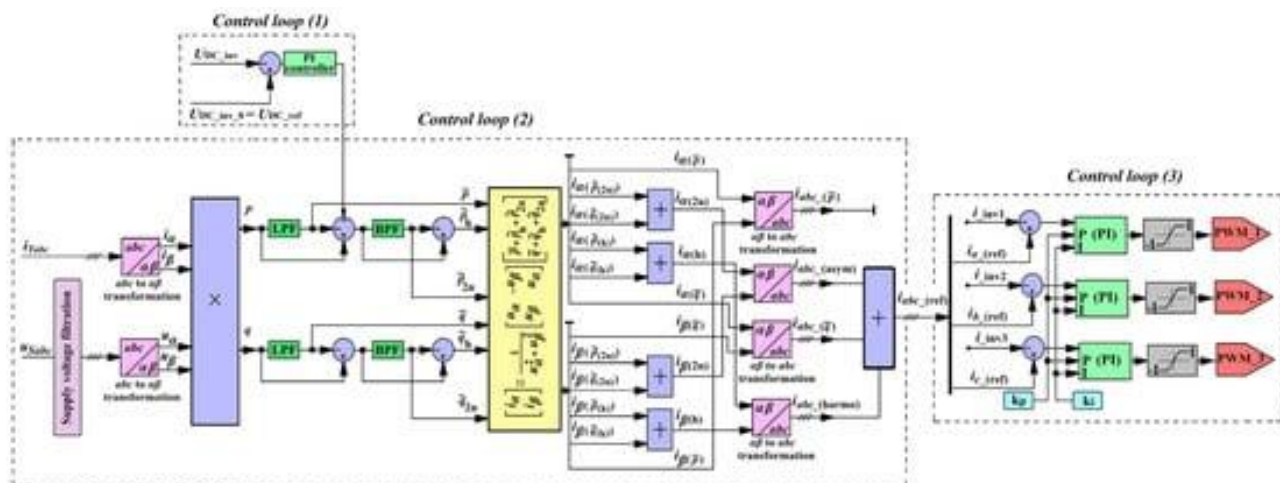


Рисунок 2.3. – Діаграма Бока запропонованої системи керування SAPF

Фільтр низьких частот (LPF) і смуговий фільтр (BPF) використовуються для фільтрації миттєвої дійсної (p) і уявної (q) потужностей таким чином, щоб їхні компоненти (p , q) – постійні складові, пов’язані з основною гармонікою (позитивна послідовність), (p_h , q_h) – складові, пов’язані з гармонікою струму та (p_{2n} , q_{2n}) – компоненти, пов’язані з асиметрією струму (від’ємна послідовність основної гармоніки)), можуть бути використані в матричній системі (див. рис. 2.3) для обчислення миттєвих опорних струмів (i_α , i_β) по осях $\alpha - \beta$. Після розрахунку матриці отримують різні складові струму: ($i_{\alpha(p)}$, $i_{\beta(p)}$) – миттєвий реальний струм (основна гармоніка) по осі α і β відповідно; ($i_{\alpha(\tilde{p}_{2n})}$, $i_{\beta(\tilde{q}_{2n})}$), ($i_{\beta(\tilde{p}_{2n})}$, $i_{\beta(\tilde{q}_{2n})}$) – миттєвий струм асиметрії по осі α і β відповідно; ($i_{\alpha(\tilde{p}_h)}$, $i_{\alpha(\tilde{q}_h)}$), ($i_{\beta(\tilde{p}_h)}$, $i_{\beta(\tilde{q}_h)}$) – миттєвий гармонічний струм по осі α і β відповідно; ($i_{\alpha(q)}$, $i_{\beta(q)}$) – миттєвий уявний струм (основна гармоніка) по осі α і β відповідно. Такі компоненти, як $i_{\alpha(2n)}$ і $i_{\beta(2n)}$ – миттєвий струм асиметрії по осі α та β відповідно, а такі компоненти, як $i_{\alpha(h)}$ і $i_{\beta(h)}$ – миттєвий струм гармонік по осі α і β відповідно. Миттєві складові струму навантаження (i_{abc_asym} , i_{abc_q} , $i_{abc_harmono}$) можна побачити в кінці контуру керування (2) після зворотного перетворення від $\alpha - \beta$ до координат $a - b - c$ (див. i_{abc_ref}) на рисунку 2.3).

У контурі керування (3) миттєвий опорний струм (i_{abc_ref}) порівнюється зі струмом контуру зворотного зв’язку, що надходить із входу інвертора (i_{inv123}). Також можна побачити блоки ПІ – регулятора, системи насичення та широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) (рис. 2.3).

2.1.2. Запропоновані вирази для обчислення параметрів SAPF

Падіння напруги (ΔU_{L_inv}) вхідного реактора SAPF (L_{inv}) виражається у (2.1). Це різниця між середньоквадратичним значенням (фундаментальним) вхідної напруги інвертора (U_{AC_inv}) і напруга РСС (U_S) (див. рисунок 2.4.). Роль SAPF полягає у створенні компенсаційного струму (наприклад, i_{inv1}) на основі опорного струму (наприклад, i_{a_ref}) і через це I_{inv} вважається рівним I_{ref} як представлено у виразі (2.2) (число 3 означає трифазність). Запропонований вираз для обчислення вхідної індуктивності реактора SAPF представлений у (2.3) (I_{a_ref} , I_{b_ref} і I_{c_ref} є середньоквадратичними значеннями опорного струму в кожній фазі):

$$\Delta U_{L_inv} = U_{AC_inv} - U_S = L_{inv} \omega_{(1)} I_{inv} \quad (2.1)$$

$$I_{inv} = I_{ref} = \frac{I_{a_ref} + I_{b_ref} + I_{c_ref}}{3} \quad (2.2)$$

$$L_{inv} = \frac{3 \Delta U_{L_inv}}{\omega_{(1)} (I_{a_ref} + I_{b_ref} + I_{c_ref})} \quad (2.3)$$

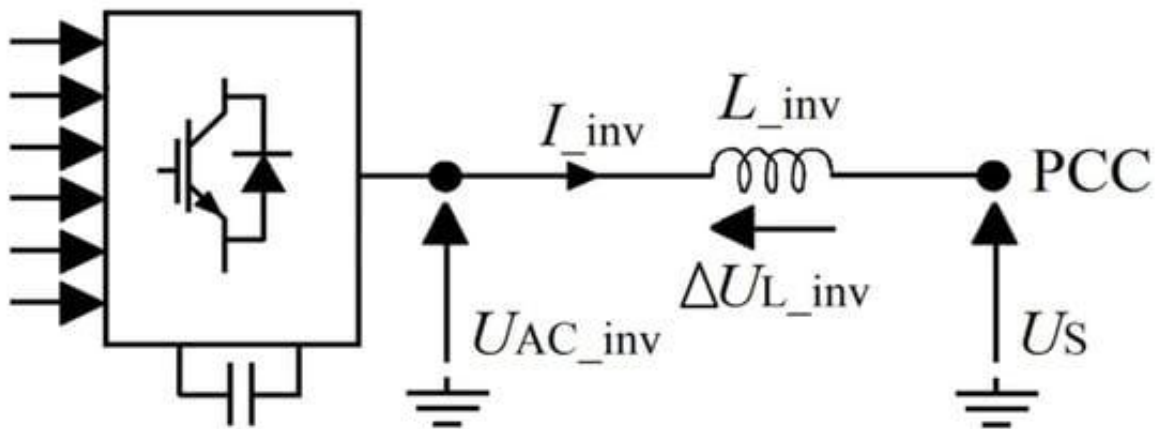


Рисунок 2.4. – Еквівалентна схема SAPF із зображенням напруг навколо вхідного реактора L_{inv}

Співвідношення між опорною напругою постійного струму SAPF ($U_{DC_inv_0}$) і фазова напруга змінного струму РСС (U_{S_p-p}) пропонується в (2. 4). Опорна напруга конденсатора постійного струму передбачається вищою за максимальну міжфазну напругу РСС (див. вираз 2. 4).

Пульсації постійної напруги конденсатора змінюються між екстремумами ($U_{DC_inv_max}$ і $U_{DC_inv_min}$), як показано на рисунку 2.5. Зміна напруги постійного струму на конденсаторі (ΔU_{DC_inv} — див. рис. 2.5) також відповідає зміні енергії конденсатора (ΔW_{DC_in}).

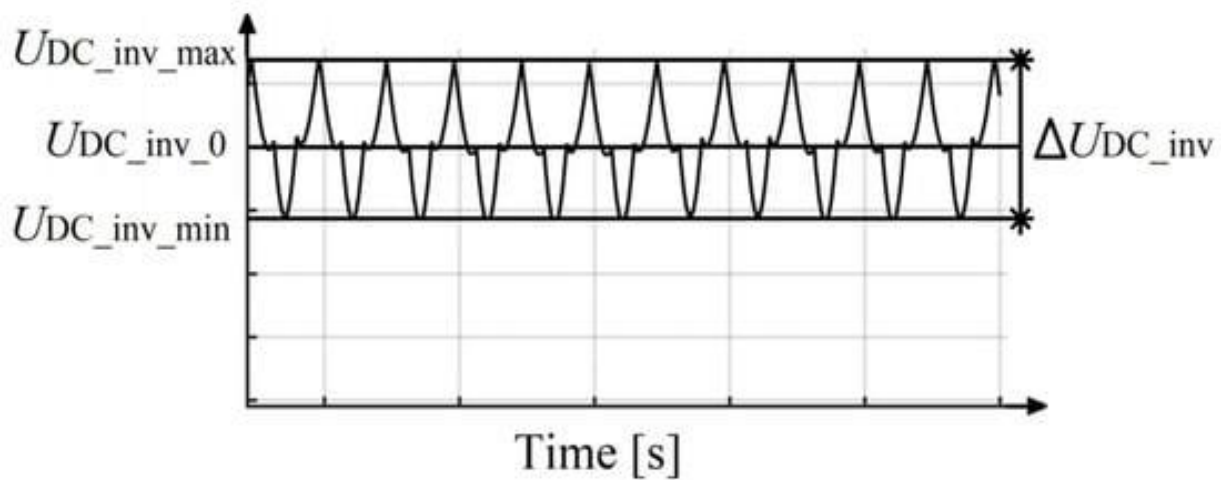


Рисунок 2.5. – Приклад форми сигналів постійної напруги інвертора

Еталонна енергія конденсатора постійного струму SAPF ($W_{DC_inv_0}$) виражається (2.5), а максимальна та мінімальна енергія виражаються, відповідно, у (2.6) та (2.7). Мінімальна напруга конденсатора постійного струму ($U_{DC_inv_min}$) виражається у (2.8). Зміна енергії конденсатора постійного струму (ΔW_{DC_inv}) між max і min представлено в (2.9) і (2.10). Використовуючи вираз (2.11) у (2.10), запропонований вираз конденсатора постійного струму SAPF отримуємо у (2.12):

$$U_{DC_inv_0} > k_{DC} \left(\sqrt{2} U_{S_p-p} \right), \quad k_{DC} \geq 1 \quad (2.4)$$

$$W_{DC_inv_0} = \frac{1}{2} C_{inv} U_{DC_inv_0}^2 \quad (2.5)$$

$$W_{DC_inv_max} = \frac{1}{2} C_{inv} U_{DC_inv_max}^2 \quad (2.6)$$

$$W_{DC_inv_min} = \frac{1}{2} C_{inv} U_{DC_inv_min}^2 \quad (2.7)$$

$$U_{DC_inv_min} = U_{DC_inv_max} - \Delta U_{DC_inv} \quad (2.8)$$

$$W_{DC_inv_max} - W_{DC_inv_min} = \Delta W_{DC_inv} = \frac{1}{2} C_{inv} (U_{DC_inv_max}^2 - U_{DC_inv_min}^2) \quad (2.9)$$

$$\Delta W_{DC_inv} = \frac{1}{2} C_{inv} (2U_{DC_inv_max} \Delta U_{DC_inv} - \Delta U_{DC_inv}^2) \quad (2.10)$$

$$U_{DC_inv_max} = U_{DC_inv_0} + \frac{\Delta U_{DC_inv}}{2} \quad (2.11)$$

$$C_{inv} = \frac{\Delta W_{DC_inv}}{U_{DC_inv_0} \Delta U_{DC_inv}} \quad (2.12)$$

2.2. Симуляційне припущення

Параметри електричної мережі на рисунку 2.1 розраховані на основі лабораторних параметрів. Значення кута запалювання тиристорного моста є постійним, а його вхідний опір реактора нехтується. Опір асиметрії (R_{asym}) значення вибирається виходячи з практичного підходу (рис.2 1).

Приклад розрахунку параметра SAPF наведено в таблиці 2.1. Вирази (2.3), (2.4) і (2.12) використовувалися для розрахунку вхідної індуктивності інвертора (L_{inv}), напруга постійного струму (U_{DC_inv0}) і ємність (C_{inv}), відповідно. Мінімальне значення індуктивності вхідного реактора інвертора (L_{inv_min}) отримується після припущення мінімального падіння напруги на

вхідному реакторі інвертора (наприклад, $\Delta U_{L_inv_min} = 3 \text{ В}$) і максимальне значення (L_{inv_max}) отримується після припущення максимального падіння напруги на вхідному реакторі інвертора (наприклад, $\Delta U_{L_inv_max} = 16 \text{ В}$). Еталонні поточні середньоквадратичні значення (I_{a_ref} , I_{b_ref} , I_{c_ref}) отримуються в кінці контуру керування (2.2)) перед підключенням SAPF до РСС.

Таблиця 2.1. – Розраховані параметри SAPF

ΔU_{L_inv} [V]	I_{a_ref} [A]	I_{b_ref} [A]	I_{c_ref} [A]	L_{inv_min} [mH]	L_{inv_max} [mH]	k_{DC}	U_{S_p-p} [V]	$U_{DC_inv,0}$ [V]	ΔW_{DC_inv} [J]	ΔU_{DC_inv} [V]	C_{inv} [F]
3	4.46	9.38	7.34	1.4	-	1.32	400	750	11	5	3
16	4.46	9.38	7.34	-	7.2						

Параметри ПІ-регулятора контуру керування (2.1) та контуру керування (2.3), представлені в таблиці 2.2, вибрані на основі практичних знань. Ці параметри є постійними під час моделювання. Частота перемикання SAPF зафіксована на рівні 20 кГц, а вхідні реактори змінного струму та опори конденсаторів постійного струму нехтуються під час досліджень.

