

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Марчук Валентин Олександрович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Компенсація реактивної потужності споживачів із нелінійним навантаженням у
розподільчих мережах 6-10 кВ
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Марчук В.О.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Рассадкіна М.В.

(прізвище, ім'я, по батькові)

канд. фіз.-мат. наук доцент кафедри

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Марчук В.О. Компенсація реактивної потужності споживачів із нелінійним навантаженням у розподільчих мережах 6-10 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Компенсація реактивної потужності в розподільчих мережах 6-10 кВ з нелінійними навантаженнями є складним, але необхідним завданням. Підвищення якості електроенергії та зменшення експлуатаційних витрат вимагають від енергетичних компаній впровадження нових технологій і підходів до регулювання реактивної потужності.

В роботі розроблені технічні пропозиції щодо вибору електрообладнання нелінійного навантаження з зменшеним впливом на розподільчу мережу.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, розподільчі мережі, якість електроенергії

ANNOTATION

Marchuk V.O. Compensation of reactive power for consumers with nonlinear loads in 6-10 kV distribution networks. Qualification work for obtaining the educational master's degree in the specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

Compensating reactive power in 6-10 kV distribution networks with nonlinear loads is a complex yet essential task. Improving the quality of electric power and reducing operational costs require energy companies to implement new technologies and approaches to reactive power regulation.

Technical proposals have been developed regarding the selection of electrical equipment for nonlinear loads with a reduced impact on the distribution network.

Keywords: reactive power compensation, distribution networks, power quality.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ГАРМОНІЧНІ СПОТВОРЕННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ	7
1.1 Вплив нелінійних навантажень на якість електроенергії та гармонійні спотворення"	7
1.2 Показники та вимірювання гармоніки.	13
1.3 Способи коригування гармонічних коливань.	16
1.4. Технічні засоби з низьким рівнем гармонійних спотворень	21
Висновок по розділу	21
2. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СПОЖИВАЧІВ ІЗ НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	23
2.1 Компенсація реактивної потужності – ключ до енергозбереження	23
2.2 Принцип компенсації реактивної потужності	24
2.3 Способи компенсації реактивної потужності	28
Висновки по розділу	30
3. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ВИБОРУ ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РОЗПОДІЛЬЧУ МЕРЕЖУ	32
3.1 Компенсація реактивної потужності з фільтрацією струмів вищих гармонік – шлях підвищення енергоефективності передачі та розподілу електроенергії	32
3.2 Рекомендації щодо створення заходів для зменшення гармонійних спотворень на підприємствах.	33
Висновки по розділу	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

Техніко-економічна ефективність сучасних систем електропостачання промислових підприємств значною мірою визначається рівнем практичного вирішення комплексу таких завдань, як зниження невиробничих втрат електроенергії та компенсація реактивної потужності у розподільчих мережах; регулювання напруги та забезпечення електромагнітної сумісності.

Якість електричної енергії - це сукупність властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначення. Відповідно до положень пункту 11.4.6 глави 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу, затвердженого постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 (далі – КСР), параметри якості електроенергії в точках приєднання споживачів в нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» (далі – ДСТУ EN 50160:2014). Основні показники якості електричної енергії визначені у пунктах 11.4.7 – 11.4.12 глави 11.4 розділу XI КСР [1].

Незважаючи на значні успіхи, досягнуті в результаті численних досліджень, що виконуються в останні роки в широких масштабах, гострота проблеми ЕМС в системі електропостачання промислових підприємств не послаблюється, а навпаки, набуває глобального характеру. Основною причиною цього є дві категорії об'єктивних факторів, що супроводжують сучасний етап розвитку промислової електроенергетики. З одного боку, вже тривалий час у системі електропостачання промислових підприємств зберігається стійка тенденція прогресуючого зростання кількості та потужності енергоємних нелінійних, несиметричних та різко змінних споживачів електроенергії.

До таких споживачів належать тиристорні перетворювачі, стабілізатори, регулятори, дугові сталеплавильні печі, потужні зварювальні й інші спеціальні електротехнічні установки.

Перераховані вище споживачі погіршують цілу низку показників якості електроенергії та ускладнюють технічне вирішення проблеми забезпечення ЕМС у системі електропостачання промислових підприємств, а також в цілому знижують ефективність передачі, розподілу та споживання електричної енергії.

На сучасних промислових підприємствах значне поширення набули навантаження, вольт-амперні характеристики яких нелінійні. Тиристорні перетворювачі, установки дугового та контактного зварювання, електродугові сталеплавильні та руднотермічні печі, газорозрядні лампи та інше – споживачі, які споживають струм, що надає несинусоїдальне навантаження, внаслідок чого з'являються нелінійні спотворення кривої напруги мережі або несинусоїдальні режими.

Мета роботи - зниження втрат активної потужності, забезпечення вимог керівних документів щодо підтримки показників якості електричної енергії та збільшення пропускної спроможності ЛЕП – 6-10 кВ.

Для досягнення мети роботи поставлено такі завдання:

- Провести порівняльний аналіз методів та засобів зниження впливу на розподільчу мережу 6-10 кВ споживачів із нелінійним навантаженням.
- Компенсація реактивної потужності ліній розподільчих мереж середньої напруги.
- Розробка технічних пропозицій по вибору електроустаткування нелінійного навантаження із зменшеним впливом на розподільчу мережу.

Об'єкт дослідження – Розподільча мережа 6-10 кВ із нелінійним навантаженням.

Предмет дослідження – методи та засоби зниження впливу на розподільчу мережу 6-10 кВ споживачів із нелінійним навантаженням.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

- 1. Марчук В.О. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ФІЛЬТРАЦІЄЮ СТРУМІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК 234-235 с. МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року м. Житомир**
- 2. Драко Н. О., Кашапов Б. О., Марчук В.О. ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ОДИН З СПОСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ 222-223 с. МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО- ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року м. Житомир**
- 3. Марчук В. О., Драко Н. О. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ – КЛЮЧ ДО ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ 227-229 с. МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року м. Житомир**

1. ГАРМОНІЧНІ СПОТВОРЕННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ

1.1. Вплив нелінійних навантажень на якість електроенергії та гармонійні спотворення"

У зв'язку із збільшенням використання силової електроніки якість електропостачання разом з енергоефективністю стала ключовим питанням, і відповідальні за енергетику компанії все більше усвідомлюють переваги приділяти цьому увагу. Основним відображенням якості електроенергії є гармонійне спотворення, яке представляє відхилення між ідеальною синусоїдальною формою хвилі, яку повинна мати напруга мережі або струм навантаження, і тим, що є насправді. Ефекти, які гармоніка може спричинити для обладнання це:

- додаткові втрати ефективності системи, спричинені електричною установкою та обладнанням;
- несподівані резонанси;
- збої в електронному обладнанні, що викликають «логічні» несправності в цифрових схемах;
- небажане перевантаження для трансформаторів, електропроводки;
- несправності двигунів і генераторів;
- небажане спрацьовування автоматичних вимикачів або перегорання запобіжників.

Зменшення впливу гармоніки необхідно для критично важливих галузевих процесів, ІТ-систем, центрів обробки даних тощо з точки зору загальної вартості рахунків за електроенергію та захисту від перерв у процесі та збоїв обладнання [2].

Основною причиною генерації гармоніки є «нелінійні» навантаження. Отже, перш ніж говорити про гармоніки, потрібно визначити, що таке «лінійне» навантаження, а що «нелінійне». Лінійне навантаження - це навантаження, яке миттєво споживає струм, пропорційний прикладеній напрузі, тобто його

імпеданс підтримується постійним протягом усього періоду змінного струму. Для загального електропостачання із синусоїдальною напругою 50 або 60 Гц це також означає чистий синусоїдальний струм. Лінійні навантаження можна класифікувати як резистивні (електричні нагрівачі, лампочки розжарювання), ємнісні (конденсатори, які зазвичай є частиною систем або обладнання), індуктивні (трансформатори, двигуни) або комбінації деяких із них (рис. 1). Нелінійне навантаження на відміну від лінійних навантажень, змінює свій імпеданс із миттєвою прикладеною напругою, що призведе до несинусоїдального струму. Найпростішою схемою для представлення нелінійного навантаження є діод-випрямляч з його кількома варіантами (повнохвильовий діодний випрямляч, півхвильовий діодний випрямляч, однофазний або трифазний) [3] (рис. 2).

Деякі приклади нелінійних навантажень, здатних вводити гармоніки в електричний розподіл: промислове обладнання (зварювання, дугові печі), частотно-регульовальні приводи (VFD), лінійні випрямлячі, імпульсні джерела живлення, освітлювальний баласт і сучасне електронне обладнання, при низьких рівнях навантаження, що може бути розроблено для оптимізації ефективності навколо номінальної робочої точки. Усі ці схеми можуть містити напівпровідникові пристрої живлення, такі як діоди, тиристори (SCR), транзистори та інше.

