

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Любевич Андрій Олександрович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розрахунок та обґрунтування параметрів пристрою автоматичної
компенсації реактивної потужності
(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

Любевич А. О.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.ф-м.н., професор кафедри вищої

та прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Любевич А. О. Розрахунок та обґрунтування параметрів пристрою автоматичної компенсації реактивної потужності

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Основною метою кваліфікаційної роботи є розробка методики компенсації реактивної потужності БК з урахуванням частотної характеристики розподільної мережі з малою встановленою потужністю, що містить джерела вищих гармонік.

Об'єктом дослідження є розподільні мережі електротехнічних комплексів, що містять косинусні БК та джерела вищих гармонік.

Ключові слова: вищі гармоніки, реактивна потужність, компенсація реактивної потужності.

ABSTRACT

Lyubevich A. O. Calculation and justification of the parameters of the automatic reactive power compensation device

Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polessia National University, Zhytomyr, 2024.

The main purpose of the qualification work is to develop a method for compensation of reactive power of the BC taking into account the frequency characteristic of a distribution network with a small installed capacity, containing sources of higher harmonics.

The object of the study is distribution networks of electrical complexes containing cosine BCs and sources of higher harmonics.

Keywords: higher harmonics, reactive power, reactive power compensation.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	6
1.1 Поняття реактивної потужності	6
1.2 Необхідність компенсації реактивної потужності	8
1.3 Шляхи зниження споживання реактивної потужності в електричній мережі	11
1.3.1 Способи зменшення споживання реактивної потужності	11
1.3.2 Пристрої для компенсації реактивної потужності	12
1.4 Вищі гармоніки. Загальні відомості	17
1.4.1 Напівпровідникові перетворювачі	19
1.4.2 Дугові електричні печі та установки електродугового зварювання	20
1.5 Вплив несинусоїдності на роботу електроприймачів	23
Висновки по розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ КОНДЕНСАТОРНИХ УСТАНОВОК	27
2.1 Способи зниження частки вищих гармонійних складових у системах електропостачання	27
2.2 Розрахунок потужності КУ для забезпечення необхідного значення коефіцієнта реактивної потужності	31
Висновки по розділу 2	34
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇ АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	36
3.1 Автоматична компенсація реактивної потужності батареями конденсаторів	36
3.2 Розрахунок параметрів ПАКРП	40
3.2.1 Розрахунок відносини потужностей суміжних щаблів ПАКРП	40
3.2.2 Розрахунок потужностей секцій ПАКРП	43
3.2.3 Розрахунок мінімальної кількості ступенів компенсації	47
Висновки по розділу 3	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Компенсація реактивної потужності на підприємствах з малою встановленою потужністю електроприймачів з погляду економії електроенергії стає актуальною.

На підприємствах малої потужності (менше 5 МВт), як правило, синхронні двигуни відсутні, застосування синхронних компенсаторів є неефективним через значні витрати на їх встановлення та експлуатацію, а також у зв'язку з малим завантаженням при їх установці. Мінімальна потужність синхронних компенсаторів становить 2,8 МВ·А на напругу 6 кВ та 10 МВ·А на напругу 10 кВ. Таким чином, для підприємств малої потужності цікавить компенсація реактивної потужності батареями конденсаторів (БК).

Вибір БК як компенсуючих пристроїв визначається також простотою монтажу та експлуатації, можливістю зміни генерованої реактивної потужності в широких межах при ступінчастому регулюванні, малими питомими втратами активної потужності на вироблення реактивної, що на порядок менше, ніж для інших джерел реактивної потужності.

Ціль кваліфікаційної роботи. Розробка методики компенсації реактивної потужності БК з урахуванням частотної характеристики розподільної мережі з малою встановленою потужністю, що містить джерела вищих гармонік (ДВГ).

Завдання дослідження. Для досягнення сформульованої вище мети у роботі вирішено такі завдання:

1. Обґрунтування вибору еквівалентної схеми електропостачання для розрахунку струмів та напруг вищих гармонік у режимі компенсації реактивної потужності БК.

2. Визначення критеріїв вибору параметрів пристрою автоматичної компенсації реактивної потужності (ПАКРП) у системах електропостачання з малою встановленою потужністю.