Таблиця 2.2. – Параметри ПІ-регулятора.

	kp	ki
<i>Control loop (1)</i>	40,000	43.75
<i>Control loop (3)</i>	250	0.0001

Вирази з (2.13) по (2.17) використовуються для обчислення струму мережі в зворотній послідовності у відсотках від прямої послідовності (k_{asym}), напруги в мережі та загального коефіцієнта гармонійних спотворень (THD) і справжнього загального коефіцієнта гармонік ((ТТНД) див. (2.16) і (2.17)) [77, 78].

$$k_{asym} = \frac{I_{S(1)}^{(-)}}{I_{S(1)}^{(+)}} \quad (2.13)$$

$$THD_{U_s} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_{s(n)}^2}}{U_{S(1)}} \quad (2.14)$$

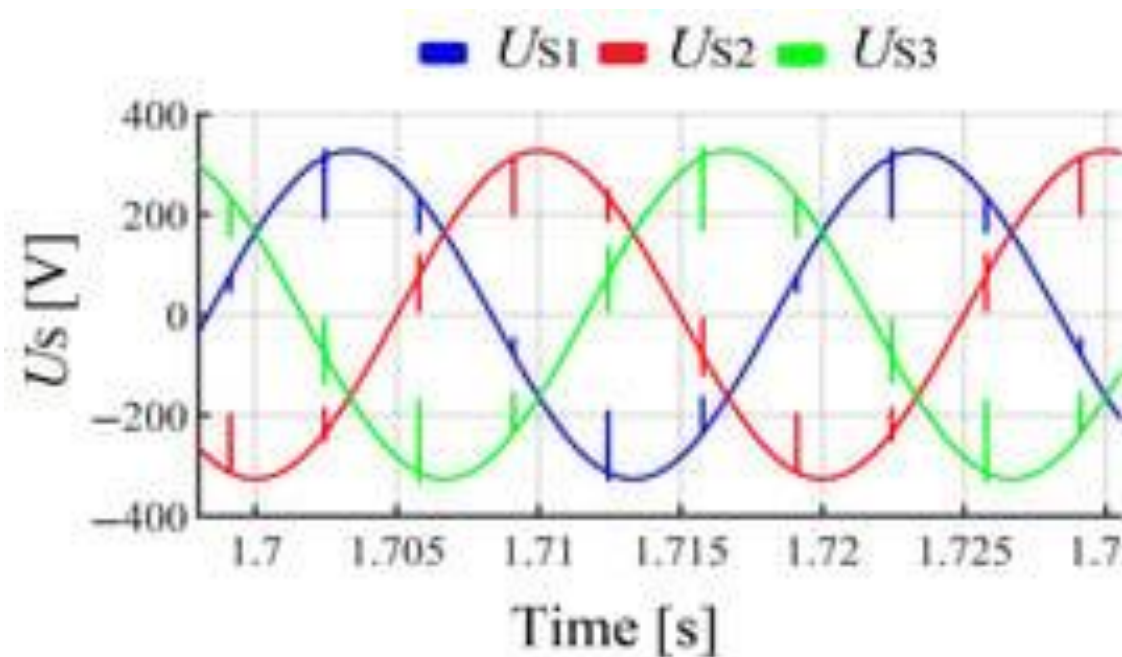
$$THD_{I_s} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_{s(n)}^2}}{I_{S(1)}} \quad (2.15)$$

$$\text{TTHD}_{U_s} = \frac{\sqrt{U_{S_true_RMS}^2 - U_{S(1)}^2}}{U_{S(1)}} \quad (2.16)$$

$$\text{TTHD}_{I_s} = \frac{\sqrt{I_{S_true_RMS}^2 - I_{S(1)}^2}}{I_{S(1)}} \quad (2.17)$$

2.3. Результати моделювання

Осцилограми напруги мережі та струму (зі спектрами) перед підключенням SAPF показано на рисунку 2.6 та рисунку 2.7 відповідно. На рисунку 2.6 представлено лише одну фазу спектра напруги мережі. Фазовий дисбаланс можна спостерігати на формах сигналів струму сітки (які не є ідентичними) і спектрах (рис. 2.7).



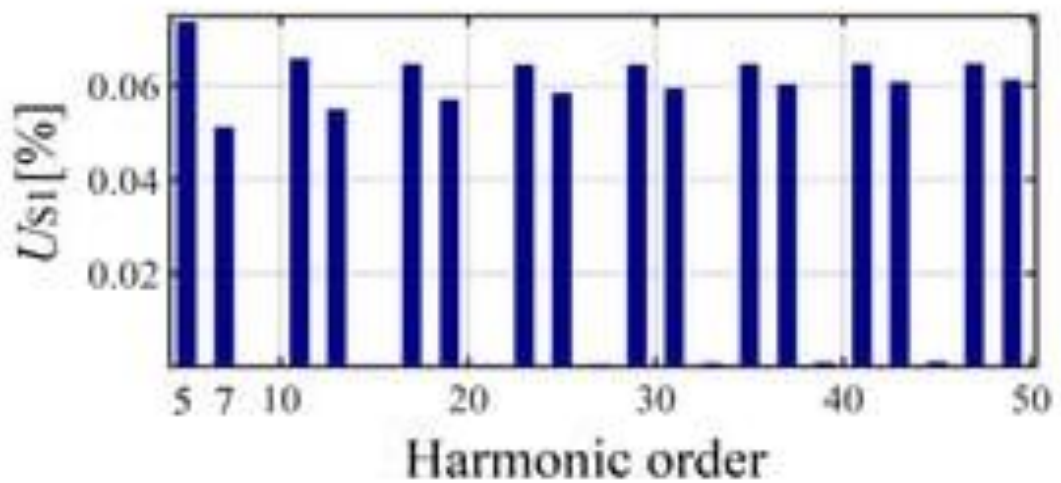


Рисунок 2.6. – Сигнали напруги РСС і спектр перед підключенням SAPF

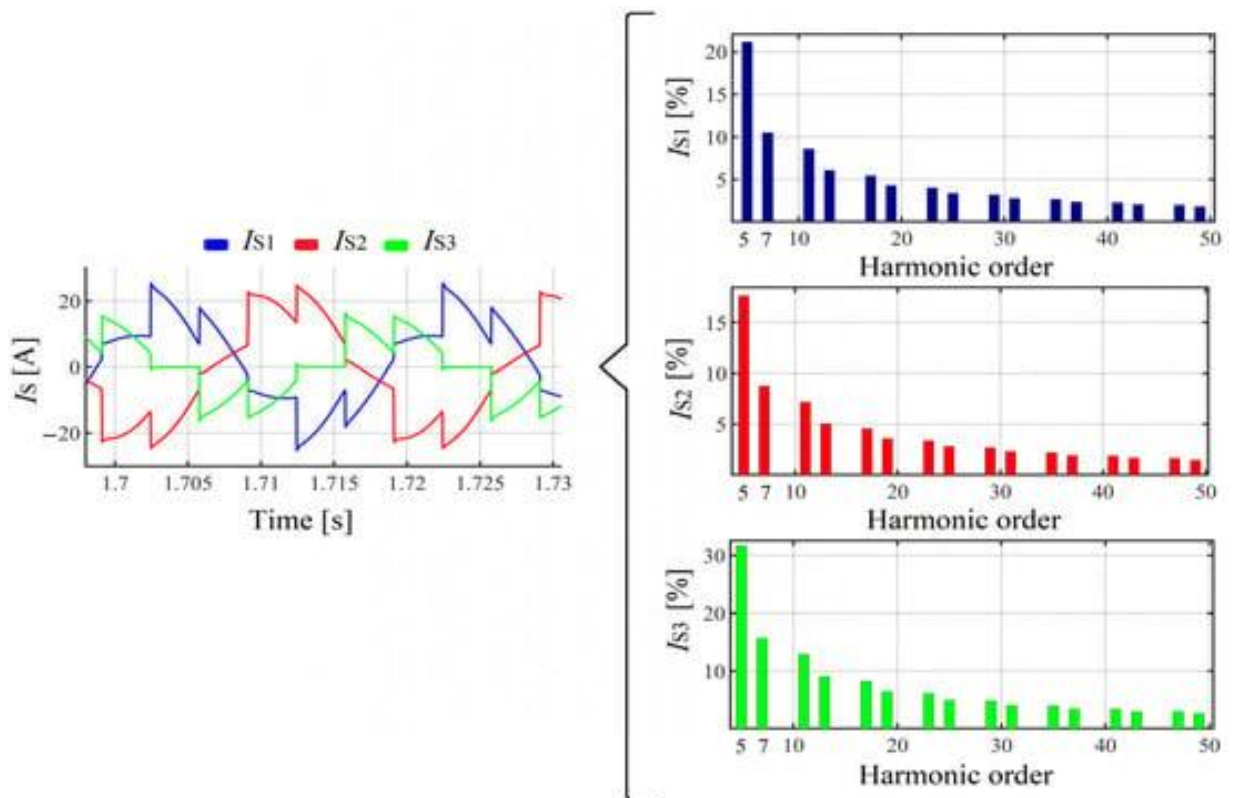


Рисунок 2.7. – Хвилини струму мережі з їхніми спектрами перед підключенням SAPF

На рисунку 2.8 а–f разом із спектрами представлено приклад форм опорного струму на виході контуру керування (2.2) (див. Рисунок 2.3) перед з'єднанням SAPF. На рисунках 2.8 h–j представлені компоненти струму

(однофазні), що містяться в опорному струмі (наприклад, i_{a_ref}). Форми сигналів струму на рисунку 2.8 l (i_{Ta}) є сумою всіх форм сигналу струму від рисунка 2.8 g до рисунка 2.8 j (i_{Ta} такий самий, як струм навантаження). У опорних спектрах струму на рис. 2.8 b,d,f відзначається поява 3-ї гармоніки (потрійних гармонік), якої не було в спектрах напруги та струму мережі (це один із недоліків миттєвої рр теорія).

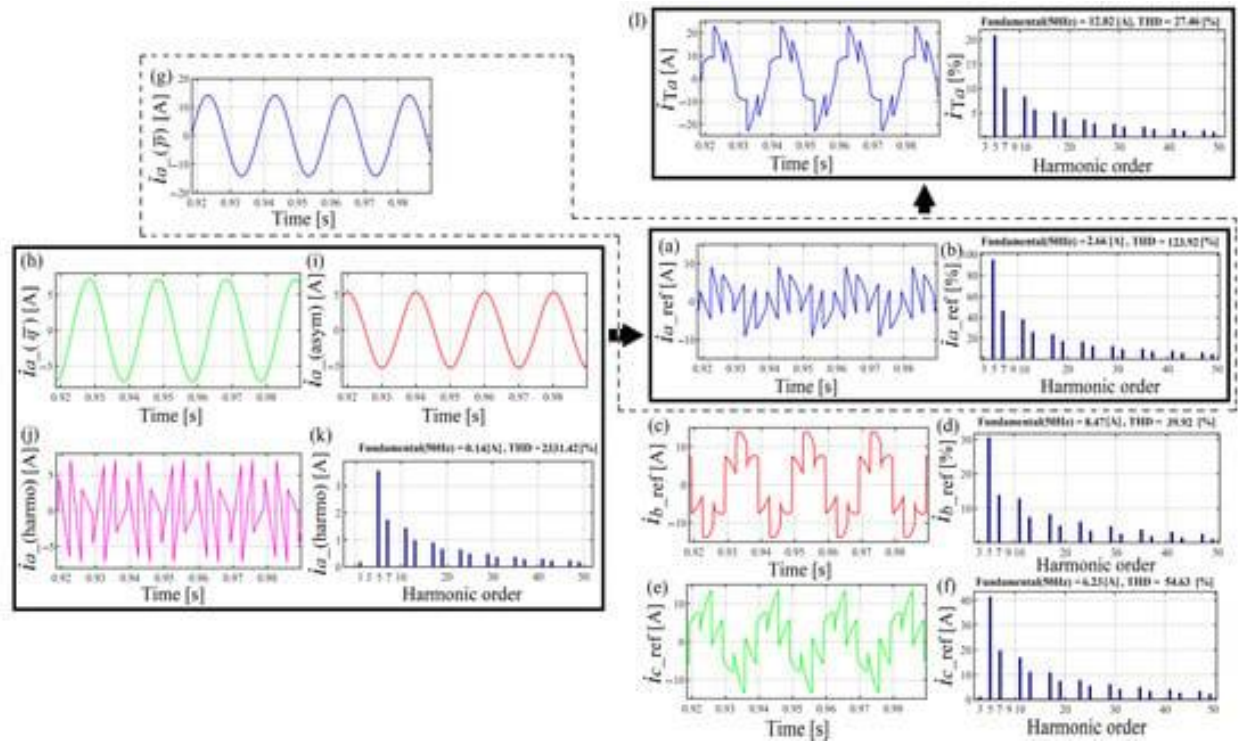


Рисунок 2.8. – Опорні струми на виході контуру керування (2) перед підключенням SAPF: (а, с, е) – осцилограми опорного струму (без складової струму, пов’язаної з реальною потужністю ($i_{a(p)}$) у координатах а – б – с з їхніми спектрами (b, d, f) відповідно. Однофазне зображення складових еталонного струму: (g) — струм, віднесений до реальної потужності, (h) — струм, віднесений до уявної потужності, (i) — струм несиметрії, (j) — струм гармонік з (k) — його спектр. (l) – струм, отриманий після додавання всіх компонентів форми струму (g – j)

2.4. Перші результати моделювання

Вплив розміру вхідного реактора інвертора на ефективність роботи SAPF

Мета — продемонструвати, як розмір вхідного реактора інвертора впливає на ефективність роботи SAPF. З цієї причини розглядаються два значення індуктивності вхідного реактора SAPF: $L_{inv_min} = 1,4$ мГн $L_{inv_max} = 7,2$ мГн. Ці значення були розраховані на основі обраних значень падіння напруги на вході реактора (див $\Delta U_{L_{inv}}$ у таблиці 2.1). Навантаження вхідного реактора (L_T) постійна протягом експерименту і дорівнює 0,25 мГн.

Після підключення SAPF форми сигналів струму мережі та напруги РСС, а також форми струму, що вводяться, представлені на рисунках 2.9 а, б та рисунках 2.10 а, б відповідно. З одного боку, САПФ з мінімальною вхідною індуктивністю реактора L_{inv_min} (див. рис. 2.9 а та рис. 2.10 а) має вищі компоненти перемикавання (пульсації перемикавання), ніж SAPF з максимальною вхідною індуктивністю реактора L_{inv_max} (див. рисунок 2.9 б і рисунок 2.10 б). З іншого боку, він представляє кращу форму сигналів струму сітки на комутаційних пазах (порівняння форм сигналів струму сітки на рисунку 2.9 а з тими, що на рисунку 2.9 б).