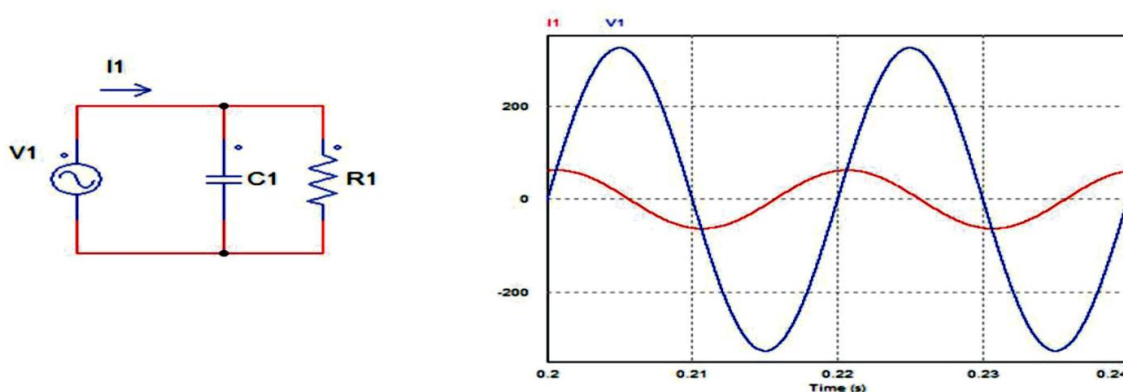


Рис. 1. Лінійне навантаження, що складається з комбінації резистора та конденсатора. (у цьому випадку конденсатор створює коефіцієнт потужності, нижчий за 1)

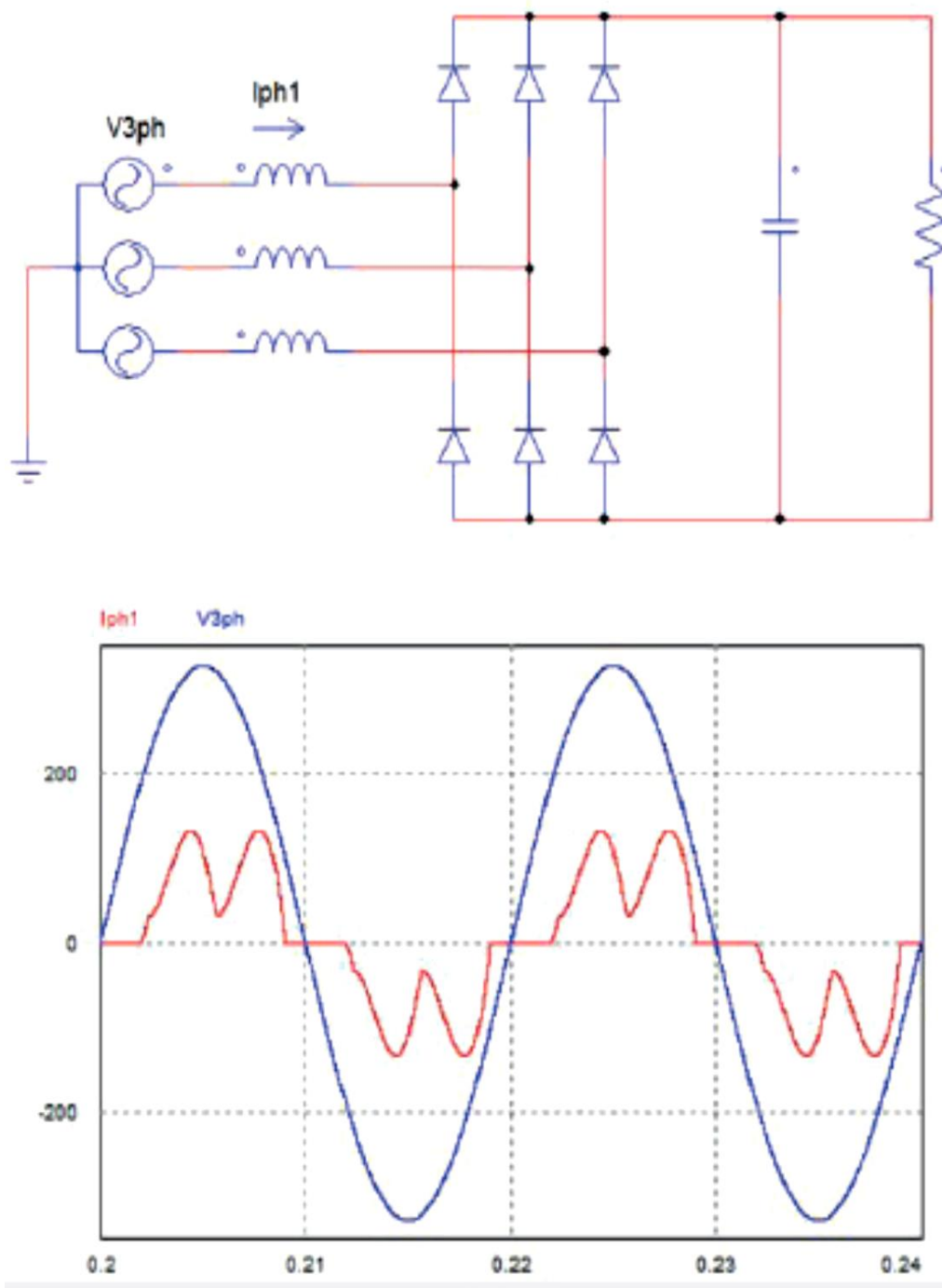


Рис. 2. Приклад нелінійного навантаження: схема, що відповідає 6-імпульсному випрямлячу (або вхідному каскаду VFD), і його сильно спотворене споживання струму (I_{ph1} , однакове для всіх 3 фаз) не пропорційне 3-фазній напрузі живлення V_{3p}

Для розуміння, як спотворення переходять від інжекції гармоніки струму до гармонійних спотворень напруги, необхідно ввести концепцію точки загального зв'язку (PCC). Він визначається як точка, де розподільна лінія

(зазвичай загальнодоступна) досягає кінцевого користувача, де будуть підключені певні навантаження. Отже, для промислових або комерційних користувачів ця точка може «обслуговуватися» через розподільний трансформатор (наприклад, трансформатор середньої напруги), або довгу розподільну лінію, або комбінацію обох. Послідовний імпеданс може підсумувати еквівалентну схему розподілу між «ідеальним» джерелом живлення та цим PCC (представленим на рис. 3 як L_s).

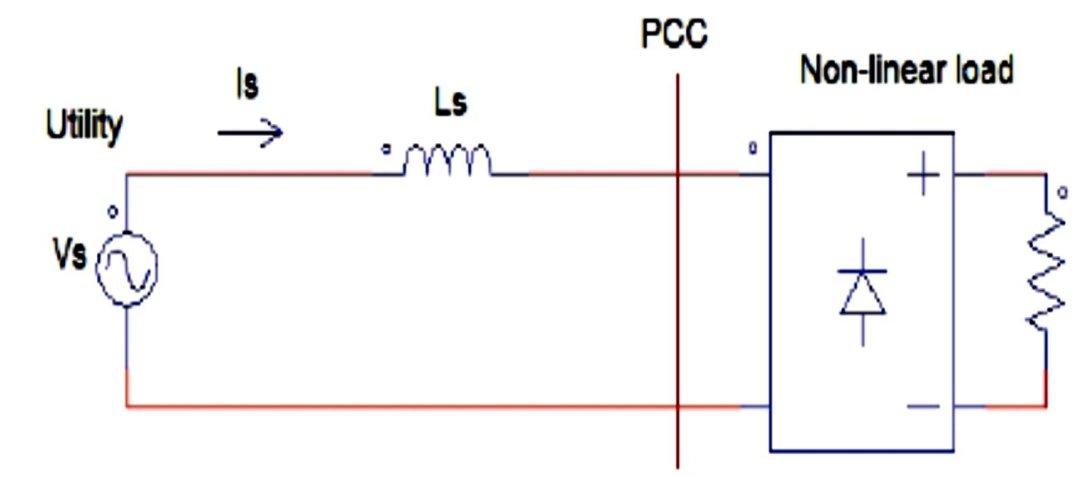


Рис. 3. Еквівалентна схема розподільчої лінії комунального господарства та PCC

Напруга на PCC може бути виведена з джерела напруги V_s і падіння напруги на L_s як:

$$V_{PCC}(t) = V_s(t) - L_s \cdot \frac{dI_s(t)}{dt}$$

Припускаючи несинусоїдальний струм (рисунок. 4), отже, несинусоїдальна форма напруги з'являється на PCC, спричинена падінням напруги на опорі розподілу L_s (V_{PCC} на рис. 4). Варто зауважити, що навіть несинусоїдальні сигнали споживання струму I_s і напруга на PCC (V_{PCC}) є періодичними. Тобто напруга на PCC тепер представляє значний вміст гармонік. Чим більша інжекція гармоніки струму, тим більші гармоніки напруги з'являються на PCC, що також залежить від імпедансу розподілу L_s .