Об'єктом дослідження є розподільні мережі електротехнічних комплексів, що містять косинусні БК та джерела вищих гармонік.

Методи дослідження. Досягнення поставленої мети у роботі базувалося на основних законах електротехніки та виконувалося із застосуванням сучасних цифрових пристроїв. Для вирішення поставлених завдань використано методи математичного моделювання, аналітичні та чисельні методи розрахунку, метод вузлових потенціалів.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Любевич А.О., Ткачук Д. М. АНАЛІЗ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 195-198.

Любевич А.О., Ткачук Д. М. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ КУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 201-204.

Любевич А.О. СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ ЧАСТКИ ВИЩИХ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 208-210.

РОЗДІЛ 1

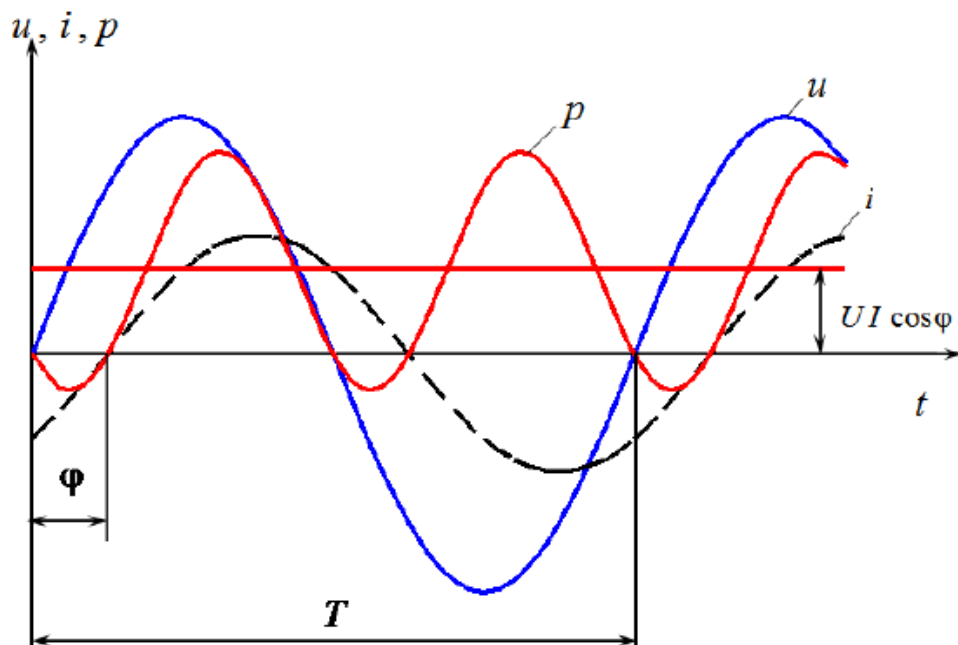
ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1 Поняття реактивної потужності

Нехай ми маємо джерело синусоїдальної напруги $u = \sqrt{2} \sin \omega t$. У цьому випадку при під'єднанні приймача електричної енергії до затискачів цього джерела він буде споживати струм, форма якого описується рівнянням $i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi)$. Цей струм зрушений по фазі щодо напруги на кут φ . Миттєва потужність, яка при цьому виділятиметься на затискачах цього приймача, що відображається у вигляді [2, 9, 23]

$$p = ui = 2UI \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \omega t + UI \cos(2\omega t - \varphi).$$

З формули видно, що цей вираз складається з двох доданків. Першбв доданок постійний у часі. Другий доданок пульсуватиме з подвійною частотою (рисунок 1.1).



Значення середньої миттєвої потужності p за період напруги T визначається першим доданком [2, 9, 18]

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t - \varphi)] dt = UI \cos \varphi + 0. \quad (1.1)$$

Цей вираз характеризує активну потужність. Саме ця енергія витрачається на виробництво корисної роботи за одиницю часу. На активному опорі R вона виділяється у вигляді тепла [2,9]

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R.$$

Потужність, що виділяється за період у другому доданку функції (1.1) дорівнює нулю. Тому вона не може здійснити корисну роботу. У той самий час без цієї доданку процес обміну енергією у приймачі стає неможливим. Процес обміну енергією в приймачі може відбуватися не завжди. Непорушною умовою цього процесу є випадок, коли є реактивні елементи - ємність та індуктивність. Вони здатні накопичувати та віддавати електромагнітну енергію в приймачі.