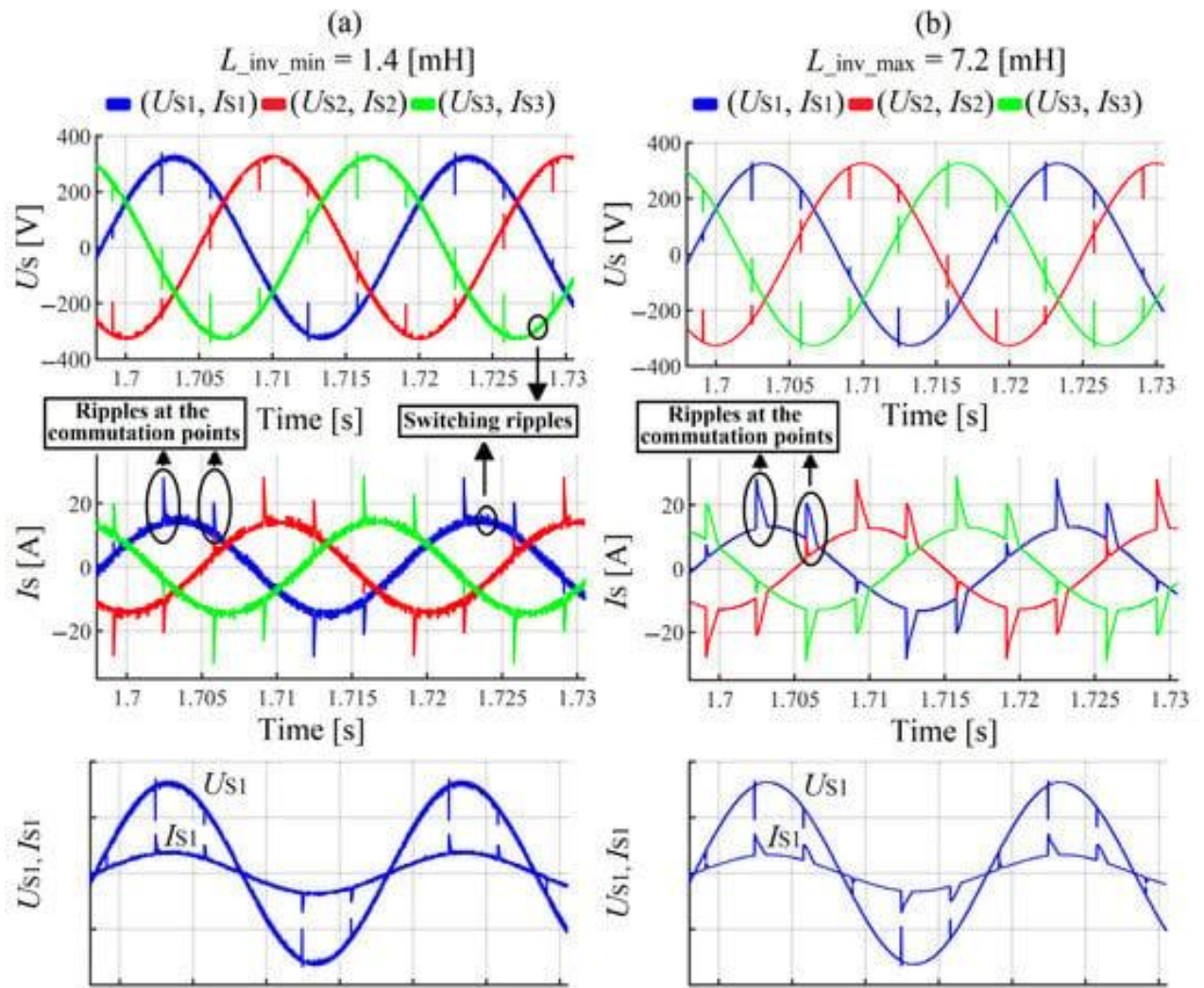
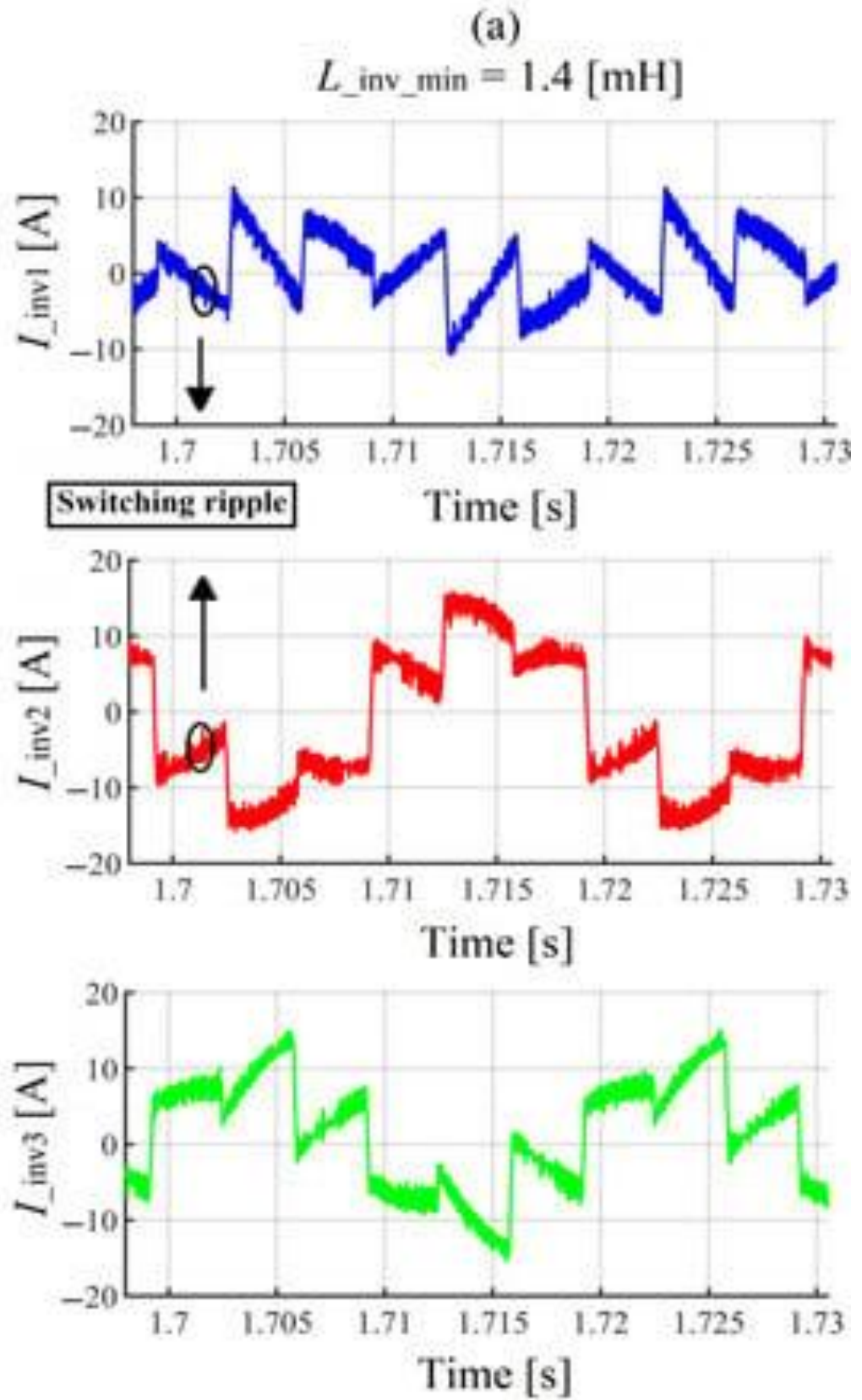


Рисунок 2.9. – Сигнали напруги РСС і струму мережі після підключення SAPF: (а) для L_{inv_min} ; (б) для L_{inv_max} .



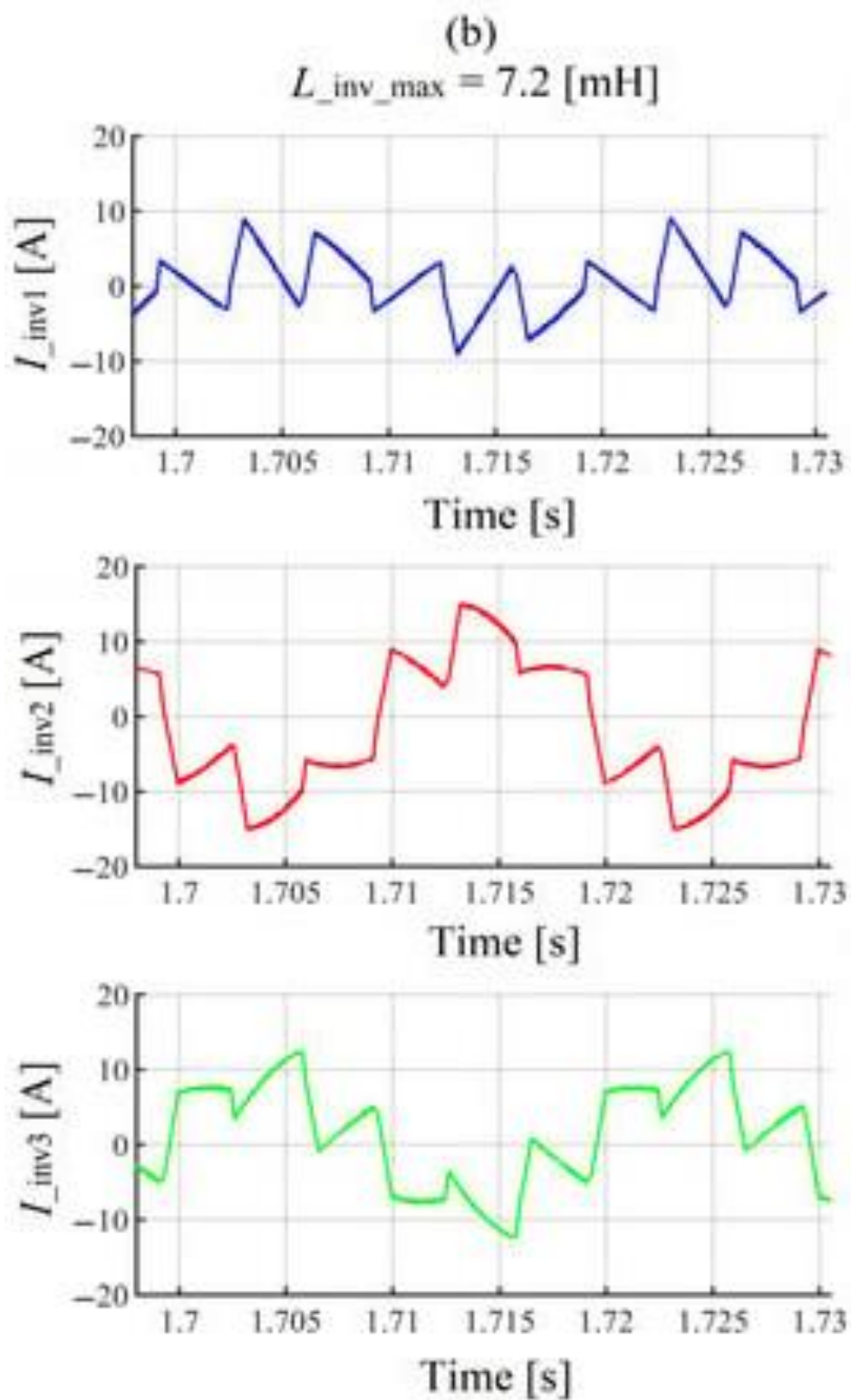


Рисунок 2.10. – Осцилограмми струму SAPF: (а) для L_{inv_min} ; (б) для L_{inv_max}

Значення напруги РСС і основної гармоніки струму мережі до і після підключення SAPF представлені в таблиці 2.3 і таблиці 2.4 відповідно. Струм мережі та напруга КНІ у випадку САПФ з L_{inv_min} менше, ніж у випадку з ДПФУ L_{inv_max} (табл. 2.4) (така ж інтерпретація стосується коефіцієнта асиметрії струму мережі (див . табл. 2.4)). У таблиці 2.5 видно, що у випадку ДПФ з L_{inv_max} , напруга мережі ТТНД нижча, а струм мережі ТТНД вищий у порівнянні з випадком SAPF з L_{inv_min} .

Таблиця 2.3. – Параметри напруги та струму мережі до підключення SAPF

	THD _{US} (%)	THD _{IS} (%)	Q _{S(1)} (Var)	P _{S(1)} (W)	S _{S(1)} (VA)	k _{asym} (%)
L1	0.25	28.07	414.08	2838.4	2868.5	33.25
L2	0.25	23.41	1954.5	2833.1	3441.9	
L3	0.25	42.07	1181.8	1507.2	1915.2	
		$U_{s1(1)} = 230.8 \text{ e}^{\text{j}30^\circ}$		$I_{s1(1)} = 12.43 \text{ e}^{\text{j}21.7^\circ}$		
		$U_{s2(1)} = 230.7 \text{ e}^{\text{j}270^\circ}$		$I_{s2(1)} = 14.92 \text{ e}^{\text{j}235.4^\circ}$		
		$U_{s3(1)} = 230.7 \text{ e}^{\text{j}150^\circ}$		$I_{s3(1)} = 8.29 \text{ e}^{\text{j}111.90^\circ}$		

Таблиця 2.4. – Параметри напруги та струму мережі після підключення SAPF

$L_{inv_min} = 1.4 \text{ (mH)}$			$L_{inv_max} = 7.2 \text{ (mH)}$			
	THD _{US} (%)	THD _{IS} (%)	k _{asym} (%)	THD _{US} (%)	THD _{IS} (%)	k _{asym} (%)
L1	0.18	10.34	0.59	0.25	26.7	0.75
L2	0.19	10.99		0.25	27.92	
L3	0.18	10.93		0.25	27.7	
$U_{s1(1)} = 230.8 \text{ e}^{j30^\circ}$		$I_{s1(1)} = 10.45 \text{ e}^{j28.9^\circ}$		$U_{s1(1)} = 230.80 \text{ e}^{j30^\circ}$		$I_{s1(1)} = 10.36 \text{ e}^{j27.8^\circ}$
$U_{s2(1)} = 230.8 \text{ e}^{j270^\circ}$		$I_{s2(1)} = 10.99 \text{ e}^{j268.7^\circ}$		$U_{s2(1)} = 230.80 \text{ e}^{j270^\circ}$		$I_{s2(1)} = 10.48 \text{ e}^{j267.7^\circ}$
$U_{s3(1)} = 230.8 \text{ e}^{j150^\circ}$		$I_{s3(1)} = 10.93 \text{ e}^{j149.1^\circ}$		$U_{s3(1)} = 230.80 \text{ e}^{j150^\circ}$		$I_{s3(1)} = 10.4 \text{ e}^{j147.2^\circ}$

Таблиця 2.5. – Напруга PCC і струм мережі TTND.

	$L_{inv_min} = 1.4 \text{ (mH)}$		$L_{inv_max} = 7.2 \text{ (mH)}$	
	TTND _{US} (%)	TTND _{IS} (%)	TTND _{US} (%)	TTND _{IS} (%)
L1	3.57	16.31	1.70	27.09
L2	2.93	16.19	1.50	27.59
L3	3.60	16.20	2.13	27.89

Приклад порівняння сигналів між еталонним струмом ($I_{a(ref)}$) і компенсуючий струм (I_{inv1}) представлено на рисунку 2.11 а, б. У справі ДПФУ з L_{inv_min} (рисунок 2.11 а) так і у випадку з ДПЗФ з L_{inv_max} (рис. 2.11 б), компенсаційний струм (I_{inv1}) має труднощі з відстеженням опорного струму ($I_{a(ref)}$) на вирізах комутації (через високу швидкість зміни опорного струму (di/dt) під час комутації). Ця складність є більш загостреною у випадку ДПФ з L_{inv_max} (рис. 11 б), ніж у випадку з ДПЗФ з L_{inv_min} (рисунок 2.11 а).

Еталонний струм (частина (%) вхідного струму тиристорного мосту) представляє високу швидкість зміни на комутаційних пазах через мале значення (розмір) індуктивності вхідного реактора тиристорного мосту (LT).

У цьому прикладі можна помітити, що розрив між опорним струмом і компенсаційним струмом, який спостерігається на рисунку 2.11 а,б, є одним із факторів, який визначає ефективність роботи SAPF, здебільшого з точки зору зменшення гармонік струму (див. струм мережі). THD у таблиці 2.4). Цей проміжок відповідає за пульсації високої амплітуди, що спостерігаються на хвилях струму сітки в комутаційних вирізах (наприклад, рис. 2.9 б).

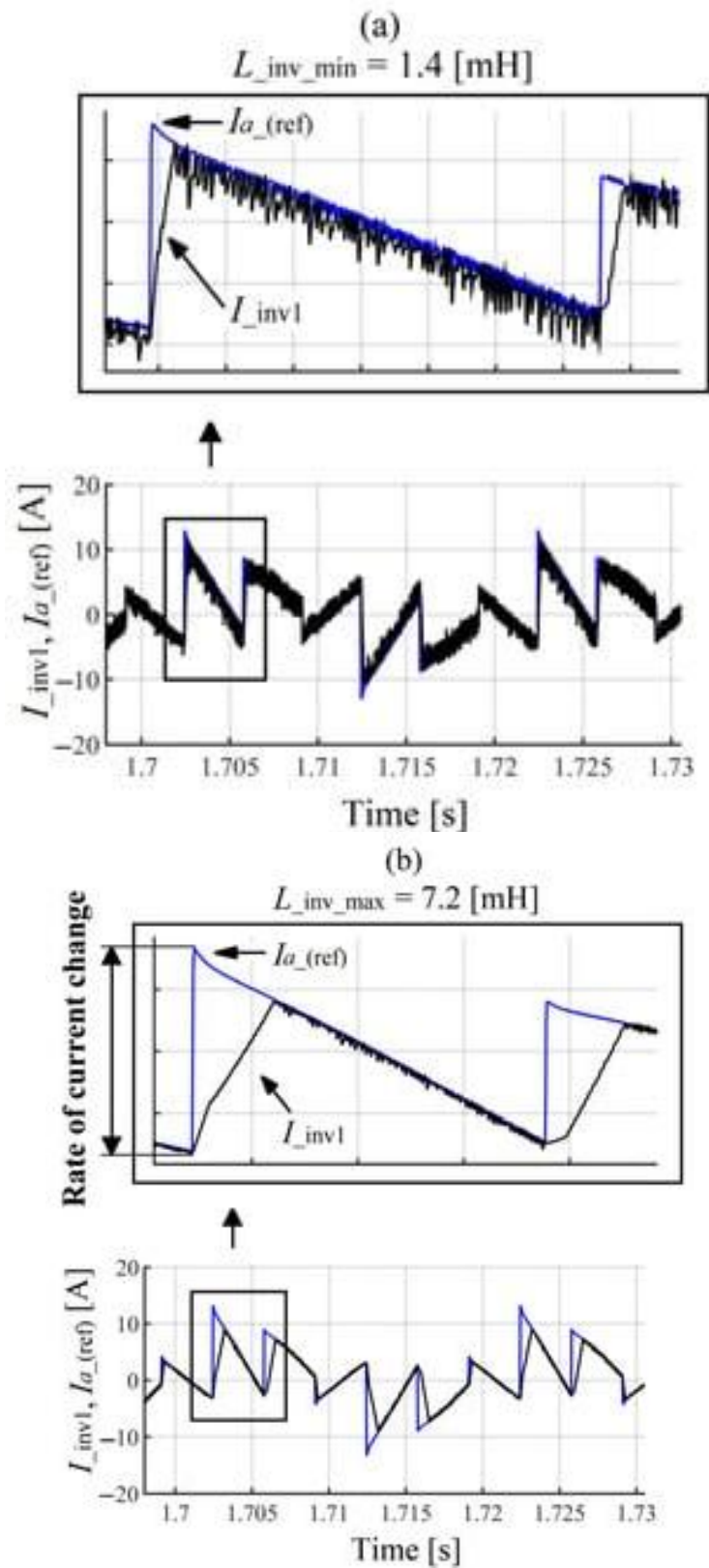


Рисунок 2.11. – Приклад порівняння форми сигналу між опорним і компенсуючим струмами контуру керування (3) (Рис. 2.3): (а) для L_{inv_min} ; (б) для L_{inv_max}

Після віднімання компенсаційного струму з еталонного струму на рисунку 2.11 а, б, форми сигналу помилки на вході ПІ-регулятора представлені на рисунку 2.12 а (L_{inv_min}) та 2.12 б (L_{inv_max}), відповідно. В ідеальному випадку два сигнали повинні збігатися один з одним і після порівняння помилка повинна бути близькою до нуля.