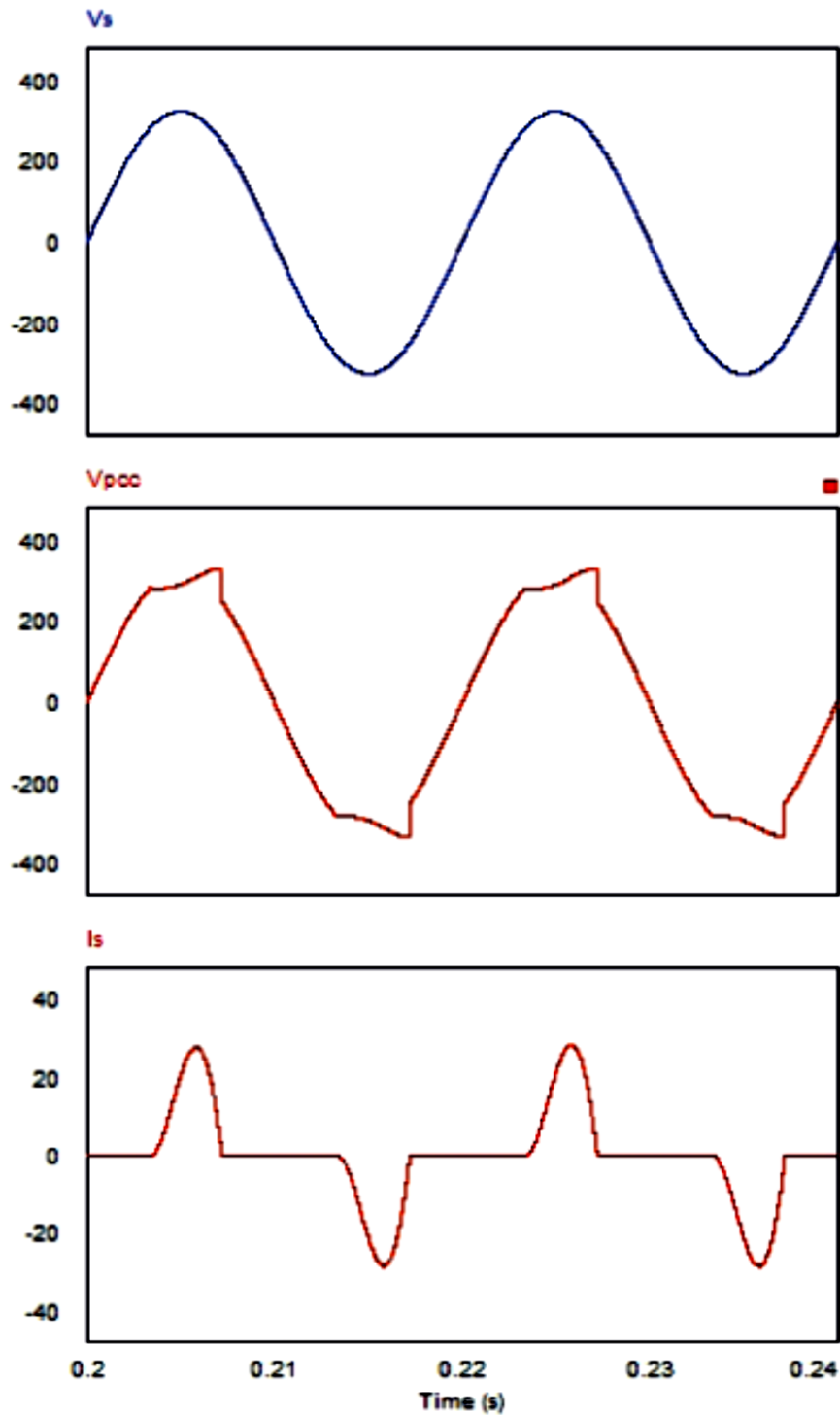


Рис. 4. Сигнали для схеми представлений на рис.3. На напругу в РСС впливає гармонійне спотворення (THD_v від близько 9%)

Повертаючись до мети цього розділу, щоб визначити, що таке гармоніки, нам потрібно отримати аналіз Фур'є для періодичних сигналів: будь-який складний періодичний сигнал можна отримати як додавання різних «чистих» синусоїдальних хвиль на різних частотах і амплітудах, кратних основна частота.

Ці кратні основній частоті називаються гармоніками. Математичний вираз цього визначення для періодичного сигналу $I(t)$ є:

$$I(t) = I_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cdot \sin(n \cdot \omega t - \varphi_n)].$$

У розкладанні на окремі синусоїдальні форми, наведені вище, основною формою буде сигнал для $n=1$, а кратні йому називаються гармоніками порядку « n », для « n » в діапазоні від 2 і вище (це може бути $N \rightarrow \infty$). I_0 представляє компонент 0 Гц (постійний струм або середнє значення більше 0). φ_n представляє фазовий зсув кожної гармоніки. Припускаючи сигнал без компонента постійного струму, ми можемо записати:

$$I(t) = I_1(t) + \sum_{n=2}^N I_n(t).$$

Будучи $I_1(t)$ основним сигналом частоти f_1 ($\omega=2\cdot\pi\cdot f_1$ у вихідному виразі), а $I_n(t)$ різним гармоніки на кількох частотах $2\cdot f_1, 3\cdot f_1, \dots, N\cdot f_1$.

Для випадку розподільчої лінії та ланцюга РСС (рис. 3), спотворені сигнали $I_s(t)$ та $V_{PCC}(t)$ матимуть подібний вигляд, склад, будучи $I_{s1}(t)$ і $V_{PCC1}(t)$ основними 50 Гц, а $I_{sn}(t)$ і $V_{PCCn}(t)$ гармоніками таких сигналів.

Примітка:

- Для симетричних форм сигналу можуть з'явитися лише «непарні» гармоніки (кратні 3-й, 5-й, 7-й і т.д. основної частоти), як у прикладі на рисунку
- Для асиметричних сигналів може з'явитися частина з «непарних», «парних» кратних основного сигналу (кратні 2-го, 4-го, 6-го тощо). Також компоненти постійного струму можуть з'являтися в асиметричних формах хвилі, які представлені як сигнали 0 Гц.

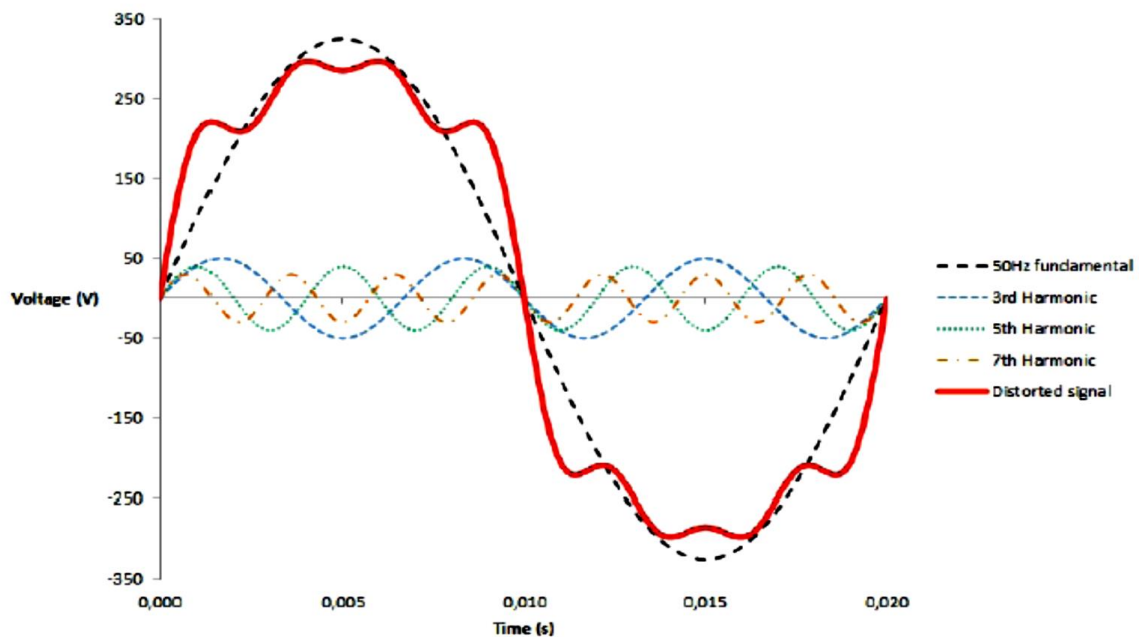


Рис. 5. Приклад розкладання складного спотвореного сигналу, як додавання основної частоти 50 Гц і 3-ї, 5-ї та 7-ої гармоніки (150 Гц, 250 Гц, 350 Гц відповідно).

1.2. Показники та вимірювання гармоніки

— Індивідуальний відсоток гармоніки.

Амплітудне (або середньоквадратичне значення) тієї чи іншої гармоніки I_n може бути виражено по відношенню до основного I_1 , або до середньоквадратичного значення сумарного струму:

$$i_n(\%) = 100 \frac{I_n}{I_1}; \quad i_n(\%) = 100 \frac{I_n}{I_{rms}}.$$

— Спектр гармоніки.

Графічне зображення попередньої концепції, де можна легко проаналізувати розкладання спотвореного сигналу. Багато приладів Power Quality можуть запропонувати таке представлення. Для випадку з рис.5 таке представлення буде таким, як показано нижче.

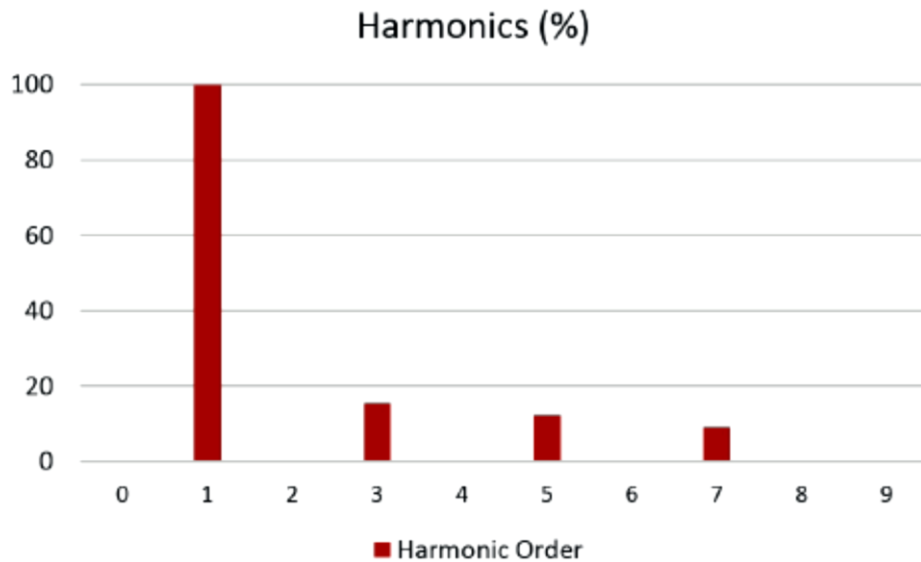


Рис. 6. Спектр гармонік для представленого зразка сигналу на рис.5 (100% при фундаментальному, 15% для 3-ї, 12% для 5-ї, 9% для 7-ї гармоніки).

— Коефіцієнт гармонійних спотворень (THD).

Струм THD (THDi) - згідно з визначенням вище, сумарні гармонійні спотворення по струму складуть:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}.$$

який зазвичай дається у відсотках [%] (шляхом множення попереднього результату на 100). Приклад розрахунку спотвореного сигналу на рис.5:

$$THD_i = \sqrt{(0,15)^2 + (0,12)^2 + (0,09)^2} = 0,2118 \rightarrow 21,18\%.$$

Виразимо THDi як функцію загального середньоквадратичного струму, який дорівнює:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}.$$

Тоді:

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 - 1}.$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2}.$$

Коефіцієнт гармонійних спотворень напруги (THD_v) – аналогічно, загальне гармонійне спотворення напруги виражається як:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2}.$$

— Коефіцієнт потужності зміщення

Коефіцієнт потужності зміщення (DPF), $\cos\varphi$, обумовлений зсувом фаз між напругою і струмом основної частоти f_1 :

$$DPF = \cos\varphi = \frac{P_n}{S_1}.$$

Однак, при наявності гармонік, попереднє рівняння вже не діє в якості глобального коефіцієнта потужності, так як потрібно враховувати потужність, викликану гармоніками (гармоніки напруги і струму на різних частотах) [4]:

$$PF = \frac{P}{S}.$$

Де:

- P - активна потужність з урахуванням гармонік і зміщення фаз φ_n між напругою і струмом для кожного [4]:

$$P = \sum_{n=1}^N U_n \cdot I_n \cos \varphi.$$

- S - уявна потужність, враховуючи не тільки активну (P) і реактивну потужність (Q), але і силу спотворень (D), можна представити у вигляді тривимірної осі, що є модулем[7]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}.$$

1.3. Способи коригування гармонічних коливань

1. Трансформатори

Трансформатори самі по собі, або входять до складу активних фронтендів (багатоімпульсних перетворювачів), можуть мати здатність скасовувати певні гармоніки навантаження. Фактично, те, що вони роблять, полягає в тому, щоб розрізняти певні гармоніки для циркуляції в установці, а не усувати їх.

- Трансформатор Дельта-Стар: потрібні гармоніки на вторинному ринку не здатні циркулювати в первинній частині розподільної системи, так як вони обмежені в нейтралі зіркового з'єднання.
- Зигзагоподібний трансформатор: також може використовуватися для уловлювання потрібних гармонік, розміщуючи їх близько до спотворюючих навантажень і уникаючи їх поширення вище по схемі.
- Трансформатор Дельта-Дельта: розміщення двох однакових нелінійних навантажень на кожному з вторинних трансформаторів (одна Дельта, інша Зірка), матиме ефект скасування гармонік 5-го та 7-го в первинному Дельта.

2. Реактори (лінія змінного струму або ланка постійного струму)

Гармонійне забруднення нелінійних навантажень (наприклад ПЧ) (рис. 7) може бути зведено до мінімуму шляхом розміщення послідовного котушки

індуктивності (реактора) або до лінії змінного струму, або до ланцюга ланки постійного струму, або до того й іншого, з можливістю фільтрації висхідного гармонійного струму, а також розв'язки спотворень лінійної напруги від напруги на стороні нелінійного навантаження. Будь-який з цих доданих елементів може обмежувати також піки струму.

Ці реактори мають недолік у вигляді додаткового падіння напруги, і що може бути більш важливим.

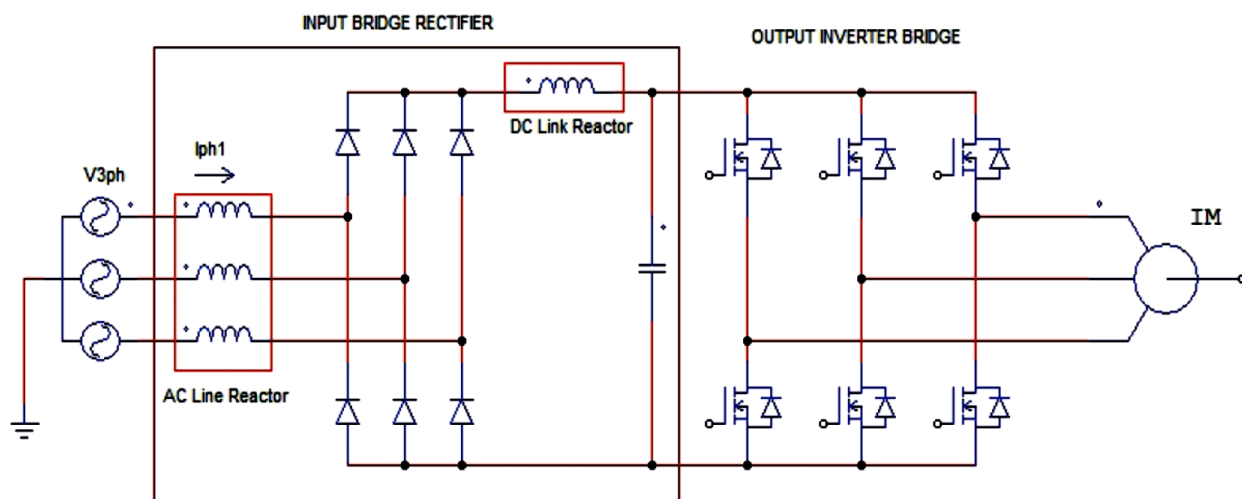


Рис. 7. Повна схема приводу зі змінною частотою обертання для двигунів.

На рис. 8 видно як компенсується (відновлюються коливання струмів) завдяки встановленню реактора у схему живлення двигуна.

3. Пасивні фільтри гармоніки

Пасивні гармонічні фільтри зазвичай складаються з резонансних фільтрів, що складаються з котушок індуктивності та конденсаторів (а іноді і демпфуючих резисторів), налаштованих на приховування або захоплення певної гармонійної частоти, зазвичай низького порядку (5-й, 7-й, 11-й,..) (рис.8): на входному каскаді 6-ти мостового випрямляча, що генерує високі рівні 5-ї гармоніки, додається гармонічний пасивний фільтр (катушки індуктивності L_s , конденсатори CS), для мінімізації спотворень струму на РСС. Такий ефект виходить при налаштуванні резонансної частоти $L S-CS$ на ту 5-ю гармоніку.

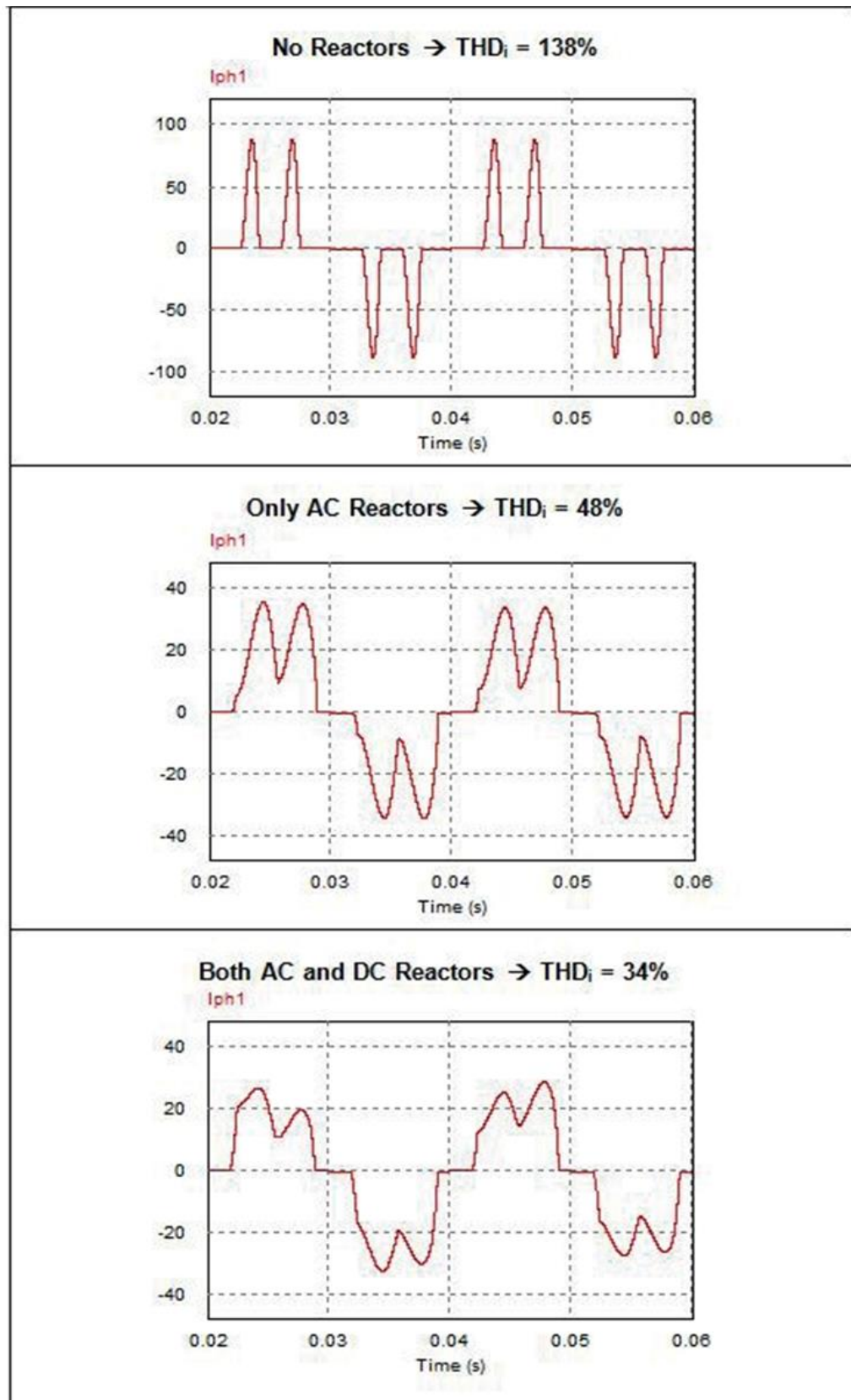
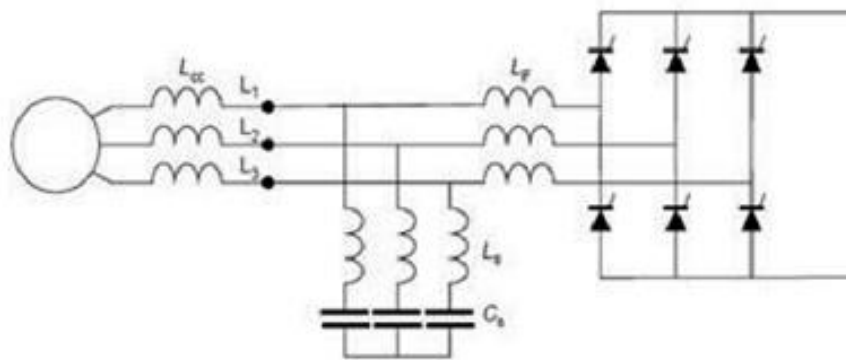