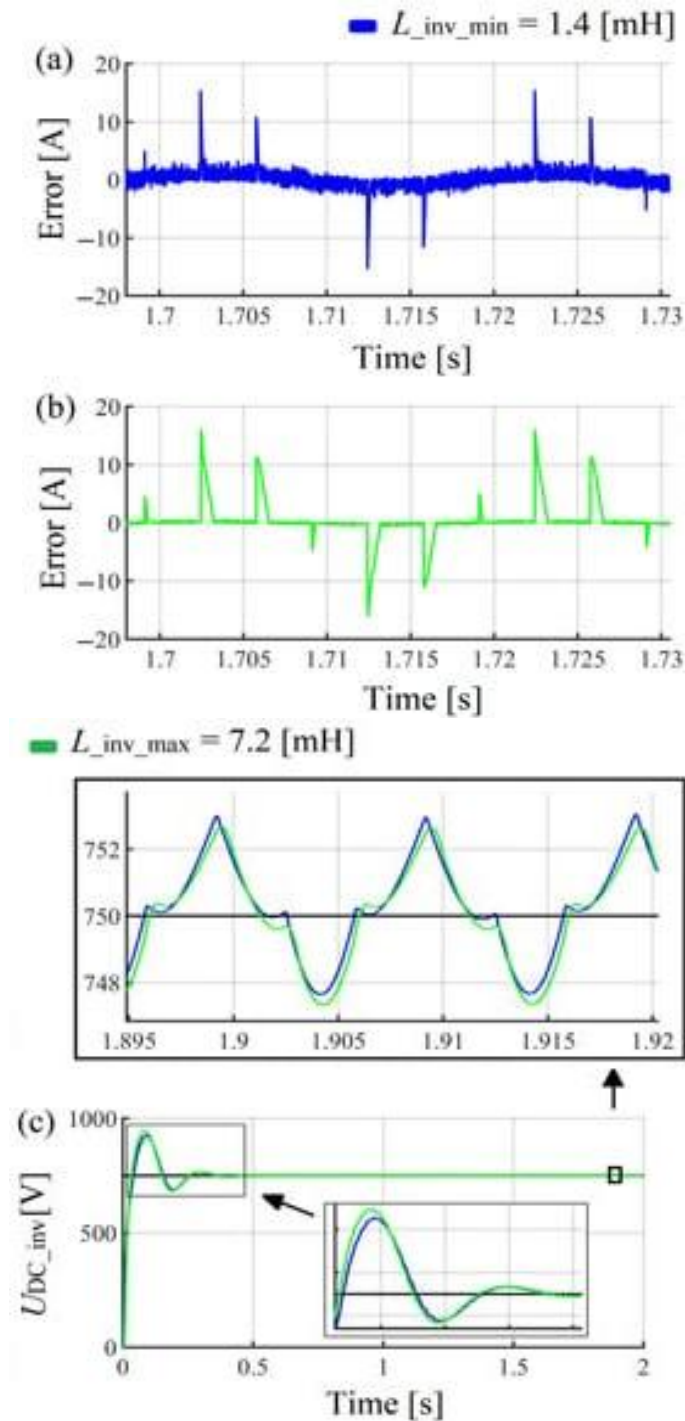


Рисунок 2.12. – (а, б) приклад сигналу помилки на вході ПІ-регулятора (контур керування (3)); (с) Напруга ланцюга постійного струму

Розмір вхідного реактора SAPF впливає на тривалість перехідного стану конденсатора постійного струму, як показано на рисунку 2.12 с.

Основні гармоніки активної, реактивної та повної потужності на стороні мережі, стороні навантаження та стороні SAPF для SAPF з L_{inv_min} L_{inv_max} представлені в таблиці 2.6. Потужності розраховуються на основі параметрів напруги та струму, наведених у таблиці 2.4 та таблиці 2.6 відповідно.

Таблиця 2.6. – Активна, реактивна та повна потужності на PCC, навантаженні та SAPF для мінімальної та максимальної вхідної індуктивності реактора інвертора.

		$(L_{inv_min} = 1.4 \text{ (mH)})$			$(L_{inv_max} = 7.2 \text{ (mH)})$		
		PCC	Load	SAPF	PCC	Load	SAPF
$P_{(1)}$ [W]	L1	2411.4	2838.8	427.40	2389.3	2838.8	449.82
	L2	2535.8	2837.9	438.19	2416.8	2837.9	421.33
	L3	2522.3	1505.7	-890.35	2397.5	1505.7	-891.61
$Q_{(1)}$ [Var]	L1	46.30	414.13	370.22	91.78	414.13	323.23
	L2	57.54	1950.4	1898	97.07	1950.4	1854.5
	L3	39.62	1180.6	1143.7	117.25	1180.6	1062.6
$S_{(1)}$ [VA]	L1	2411.9	2868.8	565.46	2391.1	2868.8	553.92
	L2	2536.5	3443.5	1948	2418.8	3443.5	1901.8
	L3	2522.6	1913.3	1449.4	2400.3	1913.3	1387.1
		$I_{T1(1)} = 12.43 e^{j21.7^\circ}$ $I_{T2(1)} = 14.92 e^{j235.5^\circ}$ $I_{T3(1)} = 8.29 e^{j111.9^\circ}$		$I_{inv1(1)} = 2.45 e^{-j10.9^\circ}$ $I_{inv2(1)} = 8.44 e^{j193.0^\circ}$ $I_{inv3(1)} = 6.28 e^{j22.1^\circ}$	$I_{T1(1)} = 12.43 e^{j21.7^\circ}$ $I_{T2(1)} = 14.92 e^{j235.5^\circ}$ $I_{T3(1)} = 8.29 e^{j111.9^\circ}$		$I_{inv1(1)} = 2.40 e^{-j5.7^\circ}$ $I_{inv2(1)} = 8.24 e^{j192.8^\circ}$ $I_{inv3(1)} = 6.01 e^{j20^\circ}$

На рисунку 2.13 представлено ефективність роботи SAPF з точки зору пом'якшення характерних гармонік на стороні мережі. Спостерігаючи за цією цифрою, можна помітити, що у випадку ДПФУ з L_{inv_max} , деякі гармоніки посилюються (гармоніки вище 100%) через великий розмір вхідного реактора. На стороні мережі характерні гармоніки краще зменшуються, коли SAPF підключений до L_{inv_min} ніж коли це пов'язано з L_{inv_max} .

■ $L_{inv_min} = 1.4$ [mH] ■ $L_{inv_max} = 7.2$ [mH]

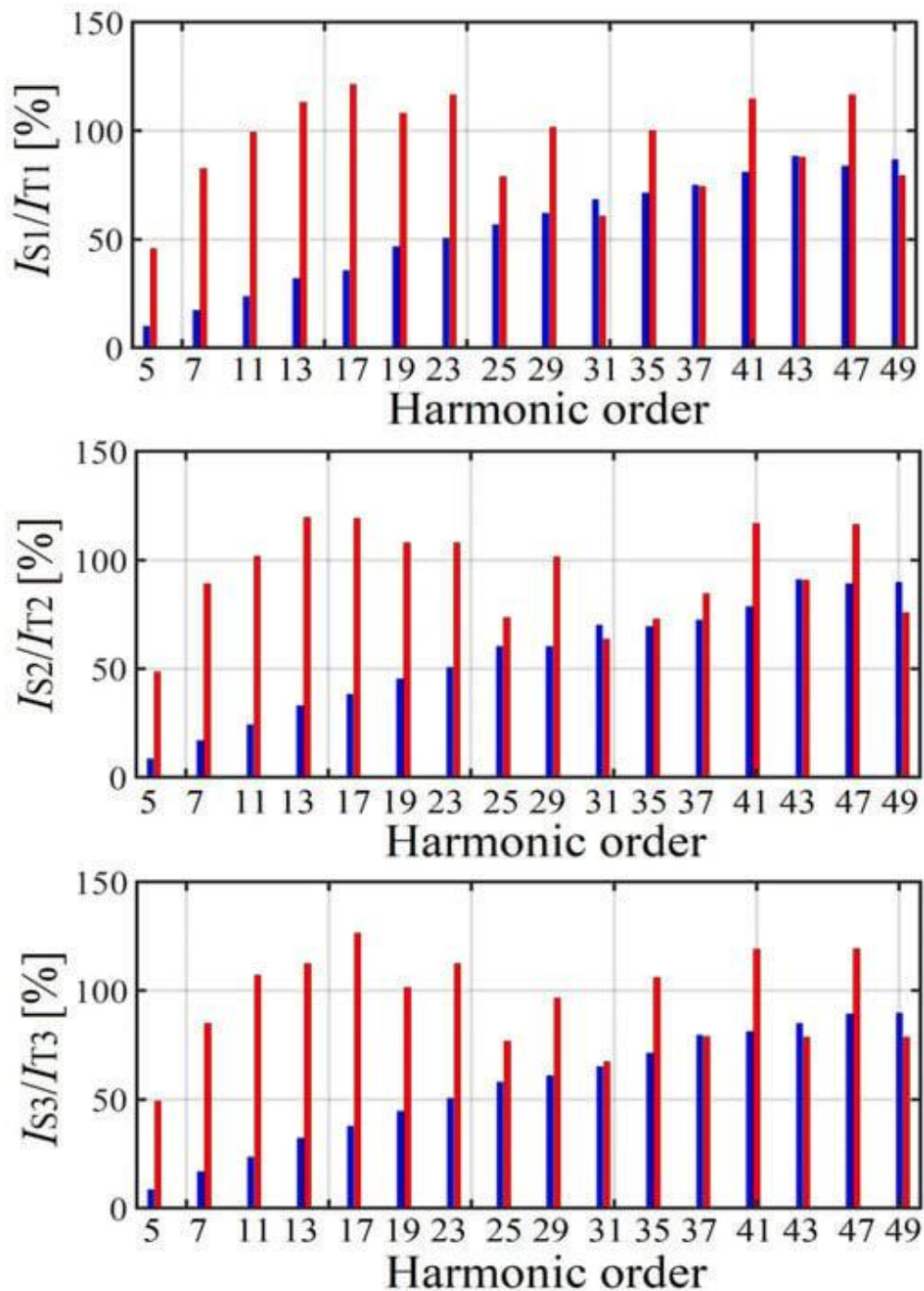


Рисунок 2.13. – Ефективність роботи SAPF з точки зору пом'якшення характерних гармонік на стороні мережі (для L_{inv_min} L_{inv_max})

Приклад гармонійних спектрів струму на вході навантаження, вході SAPF і стороні сітки представлено на рисунку 2.14 (для L_{inv_min}). Це ілюструє, як SAPF працює з точки зору пом'якшення гармонік.

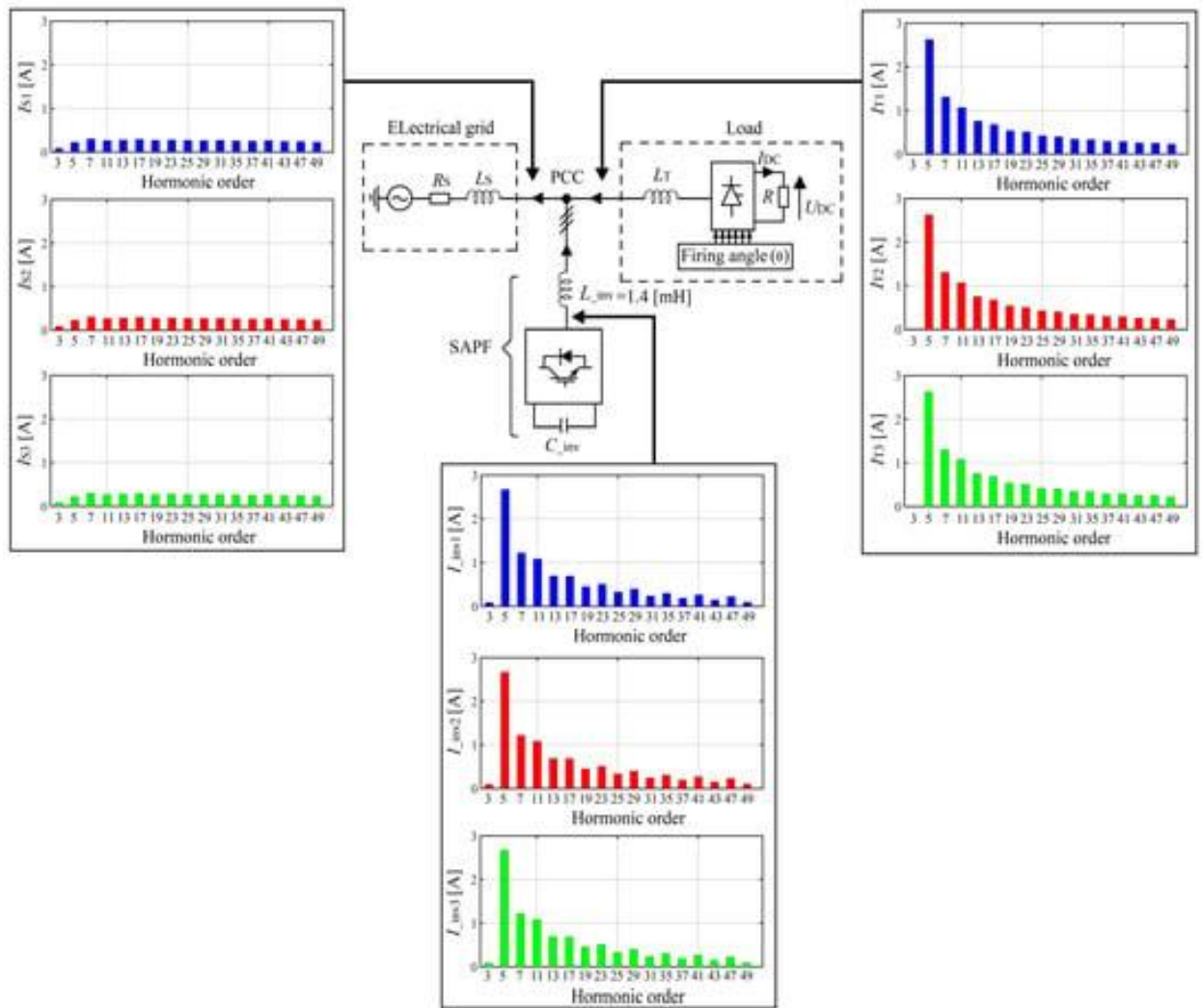


Рисунок 2.14. – Спектр вхідного струму випрямляча (I_T , струм інвертора (I_{inv}) і струм мережі (I_S) для L_{inv} дорівнює 1,4 мГн

Перші результати моделювання чітко продемонстрували, що розмір вхідного реактора SAPF впливає на ефективність його роботи. У цьому прикладі було розглянуто два вхідних реактора SAPF (малий і великий), і їх індуктивності були розраховані на основі вибраних значень падіння напруги реактора. Відповідно до запропонованого виразу в (2. 3) мала індуктивність реактора (L_{inv_min}) було обчислено при низькому значенні падіння напруги реактора та індуктивності великого (L_{inv_max}) було розраховано з припущенням високого значення падіння напруги реактора (див. таблицю 2.1). Обидва реактори були підключені на вході SAPF і порівняні результати. SAPF із великим розміром вхідного реактора показав кращий результат щодо

зменшення пульсацій перемикання інвертора, але гірший результат щодо зменшення пульсацій, викликаних високою швидкістю зміни струму під час комутації. На відміну від SAPF з реактором великого розміру, SAPF з малим розміром вхідного реактора показав гірший результат щодо зменшення пульсацій перемикання інвертора, але кращий результат щодо зменшення пульсацій, викликаних високою швидкістю зміни струму. під час комутації, а також кращу форму сигналу струму мережі. На стороні сітки SAPF з малою індуктивністю (L_{inv_min}) показав кращі результати щодо THD (струм TTND), коефіцієнта асиметрії та компенсації реактивної потужності, а також щодо пом'якшення характерних гармонік. SAPF з великою індуктивністю реактора (L_{inv_max}) показав кращі результати щодо TTND напруги РСС.