Рис. 8. Різні етапи мінімізації КГС і при розміщенні реакторів.



Resonance Frequency $\equiv 5^{th}$ Harmonic

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_5 C_5}}$$

Рис. 9. Типова схема для редукції 5-ї гармоніки на 6-імпульсному випрямляча.

Пасивні гармонійні фільтри, будучи налаштованими лише на певну частотну гармоніку, мають свою функцію пом'якшення дії гармоніки лише в певній робочій точці (тобто при заданому навантаженні), що означає, що далеко від цієї точки, зазвичай нижчих рівнів навантаження, гармонійні спотворення не зводяться до мінімуму. Крім того, вони мають ефект зниження коефіцієнта потужності, якщо не додається додаткова схема, щоб компенсувати це (додаткові паралельні котушки індуктивності). Крім того, вони вводять можливість резонансу, і можуть впливати на кожен конкретну лінію або опір джерела. Незважаючи на це, пасивні фільтри є простим, надійним і економічно ефективним рішенням для «закритих» (повторюваних умов роботи) установок або систем[5].

4. Фільтри активних гармонік.

Фільтри активних гармонік - це силове електронне обладнання для нейтралізації (або зменшення) поточного гармонійного забруднення установки. Принцип роботи полягає у вимірюванні гармонік струму навантаження і генерації в режимі реального часу тих же гармонік, але у фазному протилежності, таким чином, що додавання обох струмів, видимих з електроустановки, майже не

містить гармонік, а лише основну f_1 (рис.10) Це призводить до зниження THDi на рівнях, які зазвичай нижчі за 5%.

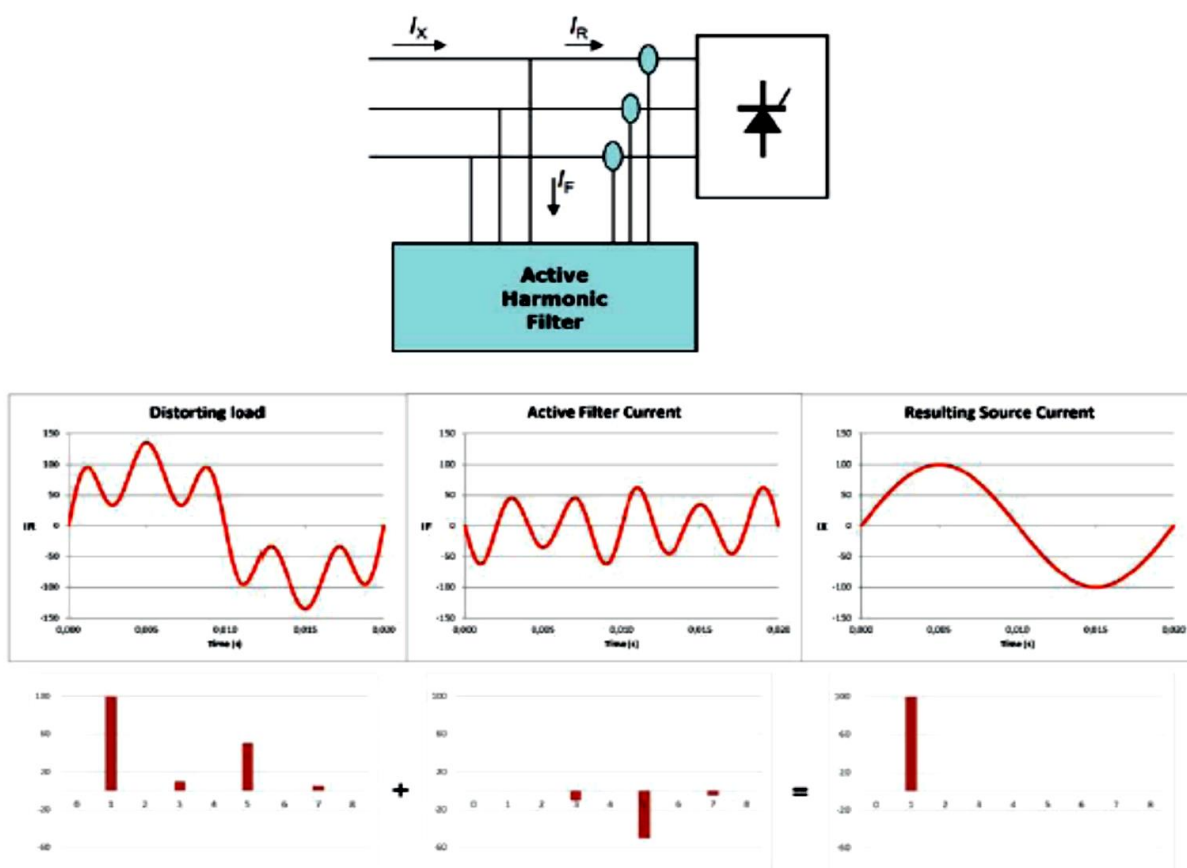


Рис. 10. Активне розташування фільтра і його коригуюча поведінка при нелінійному навантаженні: АЧЧ генерує компенсаційний струм ПЧ, який один раз додається до спотвореного струму навантаження ПЧ, утворює «чистий» струм джерела I_X . Внизу показаний гармонійний спектр для кожного струму.

Таким чином, у порівнянні з пасивними фільтрами, вони мають ряд переваг: можуть компенсувати кілька гармонік одночасно, коригувати також гармоніки дуже високого порядку, збільшувати коефіцієнт потужності установки, пропонують більшу гнучкість (не залежить від навантаження або опору джерела) [6].

1.4. Технічні засоби з низьким рівнем гармонійних спотворень

Очевидно, що найкращий спосіб позбутися від гармонік – це не генерувати їх. Як приклад розглянемо багатоімпульсний перетворювач, який не додає додаткове обладнання для зменшення гармонік після їх встановлення та введення в експлуатацію.

Багатоімпульсний перетворювач.

Основний принцип роботи багатоімпульсного перетворювача полягає в перетворенні 3-х вхідних фаз в 6, 9 і більше фаз, які будуть підключатися до 12-імпульсних, 18-імпульсних або більше імпульсних мостових випрямлячів. Перетворення до кратності $3 \cdot n$ фаз досягається за допомогою різного підключення трансформаторів ($\Delta \rightarrow Y, \Delta \rightarrow \Delta, Y \rightarrow Y$) (рис. 11).

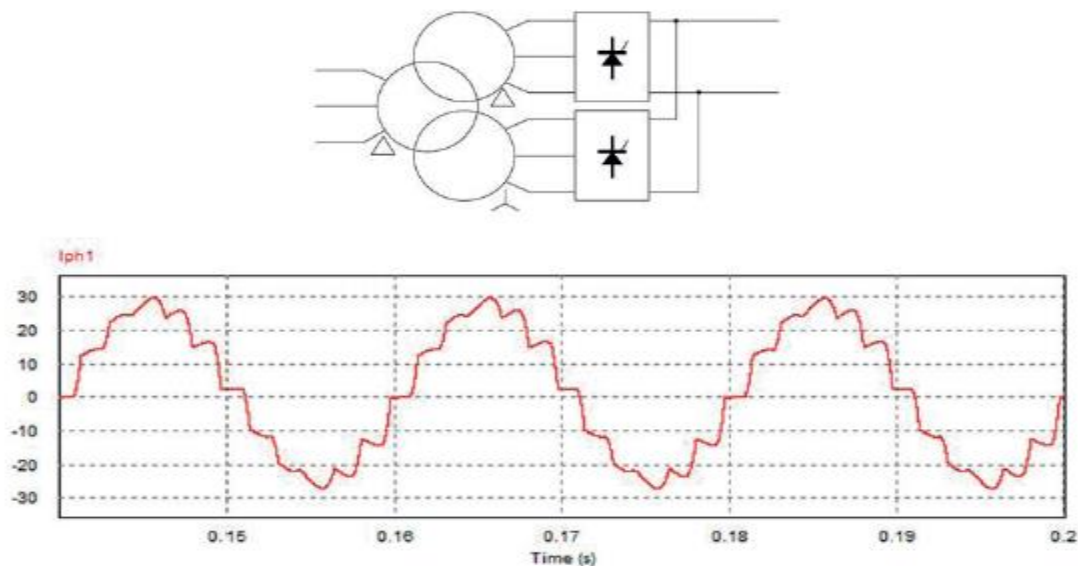


Рис. 11. 12-імпульсний випрямляч, що складається з трансформатора Delta-Delta-Wye і двох 3-фазних.

Висновок по розділу 1

Якість електроенергії стала ключовим питанням зі зростанням використання силової електроніки, і керівники енергетичних компаній усвідомлюють переваги уваги до неї. Гармонійні спотворення є основним відображенням якості електроенергії, і їхній вплив може призвести до

додаткових втрат ефективності системи, несподіваних резонансів, збоїв у роботі електронного устаткування і небажаних перевантажень. Нелінійні навантаження, такі як промислове обладнання, частотно-регульовані приводи та імпульсні джерела живлення, є основною причиною генерації гармонік. Для зменшення або усунення гармонік можна використовувати трансформатори, реактори і пасивні фільтри гармонік, але активні фільтри гармонік забезпечують більшу гнучкість і можуть коригувати гармоніки високого порядку. Найкращий спосіб позбутися гармонік - не генерувати їх, і багатоімпульсні перетворювачі є прикладом системи розподілу з низьким рівнем гармонік.

2 КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СПОЖИВАЧІВ ІЗ НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

2.1 Компенсація реактивної потужності – ключ до енергозбереження

Із найважливіших завдань для промислових підприємств і невеликих заводів, що виступають у ролі покупців електроенергії, ставиться здатність конкурувати та виходити, без великих втрат для виробництва, з кризи. Згідно з економічними дослідженнями ринку що випускається продукції стає зрозуміло, що ціна на продукцію багато в чому залежить від витрат на електроенергію при виробництві продукту - близько 30-40%. Це безпосередньо призводить до питання споживання електроенергії в цілому по всьому підприємству та складання методів енергозбереження за допомогою проведення аудиту енергоспоживання.

Досвід вітчизняних компаній демонструє, що це питання можна вирішити на території України. Одним із важливих критеріїв щодо функціонування енергосистеми є компенсація реактивної потужності. Багато хто вважає, що це рішення не підходить по відношенню до великих заводів із великими потужностями споживання. Незважаючи на це більшість споживання реактивної потужності, йде на внутрішнє освітлення цехів та складів (найпоширеніший тип ламп на підприємствах 70-80% - люмінесцентні), нелінійне навантаження та вентиляції підпору та димовидалення вентиляції. Крім цього, страждає якість електроенергії на фабриках та в адміністративно-побутових корпусах. Через все це з'являються несприятливі фактори зниження якості електроенергії, такі як погіршення якості напруги та підвищення споживання реактивної потужності з електромережі.

Основними споживачами електричної енергії є механізми з механізмами, що створюють магнітне поле, такі як електродвигуни, силові трансформатори, зварювальні апарати. Завдяки чому при перехідних процесах за участю змінного струму виявляються реактивні ЕРС, виходить фазний зсув по напрузі та струму, при підвищенні кута зсуву - $\cos(\varphi)$ має зворотну властивість, зменшуватися при невеликій потужності.

При зниженні показника $\cos(\varphi)$ при постійному навантаженні установки пропускна здатність лінії так само зменшується, струм у мережі збільшується, що веде до втрат і перегріву в лініях, старіння ізоляції. Одним із рішень є компенсація реактивної потужності у розподільній мережі підприємства. При проектуванні всіх об'єктів фахівці розраховують показники всіх силових трансформаторів, кабельних ліній і генераторів на типові показники струму і напруги [8].

Для підвищення якості електроенергії і зниження втрат при великій споживаній потужності все частіше застосовують нові установки, які дозволяють підвищувати показники характеристик струму і напруги: підняти значення $\cos(\varphi)$ до значень, що нормуються, обмежити вищі гармоніки і впровадження контрольні апарати, для зняття показань.

Один з поширених способів компенсації реактивної потужності можна виділити - включення в мережу живлення з незмінним навантаженням конденсатора з потужністю, обраної для даного навантаження пристрою.

При непостійному навантаженні прийнято встановлювати конденсаторні установки з автоматичним регулюванням потужності. Компенсація реактивної потужності займає провідні позиції у енергозбереженні. Збільшення показника $\cos(\varphi)$ допомагає знижувати втрати, спричинені підвищенням споживанням активної та реактивної потужностей, за рахунок чого збільшується тривалість служби розподільчих установок.

2.2 Принцип компенсації реактивної потужності

Більшість електроенергії на заводах та підприємствах споживається силовими трансформаторами та асинхронними електродвигунами. Їх принцип роботи будується на отриманому магнітному полі змінного струму, для його отримання потрібен реактивний струм, що намагнічує. В результаті чого в електричних мережах змінного струму крім активної потужності (P), необхідної

для підтримки роботи електроустановок, бувають перетікання реактивної потужності (Q).

Активна потужність генерується лише розподільними станціями, а реактивна потужність виробляється як генераторами електричних станцій, а й комплектними конденсаторними установками.

Векторну суму активної (P) та реактивної (Q) потужностей називають повною потужністю (S), яка споживається електроприймачем із мережі.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

Де P – активна потужність, кВт;

Q – реактивна потужність, квар;

S – повна потужність кВА.

У розподільчих мережах струм синфазен - це означає, що він не запізнюється від напруги, за умови, що навантаження несе активну складову. Наочно омічна (активна) навантаження (рис. 12).

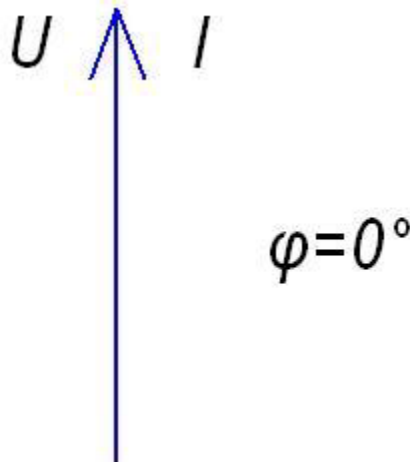


Рис. 12. Омічне (активне) навантаження

При відставанні струму від напруги навантаження має індуктивний характер (електродвигуни на холостому ходу). Наочно індуктивне навантаження (рис. 13).

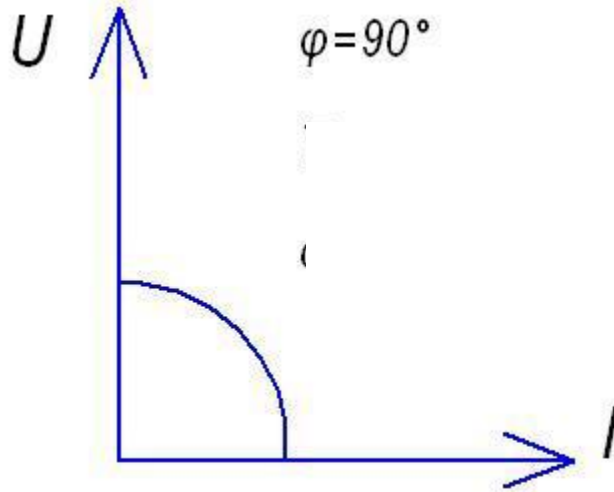


Рис. 13. Індуктивне (рухове) навантаження (струм відстає від напруги)

При випередженні струмом напруги навантаження має ємнісний характер (конденсатори). Наочно ємнісне (конденсаторне) навантаження (рис.14).

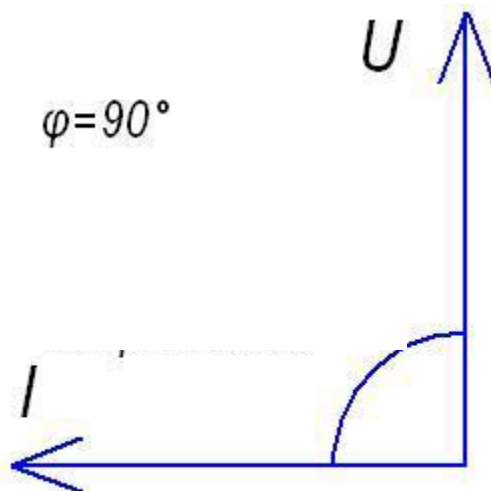


Рис. 14. Ємнісне (конденсаторне) навантаження (Струм випереджає напругу)

Загальне значення струму при роботі електродвигуна можна отримати за допомогою векторної суми (рис. 15):

1. I_a - струм з активною складовою
2. I_{ri} - реактивний струм з індуктивною складовою

Від даних струмів будується залежність споживання електричної енергії устаткування.

1. P – потужність з активною характеристикою залежить від I_a (за сумою

всіх гармонік).