2.5. Результати другого моделювання

Вплив розміру тиристорно–мостового вхідного реактора на ефективність роботи SAPF

Через проблему зменшення пульсацій, спричинених високою швидкістю зміни струму, яка спостерігається у формах струму навантаження під час комутації, було виконано друге дослідження.

Метою дослідження є представити вплив розміру тиристорно–мостового вхідного реактора на ефективність роботи SAPF та продемонструвати, що вибір параметрів вхідного реактора SAPF також повинен залежати від розміру тиристорно–мостового вхідного реактора.

Еквівалентна схема (з параметрами), використана для проведення дослідження, представлена на рисунку 2.15. Значення індуктивності вхідного реактора SAPF ($L_{inv_min} = 1,4$ мГн) було обрано на основі попереднього експерименту. Порівнюються три випадки результатів моделювання: (а) де індуктивність вхідного реактора SAPF вища, ніж індуктивність вхідного реактора з тиристорним мостом ($L_{inv_min} > L_{TLT}$); (b) де індуктивність вхідного

реактора SAPF дорівнює індуктивності вхідного реактора з тиристорним мостом ($L_{inv_min} = L_{TLT}$) і (с) де індуктивність вхідного реактора SAPF менша, ніж індуктивність вхідного реактора з тиристорним мостом ($L_{inv_min} < L_{TLT}$).

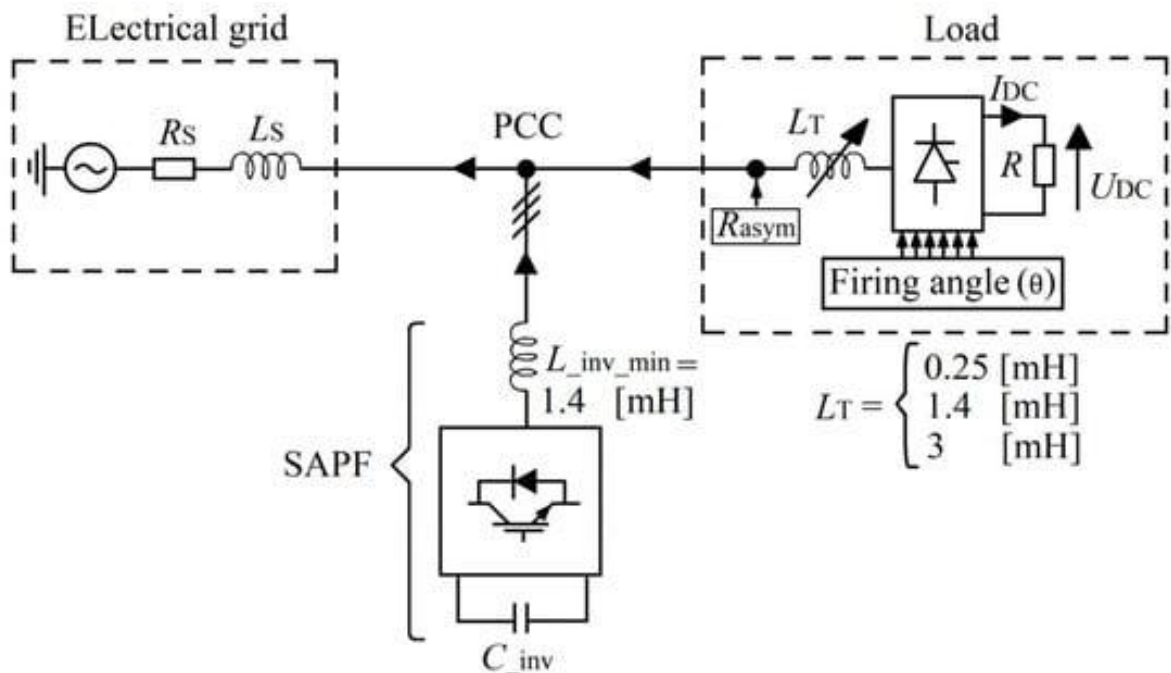


Рисунок 2.15. – Еквівалентна схема змодельованої енергосистеми

Форми сигналів напруги мережі та струму на рисунку 2.16 а–с показують, що у випадках SAPF з індуктивністю вхідного реактора, рівною або меншою за індуктивність вхідного реактора тиристорного моста, пульсації, викликані високою швидкістю зміни струму в точках комутації виїмки краще зменшити (див. форми струму на рисунку 2.16 б, с). Справа, в якій $L_{inv_min} < L_T$ представляє найкращу форму хвиль струму сітки (рис. 2.16 с).

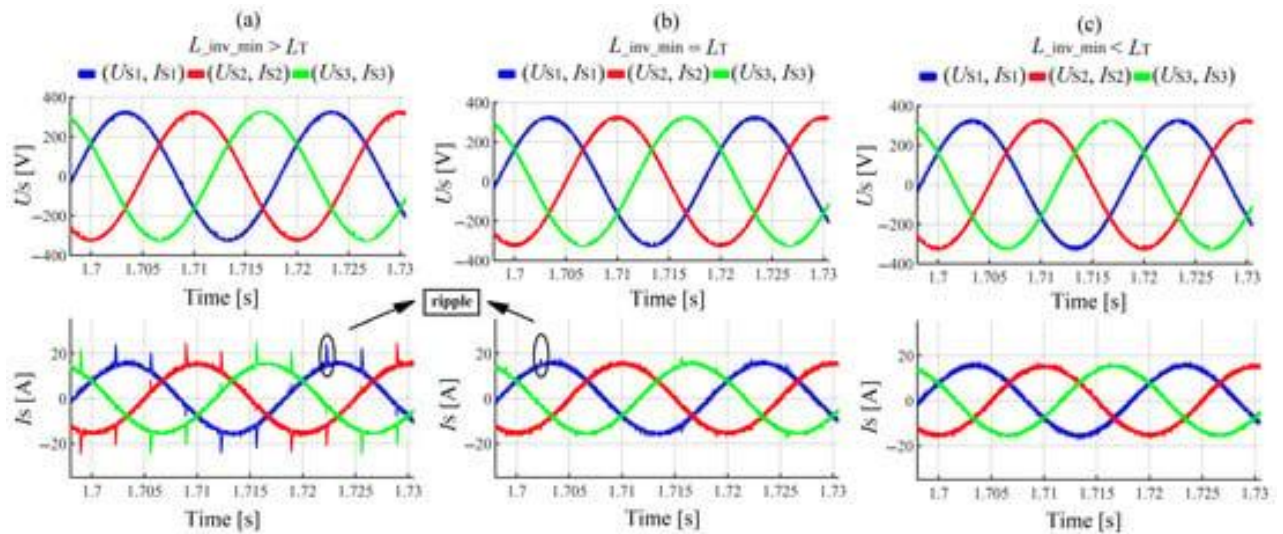


Рисунок 2.16. – Осцилограми напруги та струму РСС для різних значень індуктивності вхідного реактора тиристорного моста: (а) $L_{inv_min} > L_T$, (б) $L_{inv_min} = L_T$, (с) $L_{inv_min} < L_T$

У таблиці 2.7 представлені значення напруги РСС і основної гармоніки струму мережі до і після підключення SAPF. Справа $L_{inv_min} < L_T$ (порівняно з іншими випадками) представляє найменше значення основної гармоніки струму мережі.

Таблиця 2.7. – Основні гармоніки напруги та струму мережі до та після підключення SAPF.

	Before the SAPF Connection $L_T = 1 \text{ nH}$				$L_{in_min} > L_T$				After the SAPF Connection $L_{inv_min} = L_T$				$L_{inv_min} < L_T$			
	$U_{S(1)}$ (V)		$I_{S(1)}$ (A)		$U_{S(1)}$ (V)		$I_{S(1)}$ (A)		$U_{S(1)}$ (V)		$I_{S(1)}$ (A)		$U_{S(1)}$ (V)		$I_{S(1)}$ (A)	
L1	RMS	Phase	RMS	Phase	RMS	Phase	RMS	Phase	RMS	Phase	RMS	Phase	RMS	Phase	RMS	Phase
L2	230.8	30°	12.43	21.7°	230.8	30°	10.41	29.4°	230.8	30°	10.29	29.4°	230.8	30°	10.14	29.5°
L3	230.7	270°	14.92	235.4°	230.7	270°	10.4	269.2°	230.7	270°	10.3	269.3°	230.8	270°	10.14	269.3°
	230.7	150°	8.29	111.90°	230.7	150°	10.37	149.3°	230.7	150°	10.28	149.3°	230.8	150°	10.11	149.4°

У таблиці 2.8 можна помітити, що найкращі результати щодо струму мережі та напруги THD та пом'якшення основної гармоніки реактивної потужності та асиметрії досягаються, коли L_{inv_min} дорівнює або менше L_T .

Таблиця 2.8. – Напруга мережі та струм КНІ, а також реактивна та активна потужність до та після підключення SAPF.

	Before the SAPF Connection					After the SAPF Connection				
	$L_T = 1 \text{ nH}$	$L_{inv_min} > L_T$	$L_{inv_min} = L_T$	$L_{inv_min} < L_T$		$L_T = 1 \text{ nH}$	$L_{inv_min} > L_T$	$L_{inv_min} = L_T$	$L_{inv_min} < L_T$	
	THD _{US} (%)	THD _{IS} (%)	Q _{S(t)} (Var)	P _{S(t)} (W)	k _{asym} (%)	THD _{US} (%)	THD _{IS} (%)	Q _{S(t)} (Var)	P _{S(t)} (W)	k _{asym} (%)
L1	0.25	28.07	414.08	2838.4		0.15	8.77	25.15	2402.5	
L2	0.25	23.41	1954.5	2833.1	33.25	0.15	8.75	33.51	2400.1	0.30
L3	0.25	42.07	1181.8	1507.2		0.15	8.77	29.24	2393.2	

After the SAPF Connection										
	TH _{US} (%)	THD _{IS} (%)	Q _{S(t)} (Var)	P _{S(t)} (W)	k _{asym} (%)	THD _{US} (%)	THD _{IS} (%)	Q _{S(t)} (Var)	P _{S(t)} (W)	k _{asym} (%)
L1	0.04	2.47	24.86	2374.8		0.02	1.22	20.42	2340.2	
L2	0.05	2.91	29.04	2377.1	0.30	0.02	1.49	28.59	2340.1	0.20
L3	0.05	2.79	28.98	2372.4		0.02	1.22	24.43	2333.3	

ТТНД напруги РСС і струму мережі представлені в таблиці 2.9. Справа $L_{inv_min} < L_T$ демонструє найкращі результати щодо струму мережі ТТНД_{IS} і найгірші результати щодо напруги РСС ТТНД_{US}.

Таблиця 2.9. – Напруга РСС і струм мережі ТТНД для різних значень індуктивності вхідного реактора тиристорного моста.

	After the SAPF Connection					
	$L_{inv_min} > L_T$	$L_{inv_min} = L_T$	$L_{inv_min} = L_T$	$L_{inv_min} = L_T$	$L_{inv_min} < L_T$	$L_{inv_min} < L_T$
	ТТНД _{US} (%)	ТТНД _{IS} (%)	ТТНД _{US} (%)	ТТНД _{IS} (%)	ТТНД _{US} (%)	ТТНД _{IS} (%)
L1	3.12	12.60	3.18	7.16	3.30	6.59
L2	2.77	13.77	2.85	8.08	2.92	6.82
L3	3.12	13.40	3.23	7.20	3.29	6.11

Форми сигналів еталонного струму в порівнянні з компенсаційним струмом представлені на рисунку 2.17 а–с. Видно, що у випадку з $L_{inv_min} < L_T$, опорний струм і компенсаційний струм відповідають один одному (рис. 2.17 с). Збільшення тиристорно–мостової вхідної індуктивності реактора L_T до значення, що дорівнює або перевищує вхідну індуктивність реактора SAPF (L_{inv_min}) зменшив швидкість зміни струму на комутаційних вирізах, дозволяючи відстежувати опорний струм шляхом компенсації струму (рис. 2.17 b,c).

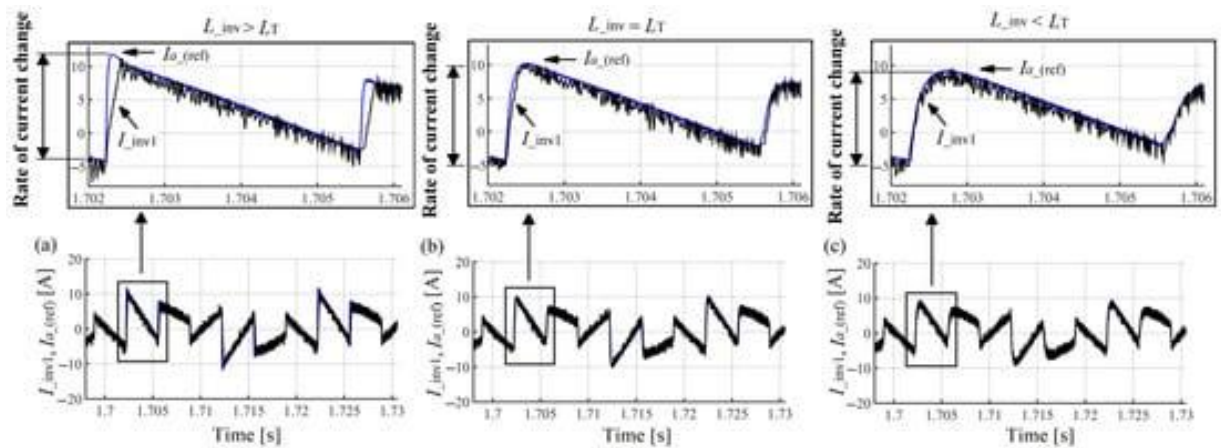


Рисунок 2.17. – Порівняння форми сигналу опорного та компенсаційного струму контуру керування (3) : (а) $L_{inv_min} > L_T$, (б) $L_{inv_min} = L_T$, (в) $L_{inv_min} < L_T$

На рисунку 2.18 представлено ефективність роботи SAPF з точки зору пом'якшення характерних гармонік на стороні мережі. Спостерігаючи за цим малюнком, можна побачити, що жодна гармоніка не посилюється (гармоніки нижче 100%) на стороні сітки. Випадок, коли $L_{inv_min} < L_T$ демонструє (порівняно з іншими випадками) кращі результати щодо пом'якшення характеристик гармонік на стороні мережі.

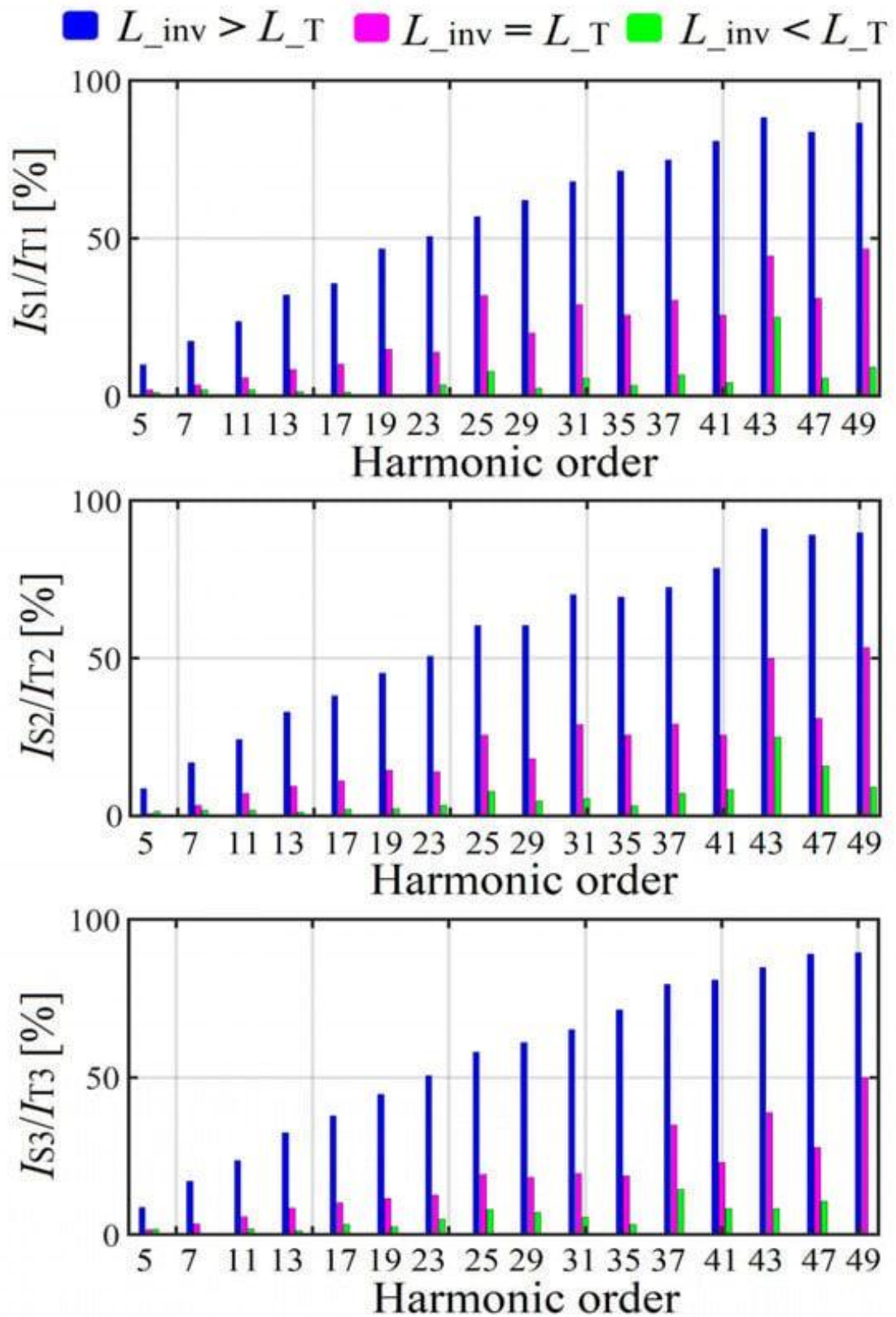


Рисунок 2.18. – Ефективність продуктивності SAPF з точки зору пом'якшення характерних гармонік на стороні мережі (для $L_{inv_min} > L_T$, $L_{inv_min} = L_T$, $L_{inv_min} < L_T$)

Приклад помилок форми сигналу на вході ПІ-регулятора представлено на рисунку 2.19 а–с. Осцилограми напруги конденсатора постійного струму SAPF розглянуті на рисунку 2.19 d.

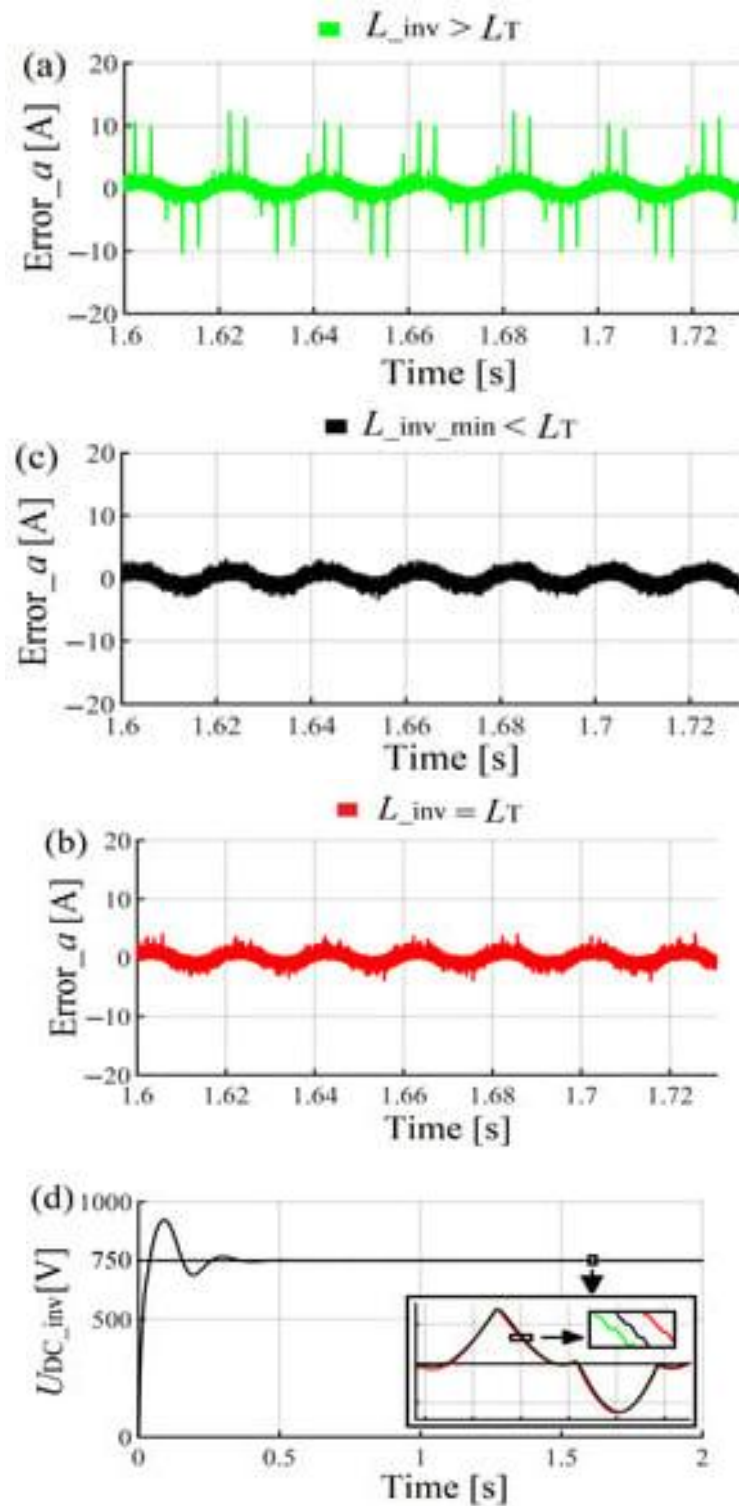


Рисунок 2.19. (а – с) – приклад сигналів помилки на вході ПІ-регулятора (контур керування (3)), (d) напруга постійного струму на конденсаторі інвертора

На рисунку 2.20 представлена напруга конденсатора постійного струму SAPF для різних значень ємності. Також можна спостерігати динамічний відгук алгоритму системи керування зі зменшенням і збільшенням опору постійному струму тиристорного моста (зміна навантаження).

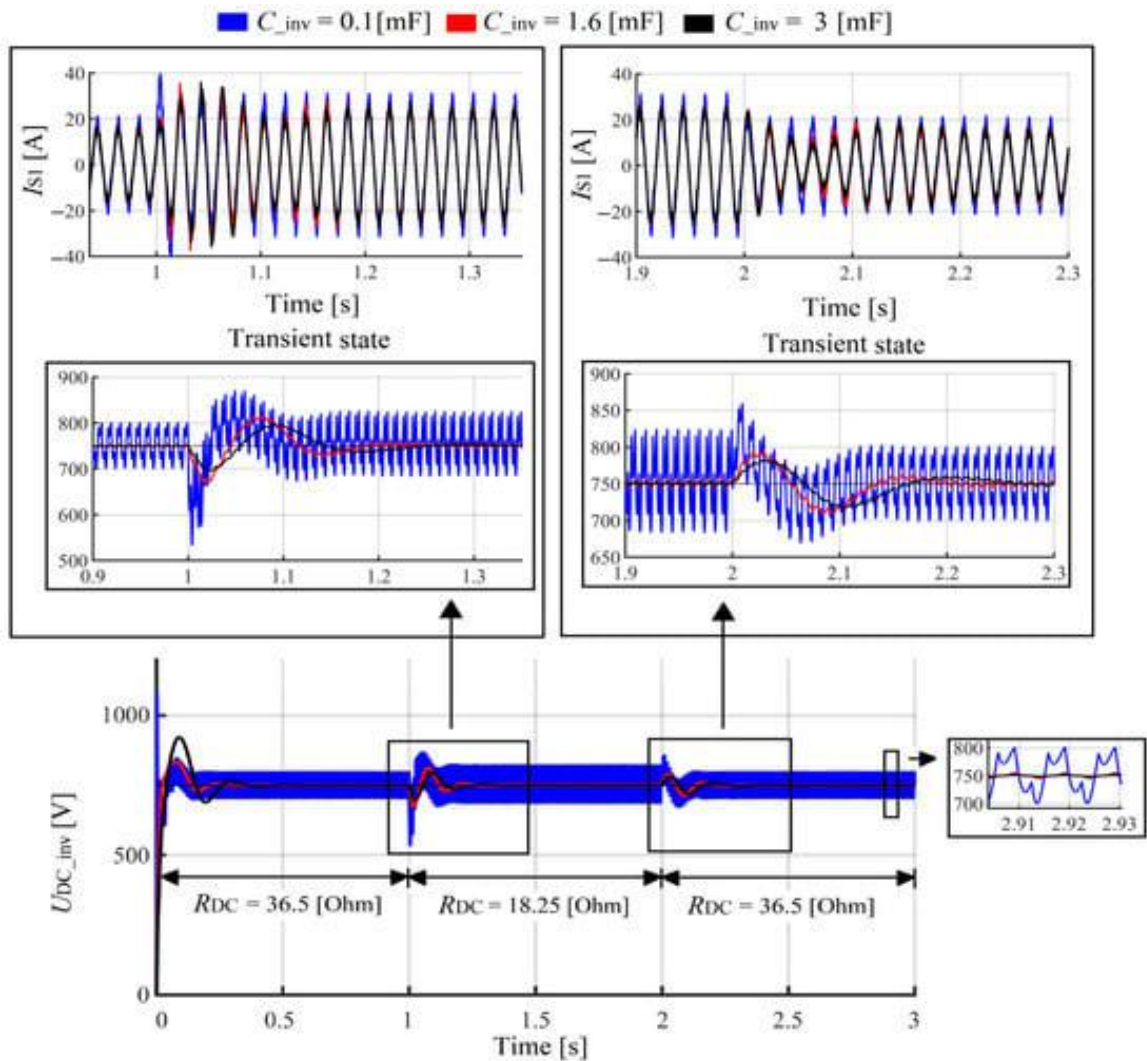


Рисунок 2. 20. – Осцилограми постійної напруги конденсатора для різної ємності: спостереження перехідного стану після зміни опору постійного струму тиристорного моста (R_{DC})

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У цьому прикладі результати другого дослідження чітко показали, що розмір вхідного реактора з тиристорним мостом впливає на ефективність роботи SAPF. SAPF з індуктивністю вхідного реактора, рівною або меншою за індуктивність на вході тиристорного моста, демонструє найкращі результати щодо напруги мережі та струму КНІ, а також щодо реактивної потужності та пом'якшення асиметрії. SAPF є більш ефективним з точки зору пом'якшення характерних гармонік на стороні мережі, коли $L_{inv} < L_T$. Індуктивність вхідного реактора SAPF необхідно розраховувати (вибирати) з урахуванням розміру вхідного реактора тиристорного моста (див. вираз (2.18)). $\Delta U_{L_{inv}}$ слід вибирати таким чином, щоб отримати $L_{inv} < L_T$:

$$L_{inv} = \frac{3\Delta U_{L_{inv}}}{\omega_{(1)}(I_{a_{(ref)}} + I_{b_{(ref)}} + I_{c_{(ref)}})} < L_T \quad (2.18)$$

РОЗІДЛ 3. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження впливу тиристорно–мостового вхідного реактора (L_T) на SAPF характеристики були представлені раніше на основі моделювання. Під час лабораторних дослідів були проведені такі ж дослідження.

3.1. Опис моделі лабораторії

Лабораторна установка представлена на рисунку 3.1, а її еквівалентна схема – на рисунку 3.2. Навантаження складалося з трифазного тиристора–моста з опором R_{DC} і реактор L_{DC} на стороні постійного струму, а також комутаційний реактор L_T на стороні змінного струму. Для отримання умови асиметрії струму використовувався однофазний діодний міст з опором 24 Ом на стороні постійного струму. Лабораторні дані вимірюються за допомогою апаратного аналізатора PQ «PQ–Box 200» (a–eberle, Нюрмберг, Німеччина) [79].

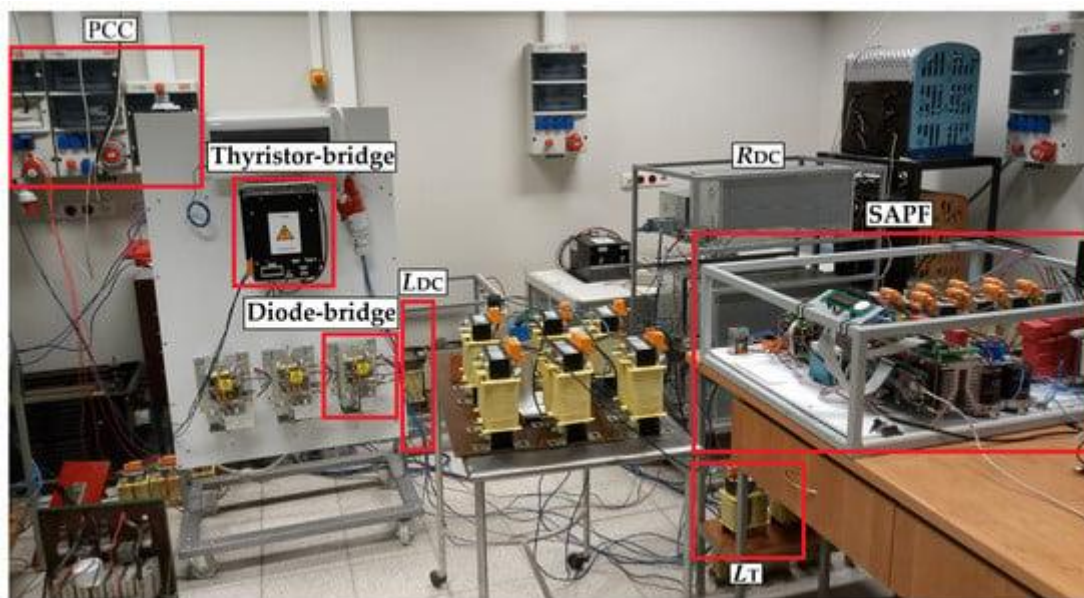


Рисунок 3.1. – Облаштування лабораторії

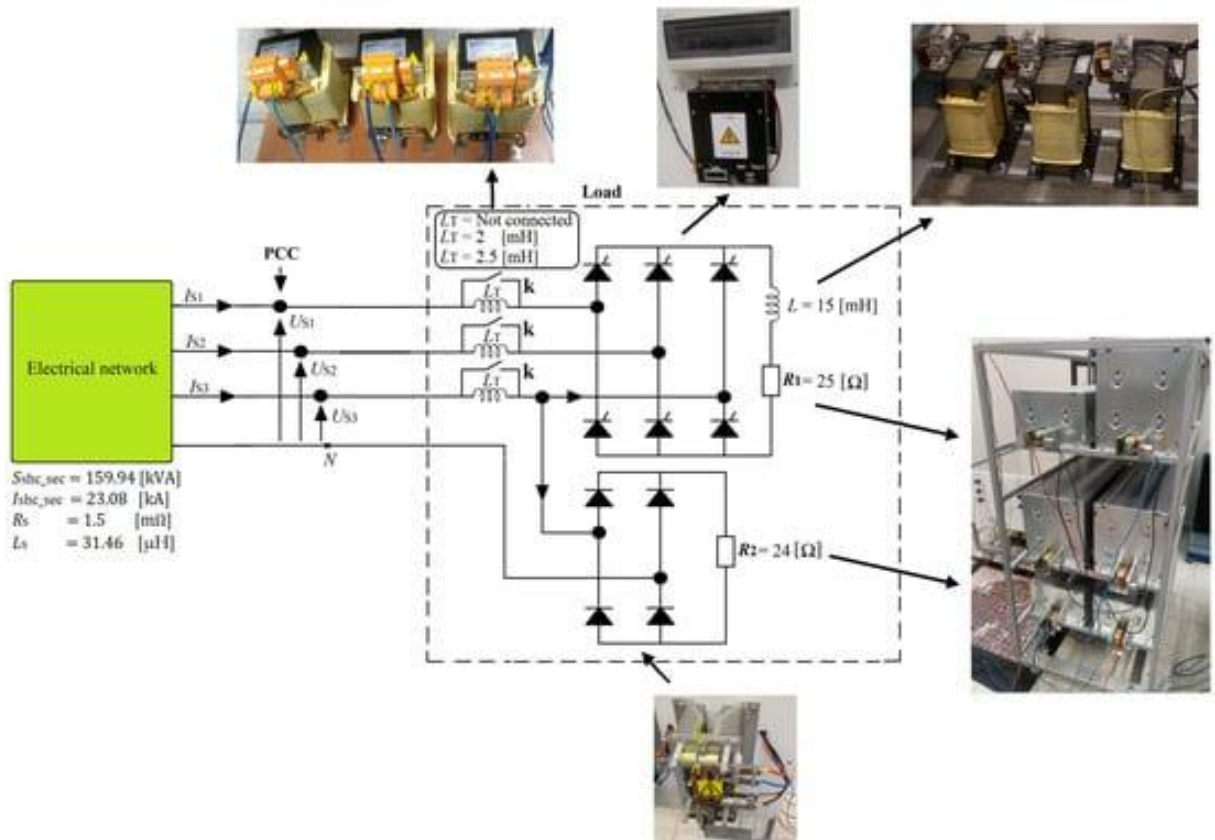


Рисунок 3.2. – Схема заміщення лабораторної установки з компонентами.