2. Q - потужність з реактивною характеристикою залежить від I_{pi} (по сумі всіх гармонік).

3. A – повна потужність споживана двигуном (за сумою всіх гармонік).

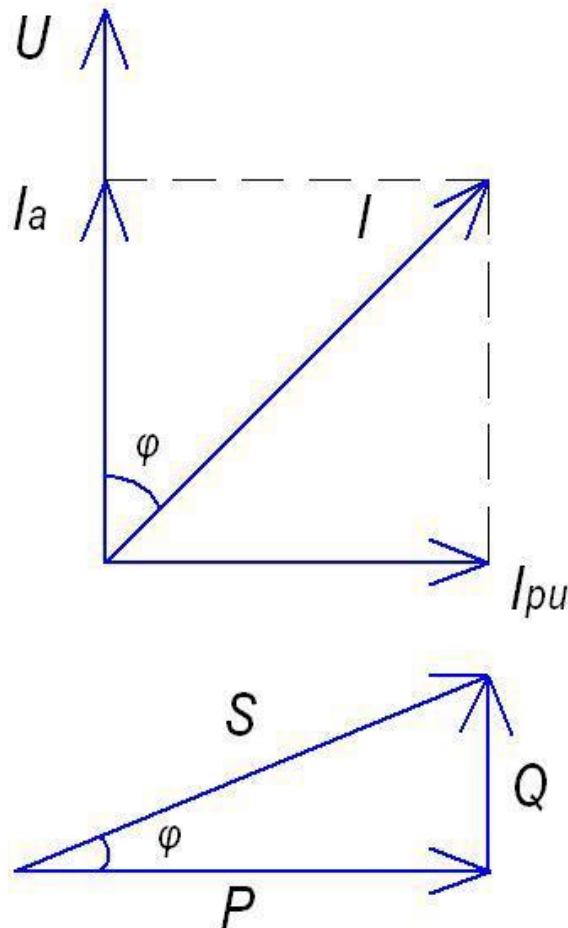


Рис. 15. Векторне відображення сумарного струму, активного потужності, реактивної потужності та повної потужності

Сама по собі реактивна потужність не бере участі у виконанні механічної роботи, але її складова незамінна при роботі електродвигуна, для цього потрібно робити її якомога ближче до центру навантаження, для зменшення її споживання від постачальника електроенергії. Завдяки цьому збільшується пропускна здатність ліній, зменшуються втрати та навантаження на кабельні лінії, знижуються витрати на оплату квитанцій за електроенергію, вивільняються

потужності для підключення нових споживачів за умови зменшення споживаного струму трансформаторами.

Значення характеристик, що використовують реактивну потужність, мають назву POWER FACTOR або $\cos(\varphi)$:

1. $P_{1\text{гарм}}$ – активна потужність першої гармоніки 50 Гц
2. $A_{1\text{гарм}}$ – повна потужність першої гармоніки 50 Гц

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

При зменшенні $\cos \varphi$ підвищується споживання реактивної потужності всіх електроприймачів. Організації, які отримують електроенергію, намагаються збільшувати значення $\cos \varphi$, оскільки надто низький $\cos \varphi$ призводить до прояву багатьох труднощів:

1. Несприятливі втрати активної потужності ΔP в електричних лініях (протікання струму реактивної потужності).
2. Втрати напруги ΔU у розподільчих мережах (приклад 340 ... 360 В, при нормованому показнику в 380 В).
3. Вимоги до переходу на щабель вище за потужністю генераторів, діаметрів розподільчих ліній, потужності та габаритів трансформаторів.

Зважаючи на вищезазначене, завдання компенсації реактивної потужності стає невід'ємною частиною будь-якого виробництва. Конденсаторні установки допомагають зменшувати споживану потужність мережі електроустановок [10].

2.3 Способи компенсації реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності здійснюється за допомогою комплектної конденсаторної установки на розподільчих шинах. Інтеграція конденсаторів в розподільчу мережу зменшує споживання реактивної потужності, що постачається постачальником електроенергії через трансформатори, і збільшує значення $\cos \varphi$. Стандартизоване значення $\cos \varphi$

знаходиться в діапазоні від 0,90 до 0,95, і постачальники електроенергії штрафуються за низьке значення $\cos$ на стороні споживача. Крім того, якщо значення $\cos$ збільшується з 0,9 до 0,99, номінальний струм зменшується на 4%, потужність повного комплексу конденсаторного обладнання, встановленого для цієї мети, збільшується в два рази, а ціна цього обладнання збільшується в 1,75 рази, що не є обґрунтованим в розрахунках. Установки для компенсації реактивної потужності поділяються за типом підключення: загальна та індивідуальна.

Компенсація виконується індивідуально для кожного навантаження, незалежно від інших споживачів (клем двигуна). Індивідуальна компенсація є досить простим рішенням з технічної точки зору. Конденсатор встановлюється відповідно до споживаної потужності двигуна і $\cos(\varphi)$, і реактивна потужність компенсується протягом усього часу роботи. Перевага цього типу компенсації полягає в тому, що висока доступність установки може бути досягнута при мінімальних витратах.

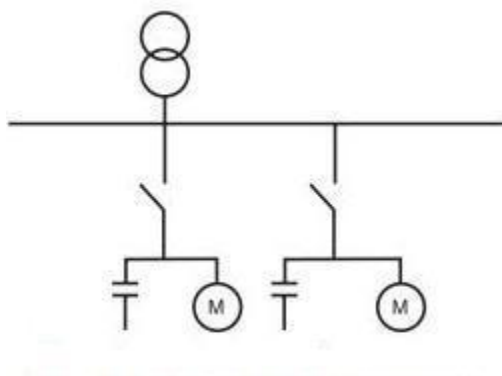


Рис. 16. Індивідуальна компенсація реактивної потужності

Загальна (централізована) компенсація базується на встановленні набору загальних конденсаторів у точці розподілу (на шинах трансформаторної підстанції або розподільчого щита (РЩ)).

Правильний вибір фази компенсації повинен ґрунтуватися на змінах максимального і нормального навантаження, і цей фактор впливає на вибір схеми компенсації.

На всіх підприємствах час максимального і мінімального навантаження залежить від технології виробництва, а обладнання не завжди працює. Тому застосовувати окремий підхід до компенсації реактивної потужності недоцільно, оскільки встановлення конденсаторів у великій кількості установок призводить до великих витрат. Коефіцієнт завантаження конденсаторів занадто низький, що впливає на тривалість терміну окупності установки.

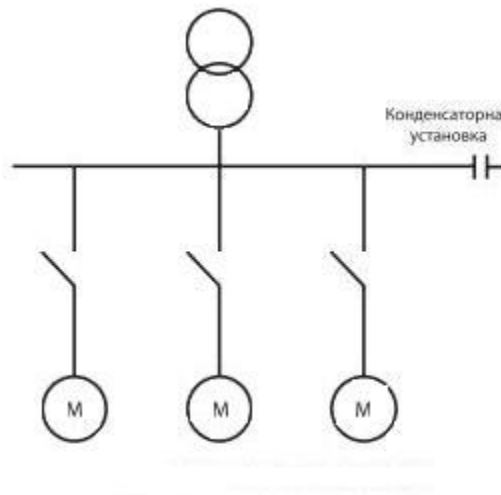


Рис. 17. Компенсація централізованим методом

Індивідуальна компенсація ефективна, коли необхідна велика реактивна потужність для певної кількості споживачів, які споживають велике навантаження в певний період часу. Централізована компенсація підходить для великої кількості навантажень з різними коефіцієнтами попиту протягом зміни. При цьому значення споживання навантаження не завжди часто змінюються. Для таких завдань використовуються комплектні конденсаторні установки з автоматичними ступенями регулювання..

Висновки по розділу 2

Компенсація реактивної потужності має вирішальне значення в електромережах, оскільки вона зменшує споживання енергії, втрати та витрати. Вона досягається шляхом встановлення конденсаторної батареї для

балансування реактивної потужності у розподільчих мережах. Принцип базується на векторній сумі активної та реактивної потужності. Реактивна потужність не бере участі в механічній роботі, але потрібна для роботи двигуна. Коефіцієнт потужності ($\cos\phi$) вимірює ефективність компенсації реактивної потужності, і його значення має бути близьким до 1. Існують індивідуальні та централізовані методи компенсації, причому індивідуальна компенсація є більш ефективною для постійних навантажень, а централізована - для змінних навантажень.

3 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ВИБОРУ ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РОЗПОДІЛЬЧУ МЕРЕЖУ

3.1 Компенсація реактивної потужності з фільтрацією струмів вищих гармонік – шлях підвищення енергоефективності передачі та розподілу електроенергії

Вітчизняною та міжнародною експертною практикою доведено, що найвищі значення з точки зору економічної ефективності досягаються при встановленні пристроїв компенсації реактивної потужності, поряд з усіма іншими методами [11].

Такими пристроями можна вважати:

- синхронні компенсатори;
- синхронні двигуни, що працюють в режимі перезбудження;
- статичні конденсаторні батареї;
- статичні тиристорні компенсатори тощо.

Можливість силового фільтра виконувати задані функції визначається точністю його налаштування. Розроблені методики проектування ФКУ ґрунтуються на точному настроюванні пристроїв на частоти відповідних гармонік вищого порядку. Через дискретність показників ємності конденсаторів та індуктивності вироблених заводами виробниками реакторів, виконати точне налаштування пристрою на частоту до значення гармоніки вищого порядку дуже важко. Також при експлуатації фільтр-компенсуючих пристроїв потрібно враховувати старіння та вихід із ладу окремих секцій конденсаторних батареї. Такі проблеми можуть спричинити відхилення частоти налаштування фільтра. Що призводить до підвищення значень несинусоїдної в мережі та перевантаження по струмах гармоніки вищого порядку.