Напруга електричної мережі, що живить лабораторну установку, є симетричною (негативна послідовність становить близько 0,12% позитивної послідовності), але трохи спотворена (Рисунок 3.3 а) через інші підключені нелінійні пристрої. Його спектр на рисунку 3.3 б показує, що домінуючими гармоніками є 5-та (близько 2%), 3-тя (більше 1%) і 7-ма (майже 1%). Відповідно до стандарту IEC61000-2-4 [80], його КНІ та амплітуда гармонік є прийнятними (рис. 3.3 б).

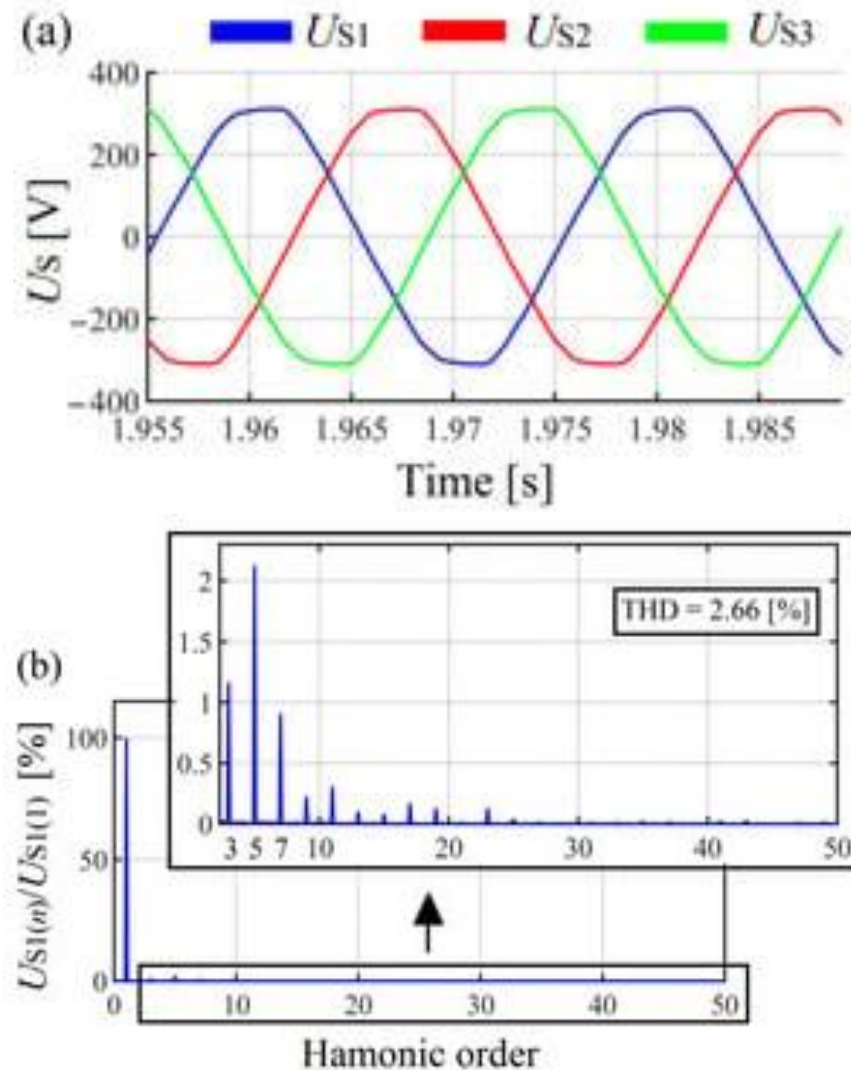


Рисунок 3.3. Виміряна напруга РСС перед навантаженням і з'єднанням САПФ: (а) осцилограми; (б) спектр

САПФ, що використовується для лабораторних досліджень, являє собою трифазову чотирипровідну структуру з реактором L_{inv} на його вході (рис. 3.4). Вхідне значення реактора ($L_{inv} = 2$ мГн) було обрано для кращої фільтрації пульсацій перемикачів та кращого відгуку сигналу зворотного зв'язку в системі керування. Система управління заснована на алгоритмі миттєвої теорії pq і методі управління ШІМ. У контурі регулювання, де проходить компенсуючий струм I_{inv123} порівнюється з опорним струмом i_{abc_ref} використовується звичайний ПІ-регулятор. Частота перемикачів САПФ ($f_{inv} =$

14,63 кГц) було обрано на основі втрат транзистора та стану апаратного забезпечення системи керування.

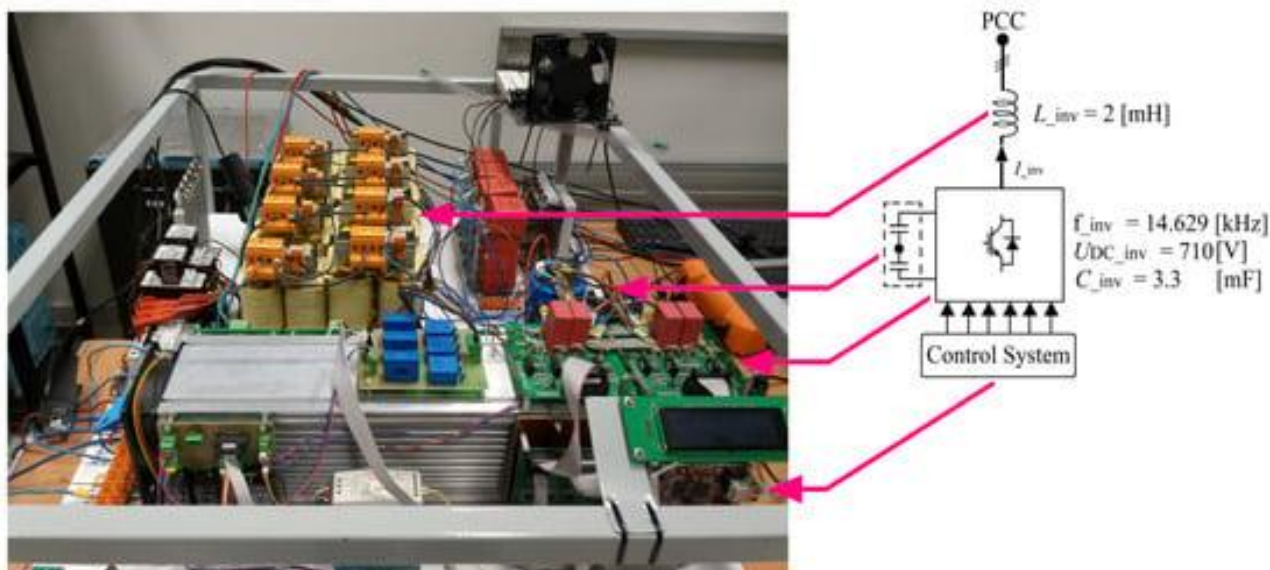


Рисунок 3.4. – Лабораторна модель триланкового чотирипровідного САПФ

Лабораторні експерименти були зосереджені не на конструкції САПФ з його системою керування, а на впливі випрямного колекторного реактора (L_T) про результати діяльності ДПФК. Експерименти проводились при підтримці постійних параметрів SAPF (з його системою керування), а також тиристорно–мостових компонентів постійного струму.

3.2. Лабораторні результати

Виміряні форми та спектри напруги PCC і струму мережі перед підключенням SAPF (L_T не підключено) представлені на рисунку 3.5. Можна спостерігати спотворення напруги та струму PCC (THD_{US} , THD_{IS}), асиметрію струму, реактивну потужність основної гармоніки, а також високу швидкість зміни струму в точках комутаційних вирізів (див. форми сигналів струму на рисунку 3.5).

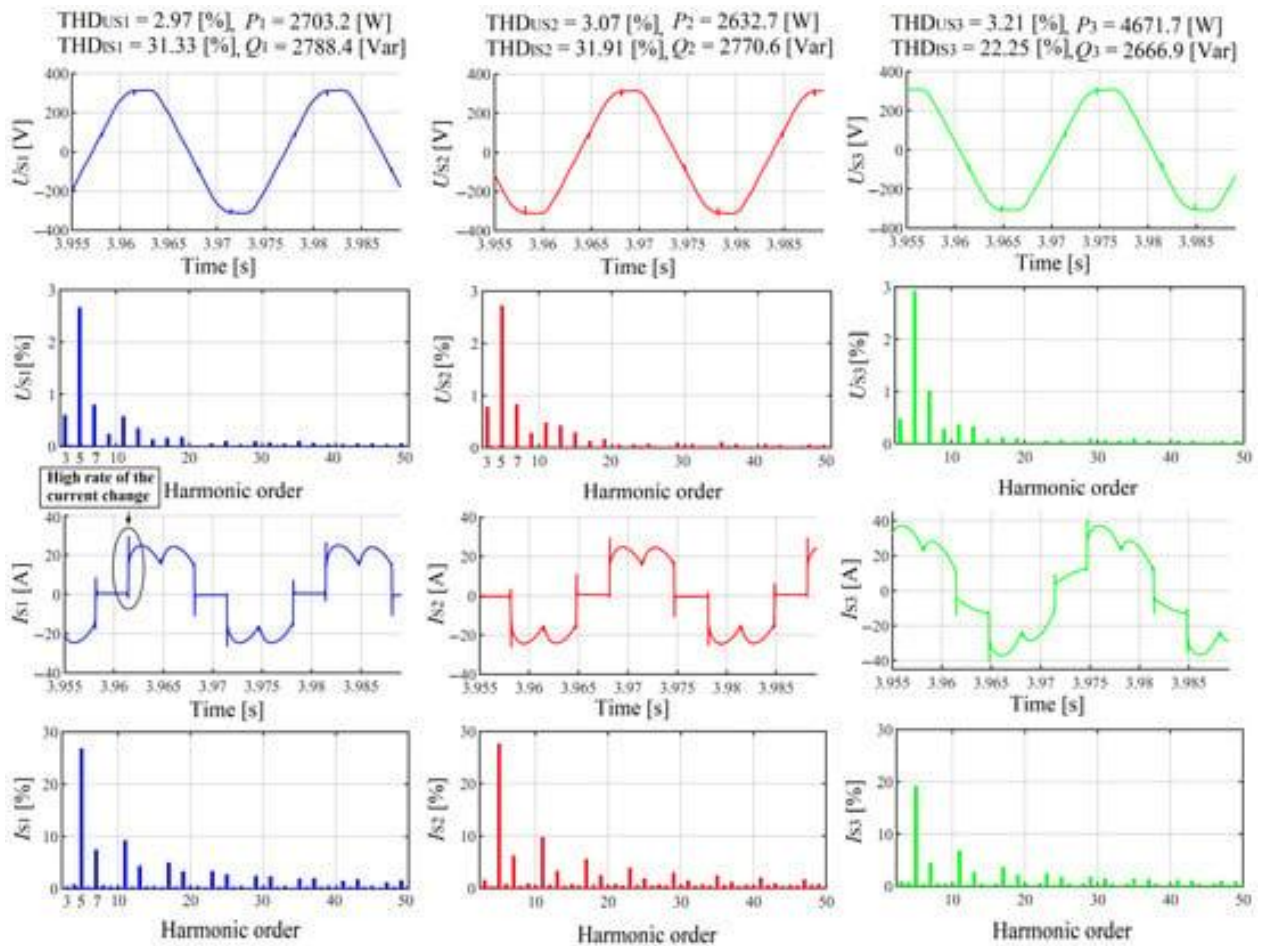


Рисунок 3.5. – Виміряні форми сигналів напруги мережі та струму зі спектрами перед підключенням SAPF (L_T не підключено)

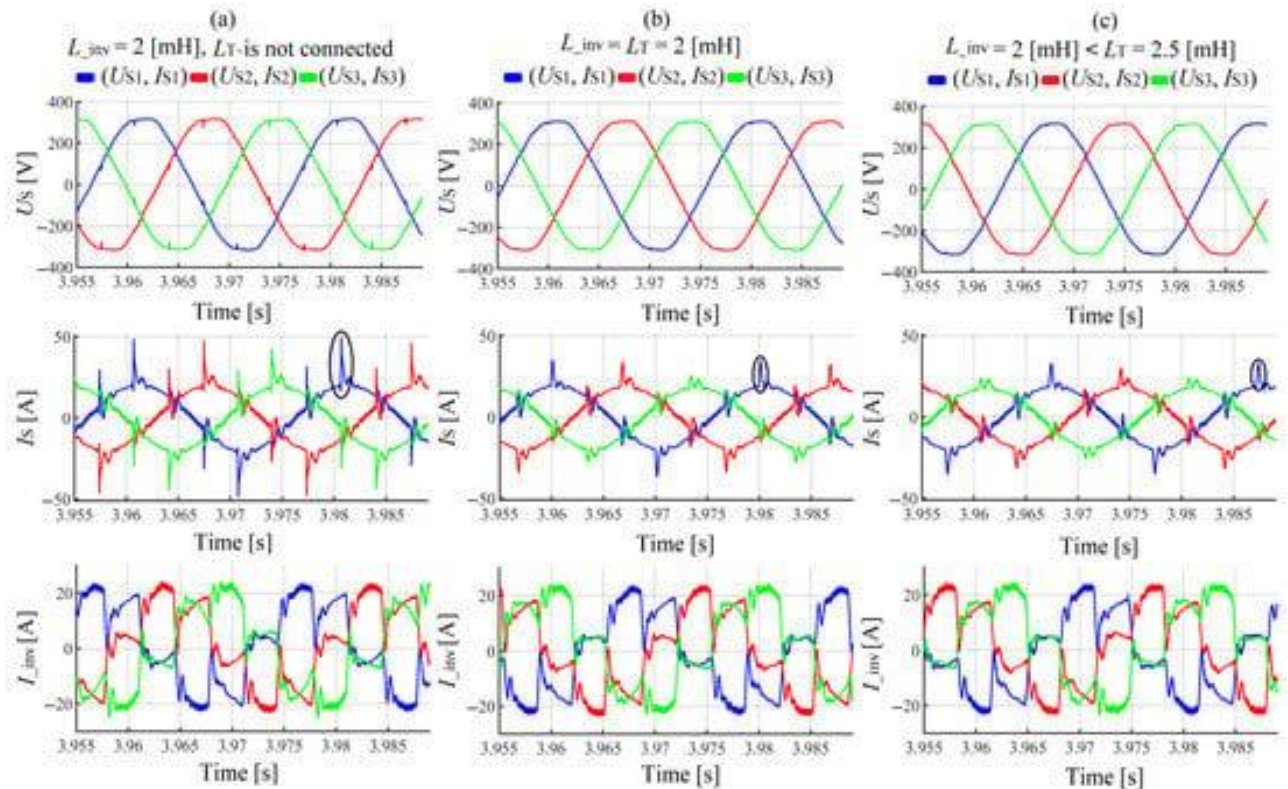


Рисунок 3.6. Порівняння напруги мережі (U_s) і поточний (I_s) і струм SAPF (L_{inv}) сигнали: (a) L_T не підключено, (b) $L_T = L_{inv} = 2$ мГн і (c) $L_{inv} = 2$ мГн < $L_T = 2,5$ мГн. Коло на осцилограмах струму сітки (I_s) представляє хвилі на комутаційних пазах

Три тематичні дослідження, засновані на зміні індуктивності вхідного реактора тиристорного моста (L_T) розглядаються після підключення SAPF: у першому, $L_{inv} > L_T$ (перемикач k замкнутий, рис. 3.2), у другому $L_T = L_{inv} = 2$ мГн (k відкрито) і в третьому $L_{inv} = 2$ мГн < $L_T = 2,5$ мГн (k відкрито).

Експериментальні результати, показані на рисунку 3.6 с, у порівнянні з результатами на рисунку 3.6 а, б, показують, що коли індуктивність вхідного реактора SAPF менша за індуктивність вхідного реактора випрямляча, пульсації напруги РСС і форми струму мережі краще зменшуються SAPF в точках комутаційних виїмок.

Рисунок 3.6 а в порівнянні з рисунком 3.6 б, с показує, що коли індуктивність вхідного реактора SAPF дорівнює або менша, ніж індуктивність вхідного лінійного реактора тиристорного моста L_T , комутаційні виїмки напруги РСС зменшуються ефективніше.

На рисунку 3.6 b, c можна побачити, що коли індуктивність вхідного реактора інвертора дорівнює або є меншою за індуктивність лінії-реактора випрямляча, форма сигналу струму мережі пульсує (комутаційні пульсації) із високою швидкістю зміни струму (див. також форми струму на рисунку 3.5) більш ефективно зменшуються SAPF.

На рисунку 3.7 представлено (для трьох прикладів) порівняння напруги РСС і спектрів струму мережі та THD, а також активних і реактивних потужностей основної гармоніки мережі. У кожному випадку розглядається лише одна фаза, оскільки струм мережі вирівнюється після підключення SAPF. Справи $L_{inv}=L_T$ і $L_{inv} \leq L_T$ представити більш ефективні результати (як у випадку моделювання) з точки зору THD_{US} , THD_{IS} та пом'якшення реактивної потужності мережі (див. рисунок 3.7 c).

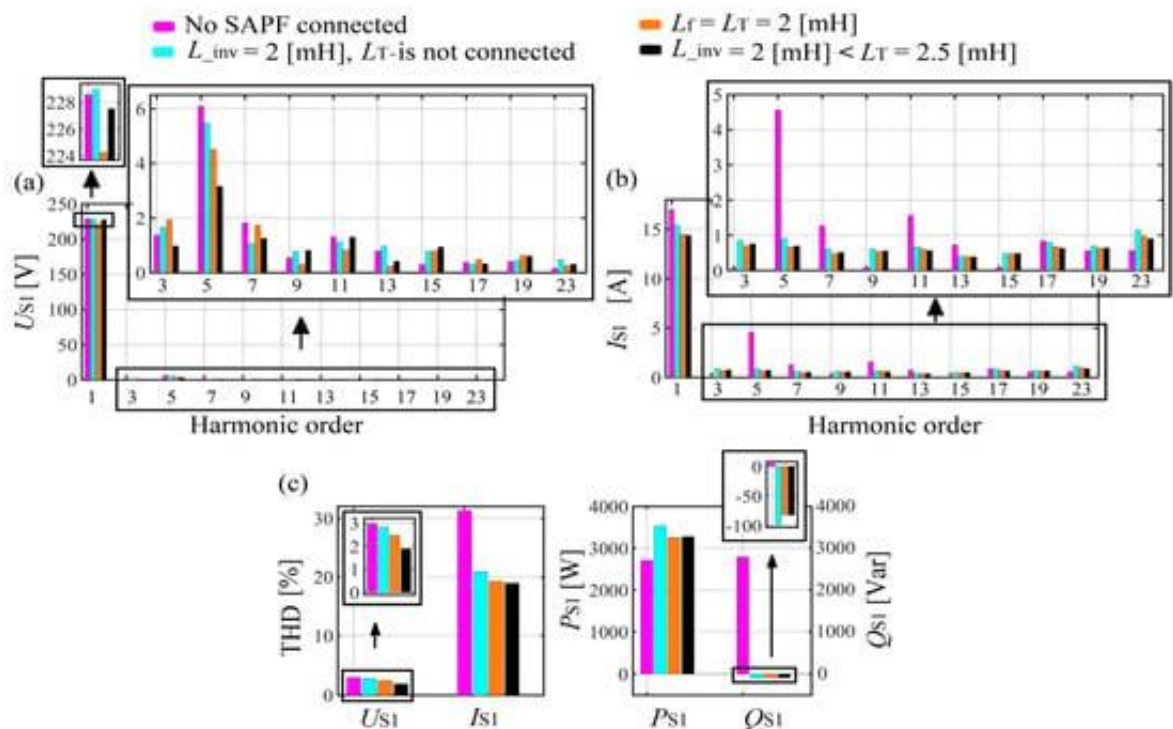


Рисунок 3.7. – Порівняння: (a) спектрів напруги РСС, (b) спектрів струму РСС та (c) напруги РСС і струму THD, активний (P1) і реактивної потужності (Q1)

Спостерігаючи за спектрами напруги РСС і струму мережі на рисунках 3.7 a,b, можна побачити, що після підключення SAPF і під час експериментів певні гармоніки зменшуються (наприклад, 5-та), а інші посилюються

(наприклад, 19-та, 23-я). Це явище пов'язане з тим, що гармоніки, що надходять від мережі (див. спектр на рисунку 3.3 b), додаються або віднімаються до решти гармонік, що надходять від навантаження після фільтрації. Напруга живлення містить гармоніки, які можуть впливати на ефективність роботи SAPF з точки зору пом'якшення гармонік.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Лабораторні експерименти підтвердили результати моделювання. Отже, для кращого зменшення пульсацій напруги мережі та струму в точках комутаційних вирізів сигналів, індуктивність реактора (фільтру першого порядку), підключеного до входу SAPF для пом'якшення пульсацій комутації, має бути меншою за індуктивність діода або тиристорний вхідний реактор, так званий комутаційний реактор.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі проведено аналіз впливу розміру 6-імпульсного тиристорно-мостового вхідного реактора на ефективність роботи SAPF. По-перше, були представлені дослідження моделювання, а по-друге, були проведені лабораторні експерименти для підтвердження досліджень моделювання. Приклад, представлений у цьому дослідженні, чітко показав, що розмір лінійного реактора на вході тиристорного мосту впливає на ефективність роботи SAPF. У цьому дослідженні було продемонстровано, що:

– якщо параметри вхідного реактора SAPF обчислюються (вибираються) лише на основі критеріїв кращого зменшення пульсацій перемикавання (що означає великий розмір цього реактора), ефективність роботи SAPF з точки зору реактивної потужності, гармонік та пом'якшення реактивної потужності може бути зменшено.

– SAPF з індуктивністю вхідного реактора, вищою за індуктивність вхідного реактора тиристорного моста, менш ефективний з точки зору пом'якшення пульсацій у точках комутаційних вирізів, оскільки в цих точках компенсаційний струм має труднощі з відстеженням опорного струму.

– SAPF з індуктивністю вхідного реактора, рівною або меншою за індуктивність вхідного реактора тиристорного моста, є більш ефективним з точки зору пом'якшення пульсацій у точках комутаційних вирізів, оскільки в цих точках компенсаційний струм може легко відстежувати опорний струм.

– SAPF з індуктивністю вхідного реактора, що дорівнює або менша за індуктивність вхідного реактора тиристорного мосту, є більш ефективним з точки зору реактивної потужності, гармонік і пом'якшення асиметрії, ніж той, у якого індуктивність вхідного реактора перевищує індуктивність вхідного реактора тиристора. – міст.

В електросистемі необхідний лінійний реактор на тиристорно-мостовому вводі; тому це слід враховувати при розрахунку параметрів вхідного реактора SAPF (L – фільтр). У цій ьому дослідженні запропоновано вирази для

розрахунку параметрів SAPF (вхідної індуктивності реактора, напруги та індуктивності конденсатора постійного струму), а також запропоновано алгоритм системи керування на основі теорії миттєвої р_q.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України : Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665-III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80> .

9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021-2030 роки: Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
11. Bhattacharyya, S.; Myrzik, J.M.A.; Kling, W.L. Consequences of poor power quality—An overview. In Proceedings of the IEEE 42nd International Universities Power Engineering Conference, Brighton, UK, 4–6 September 2007. [Google Scholar]
12. Bhattacharyya, S.; Lumig, M.V.; Cobben, S.; Myrzik, J.; Kling, W. Consequences of poor power quality for grid operators. In Proceedings of the IEEE 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution—Part 2, Prague, Czech Republic, 8–11 June 2009. [Google Scholar]
13. Tazky, M.; Regula, M.; Otcenasova, A. Impact of changes in a distribution network nature on the capacitive reactive power flow into the transmission network in Slovakia. *Energies* 2021, 14, 5321. [Google Scholar] [CrossRef]
14. Shawon, M.H.; Hanzelka, Z.; Dziadecki, A. Voltage-current and harmonic characteristic analysis of different FC-TCR based SVC. In Proceedings of the IEEE Conference Eindhoven PowerTech, Eindhoven, The Netherlands, 29 June–2 July 2015. [Google Scholar]
15. Abdelhafez, A.A.; Alruways, S.H.; Alsaif, Y.A.; Althobaiti, M.F.; Alotaibi, A.B.; Alotaibi, N.A. Reactive power problem and solutions: An overview. *J. Power Energy Eng.* 2017, 5, 40–54. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Kuldeep, K.S.; Saquib, S.; Nanand, V.P. Harmonics & its mitigation technique by passive shunt filter. *Int. J. Soft Comput. Eng. (IJSCE)* 2013, 3, 325–331. [Google Scholar]
17. Singh, G.K. Power System Harmonic Research: A Survey. *Eur. Trans. Electr. Power* 2009, 19, 151–172. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Wagner, V.E. Effects of harmonics on equipment. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1993,

- 8, 672–680. [Google Scholar] [CrossRef]
19. Bennett, P.C.; Darley, V.; Abbott, S.M. The effects of harmonic distortion on equipments. In Proceedings of the IEEE Colloquium on Sources and Effects of Harmonic Distortion in Power Systems, London, UK, 5 March 1997. [Google Scholar]
20. Buzdugan, M.I.; Balan, H. Power system harmonics issues in some end. In Proceedings of the 52nd IEEE International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion, Greece, 28–31 August 2017. [Google Scholar]
21. Plummer, I. Assymetry in Distribution Systems: Causes, Harmful Effects and Remedies. LSU Master's Thesis. Available online: https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=2489&context=gradschool_theses (accessed on 1 March 2023).
22. Jouanne, A.V.; Banerjee, B. Assessment of voltage unbalance. IEEE Trans. Power Deliv. 2001, 16, 782–790. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Lee, K.; Jahns, T.M.; Lipo, T.A.; Venkataramanan, G.; Berkopec, W.E. Impact of input sag and unbalance on DC-link inductor and capacitor stress in adjustable-speed drives. IEEE Trans. Ind. Appl. 2008, 44, 1825–1833. [Google Scholar] [CrossRef]
24. Horia, G.B.; Sorin, G.P.; Iulian, M.T.B.; Anca, M.; Pompei, C.D.; Mohammed, S. Effects of voltage unbalance and harmonics on drive systems with induction motor. J. Taibah Univ. Sci. 2022, 16, 1. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Driesen, J.; Craenenbroeck, T.V. Voltage Disturbances Introduction to Unbalance. Power Quality Application Guide, Katholieke Universiteit Leuven, May 2002. Available online: <https://studylib.net/doc/18037296/5.1.3-introduction-to-unbalance> (accessed on 7 October 2023).
26. Osahenvemwen, O.A.; Okhumeode, M.E.; Emakpor, S. The Effects of Unbalance Load in Power Distribution Sub—Station Network. Am. J. Sci. Eng. Res. 2020, 3, 1–11. Available online: <https://www.researchgate.net/publication/344188516> (accessed on 13 March 2023).
27. Arghavani, H.; Peyravi, M. Unbalanced current based tariff. In Proceedings of the

- CIREN 24th International Conference on Electricity Distribution, Glasgow, Scotland, 12–15 June 2017. [Google Scholar]
28. Kahingala, T.D.; Perera, S.; Agalgaonkar, A.P.; Jayatunga, U. Statcom based network voltage unbalance mitigation for sub-transmission networks. In Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies—Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, 21–24 May 2019. [Google Scholar]
 29. Singh, A.K.; Singh, G.K.; Mitra, R. Impact of source voltage unbalance on AC-DC rectifier performance. In Proceedings of the IEEE 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong, China, 12–14 November 2006. [Google Scholar]
 30. EIC 61000-2-4. Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 2-4: Environment Levels in Industry Plants for Low-Frequency Conducted Disturbances. Second edition 2002-06. Available online: https://www.vde-verlag.de/iec-normen/preview-pdf/info_iec61000-2-4%7Bed2.0%7Db.pdf (accessed on 21 December 2020).
 31. Klempka, R. Design of C-type passive filter for arc furnaces. *Metalurgia* 2017, 56, 161–163. [Google Scholar]
 32. Azebaze, M.C.S.; Hanzelka, Z. Passive harmonic filters. In *Power Quality in Future Electrical Power Systems*, 1st ed.; Zobaa, A.F., Shady, H.E.A.A., Eds.; IET the Institution of Engineering and Technology: London, UK, 2017. [Google Scholar]
 33. Klempka, R. Optimal Double-Tuned Filter Efficiency analysis. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2020, 36, 1079–1088. [Google Scholar] [CrossRef]
 34. Firlit, A.; Kołek, K.; Piątek, K. Heterogeneous active power filter controller. In Proceedings of the IEEE International Symposium ELMAR, Zadar, Croatia, 18–20 September 2017. [Google Scholar]
 35. Azebaze, M.C.S.; Hanzelka, Z. Different approaches for designing the passive power filters. *Przegląd Elektrotechniczny* 2015, 91, 102–108. [Google Scholar]
 36. Piątek, K. A new approach of DVR control with minimized energy injection. In Proceedings of the IEEE 12th International conference on Power Electronics and motion Control, Portoroz, Slovenia, 30 August–1 September 2006. [Google

Scholar]

- 37.Azebaze, M.C.S.; Hanzelka, Z. Hybrid passive harmonic filter: Group of two parallel connected single-tuned filters and the series passive filter. In Polish-Hybrydowy Filtr Pasywny: Grupa Dwóch Jednogałęziowych Filtrów Równoległych Połączonych z Filtrem Szeregowym; Grupa MEDIUM Sp. z o.o. Sp.k.-a: Cracow, Poland, 2022; pp. 64–70. [Google Scholar]
- 38.Ehsan, P.; Masood, A.A. Efficient procedures to design and characterize passive harmonic filters in low power applications. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Bari, Italy, 4–7 July 2010. [Google Scholar]
- 39.Reynaldo, R.; Gregory, A.F. Optimal harmonic filter topology applied in HV and EHV networks using particle swarm optimization. In Proceedings of the IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Ottawa, ON, Canada, 12–14 October 2016. [Google Scholar]
- 40.Gumilar, L.; Afandi, A.N.; Aripriharta; Habibi, M.A.; Kusumawardana, A.; Baskoro, A. Performance of combination shunt passive harmonic filter and detuned reactor at high voltage level. In Proceedings of the IEEE 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE), Malang, Indonesia, 2 October 2021. [Google Scholar]