Через економічну ефективність компенсації реактивної потужності на дослідження та розвиток цього підходу в провідних промислових країнах

виділяються відносно великі державні бюджети. Наприклад, у таких країнах, як Канада, Польща та Франція, потужність конденсаторних пристроїв коливається в межах 25-30% від ефективної пікової потужності, тоді як у Китаї та США вона становить близько 20%. У багатьох компаніях США потужність пристроїв компенсації реактивної потужності становить 90% від загальної потужності генератора. У багатьох країнах впроваджуються методи збільшення реактивної потужності, що виробляється генераторами електростанцій, за рахунок збільшення частки реактивної потужності, що виробляється повним конденсаторним блоком.

Коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\varphi$ в умовах максимального навантаження, в таких країнах як Китай та США, підтримується на рівні 0,2-0,4, що в перекладі $\cos\varphi = 0,98-0,92$. Також у США розвиваються розподільчі мережі з показником максимальних навантажень працюючим з $\text{tg}\varphi = 0$ [12].

3.2 Рекомендації щодо створення заходів для зменшення гармонійних спотворень на підприємствах.

Для зниження гармонійних спотворень напруги живлення на підприємствах до рівня, що відповідає вимогам ДСТУ EN 50160:2014, рекомендується дотримуватися наступного алгоритму:

1. Визначити повний спектр всіх споживачів електроенергії в схемі електропостачання підприємства, що відносяться до категорії нелінійних споживачів, і підсумувати їх та визначити потужність електроенергії.

Як правило, якщо частка сумарної встановленої потужності нелінійних споживачів в електричній мережі не перевищує 10-15% від номінальної потужності силового трансформатора, ніякої специфіки в роботі системи електропостачання не виникає [1] і коефіцієнт спотворення синусоїди K_U не перевищує допустимого рівня згідно ДСТУ EN 50160:2014.

З розвитком підприємств встановлюється все більше нових нелінійних споживачів.

Якщо частка нелінійних споживачів у загальній потужності перевищує 25%, гармонійні спотворення можуть впливати на роботу інших споживачів електроенергії в мережі та перешкоджати їх нормальній роботі.

При виявленні таких ознак рекомендується провести аудит мережі перед встановленням додаткового обладнання для зниження коефіцієнтів гармонік:

- Невеликий відсоток встановлених нелінійних споживачів (менше 10-15% від номінальної потужності мережі) це є значні гармонійні спотворення напруги живлення.
- Швидке зростання гармонійних спотворень з невідомої причини.
- Збільшення кількості встановлених нелінійних споживачів, що призводить до зростання гармонійних спотворень.

2. Вимірювання параметрів для оцінки відсоткового вмісту вищих гармонік у мережі та діагностики мережі. Вимірювання коефіцієнта синусоїдальних спотворень напруги K_U здійснюється самим аналізатором якості електроенергії або сторонньою організацією.

У багатьох випадках ланцюги електропостачання конкретного об'єкта є частиною загальної електромережі, до якої підключені інші споживачі (інші об'єкти) і є джерелом гармонійних спотворень. Тому діагностику досліджуваної мережі електропостачання рекомендується починати з вимірювання коефіцієнта синусоїдальних спотворень мережі холостого ходу K_{U0} .

Якщо коефіцієнт синусоїдальних спотворень ненавантаженої мережі K_{U0} збільшується (4-8%), необхідно визначити причину збільшення.

Для цього, перш за все, рекомендується провести заходи, передбачені штатними регламентними роботами електрослужби підприємства, у тому числі: перевірити стан проводів живлення, кабелів, клем, перехідних опорів силових з'єднань фазних і нейтральних проводів, якість з'єднань заземлення корпусів електроприладів та інше. Можливо, що причиною високого коефіцієнта гармоніки може бути, наприклад, ослаблене з'єднання силових проводів.

Після проведення регламентних робіт необхідно знову перевірити коефіцієнт гармоніки K_{U0} ненавантаженої мережі.

Іншою можливою причиною підвищеного коефіцієнта гармоніки може бути початкове постачання електроенергії від енергопостачальної організації із свідомо погіршеними параметрами.

Потім, послідовно підключаючи до мережі споживачів з нелінійним навантаженням, виміряти коефіцієнти спотворення синусоїдності K_{UP1} , K_{UP2} і т. д. при кожному нелінійному електроспоживачі П1, П2 та ін, і, таким чином, визначити вклад конкретного споживача у загальні гармонійні спотворення.

Після цього необхідно виміряти загальний коефіцієнт спотворення синусоїдності K_U за всіх включених нелінійних споживачів [13].

Рекомендовані варіанти практичних дій щодо зниження гармонічних спотворень, залежно від коефіцієнта гармоніки ненавантаженої електромережі K_{U0} та вкладів кожного споживача в гармонічні спотворення K_{UP1} , K_{UP2} і т. д., (табл. 1)

Таблиця 1.

Рекомендовані дії зниження гармонійних спотворень

Коефіцієнт гармонік ненавантаженою мережі K_{U0}	Рекомендовані дії для зниження коефіцієнта гармонік навантаженої мережі (при виміряному значенні K_U)		
	$K_U = 8,5-10\%$	$K_U = 11-25\%$	$K_U \geq 30-35\%$
2-3%	Встановити лінійні дроселі та/або дроселі постійного струму	Встановити пасивні (Резонансні) фільтри	Встановити пасивні (резонансні) фільтри або активні фільтри гармонік (АФГ)
4-5%	Встановити пасивні (резонансні) фільтри	Встановити пасивні (Резонансні) фільтри або активні фільтри гармонік (АФГ)	Встановити активні фільтри гармонік
6-8%	Визначити причину такого підвищеного значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності ненавантаженої мережі K_{U0} , близького до нормального (8%). Проблема може полягати в ослаблених з'єднаннях силових проводів або погану якість електроенергії, що постачається від енергопостачальної організації. У будь-якому разі подальше підключення додаткових нелінійних споживачів до мережі неприпустимо згідно з вимогами ГОСТ 32144-2013		

Висновок по розділу 3

Компенсація реактивної потужності з фільтрацією струмів вищих гармонік є способом підвищення енергоефективності передачі та розподілу електроенергії. Встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності поблизу споживачів реактивної потужності дозволяє досягти високих економічних показників та показників енергоефективності. Силові фільтри можуть бути використані для вирішення проблем компенсації реактивної потужності, але точність їх налаштування має вирішальне значення. Використання силових фільтрів у складі КРП дозволяє зменшити гармонійні спотворення в мережі. У деяких країнах потужність конденсаторних пристроїв коливається в межах 25-30 відсотків від активної пікової потужності. Коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\varphi$ в умовах максимального навантаження підтримується на рівні 0,2-0,4 в таких країнах, як Китай і США. Для зменшення гармонійних спотворень на підприємстві рекомендується ідентифікувати нелінійних споживачів, виміряти коефіцієнти гармоніки та вжити заходів щодо зменшення спотворень. Рекомендовані заходи щодо зменшення гармонійних спотворень залежать від коефіцієнта гармоніки ненавантаженої електромережі та внеску кожного споживача в гармонійні спотворення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена аналізу гармонічних спотворень в електричних мережах, їх негативному впливу на якість електроенергії та методам коригування.

Обговорюються причини виникнення спотворень, зокрема нелінійні навантаження, та способи їх оцінки через індикатори, такі як THD і коефіцієнт потужності.

Широко розглядаються методи зменшення впливу гармонік, зокрема активні та пасивні фільтри, а також компенсація реактивної потужності за допомогою конденсаторних установок, що допомагає знизити витрати на електроенергію.

Наголошується важливість правильного вибору обладнання для зменшення гармонічних спотворень і підвищення енергоефективності, а також надаються рекомендації щодо діагностики та зниження впливу ненадійних споживачів електричної енергії.

Таким чином, робота підкреслює важливість компенсації реактивної потужності для енергозбереження та забезпечення ефективності електричних мереж у промисловому сегменті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://pte-ukraine.com/electricity-quality-standards>
2. Якість електричної енергії <https://voe.com.ua>
3. <https://uk.wikipedia.org>
4. Polska norma PN-EN 61000-3-11. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Część 3–2: Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika 16 £ , 2004. Порівняльний аналіз ефективності пасивного та активного фільтрів вищих гармонік в мережі з нелінійним навантаженням
5. Пасивні фільтри гармонік <https://remontuk.com>
6. Схема гармонійного фільтра: як видалити гармоніки за допомогою активних та пасивних гармонічних фільтрів 2025 <https://uk.amen-technologies.com/>
7. ПОВНА, АКТИВНА ТА РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ <http://lic.com.ua/article05.htm>
8. Компенсація реактивної потужності на промислових підприємствах <https://electrocontrol.com.ua/ua/stati-sxemy-i-spravochnaya-informaciya/osobennosti-kompensacii-reaktivnoj-moshhnosti-v-setyax-promyshlennyx-predpriyatij.html>
9. Компенсація реактивної потужності. <https://uk.wikipedia.org>
10. Компенсація реактивної потужності. Схемні рішення на базі контролера DCRK/DCRJ <https://www.svaltera.ua>
11. СОУ-Н МПЕ 40.1.20.510:2006 Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача
12. ОГЛЯД МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ МЕРЕЖАХ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ <https://ep.kpi.ua>
13. Підвищення якості електричної енергії в розподільних мережах за рахунок удосконалення перетворюючів енергії <https://repo.btu.kharkov.ua>