Отже, повну (яка здається) потужність на виводах електроприймача в комплексній формі зазвичай виражають, використовуючи формулу [2,9]

$$S = \dot{U} I^* = UI e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ, \quad (1.2)$$

де $\dot{U}$ - комплексна напруга; I^* - спряжене значення комплексу струму; величина $UI \sin \varphi$ отримала назву реактивної потужності.

Якщо в мережі переважає індуктивний опір, то струм у ній відстає по фазі від напруги. І тут реактивна потужність споживача має позитивне значення. Якщо мережі переважає ємнісний опір, то струм у ній випереджає по фазі від напруги, а реактивна потужність навантаження у даному разі має негативне значення.

З рівняння (1.2) випливає [2, 21]:

$$\begin{cases} S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ \frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi; \\ \frac{P}{S} = \cos \varphi. \end{cases} \quad (1.3)$$

Враховуючи вирази (1.3), активна та реактивна потужності розраховуються наступним чином [2, 9,23]:

$$\begin{aligned} P &= S \cos \varphi; \\ Q &= S \sin \varphi. \end{aligned}$$

Показник, що характеризує реактивну потужність, є загальновідомим. Ним є коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. Середньозважене значення даного коефіцієнта, згідно старим нормативним документам, варіювалося $0,92 \div 0,95$. У таких межах мало бути значення $\cos \varphi$ на вводах, що живлять промислове підприємство [9].

Однак, слід наголосити, що співвідношення активної до повної потужності не завжди однозначне. Воно не дає користувачеві реальної динаміки зміни реактивної потужності.

Пояснимо це на таких прикладах. Якщо з будь-яких причин на введеннях до підприємства $\cos \varphi$ змінився від 0,95 до 0,94, то реактивна потужність зміниться на десять відсотків. У той же час, при зміні цього коефіцієнта з 0,99 до 0,98 збільшення реактивної потужності складе сорок два відсотки.

По даній причині чітке уявлення про динаміку зміни реактивної потужності дає наступний коефіцієнт

$$K_{p.п} = Q/P = \operatorname{tg} \varphi.$$

1.2 Необхідність компенсації реактивної потужності

Як показує досвід експлуатації, асинхронні двигуни є основним споживачем реактивної потужності.

Другим за значимістю споживачем реактивної потужності є силові трансформатори. Вони споживають від 20 до 25% даної потужності. Остальні

установки, такі як вентиляльні перетворювачі, струмообмежувальні та дугогасні реактори, повітряні та кабельні електричні мережі та інші електроприймачі разом споживають до 10% реактивної потужності [21,23]. Коефіцієнти реактивної потужності даних електричних апаратів лежить в межах від 1,3 до 1,5 [9].

Транспортування реактивної потужності повітряними та кабельними лініями електропередачі за допомогою силових трансформаторів приносить енергетикам величезні збитки. Перерахуємо основні причини, що призводять до чималих збитків енергетичної галузі через надлишок реактивної потужності в СЕП [2,25]:

1. Поява додаткових втрат активної потужності, що дорівнює [1,23]:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2}{U^2} \cdot R + \frac{Q^2}{U^2} \cdot R = \Delta P_a + \Delta P_p,$$

де ΔP_a – втрати активної потужності через прокачування активної потужності в електричній мережі;

ΔP_p - додаткові втрати активної потужності внаслідок прокачування реактивної потужності Q по мережі.

2. Виникнення додаткових втрат напруги. Вони особливо відчутні в розподільних мережах 6-10 кВ [2,23]:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} = \Delta U_a + \Delta U_p,$$

де ΔU_a – втрати напруги через прокачування активної потужності в електричній мережі;

ΔU_p - втрати напруги, зумовлені внаслідок прокачування реактивної потужності Q по мережі.

Втрати напруги у відносних одиницях у трифазній мережі (відхилення або коливання напруги) визначається головним чином реактивною потужністю і потужністю короткого замикання ($K3$) у точці мережі, що розглядається, S_{K3} [9]:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{3U^2} = \frac{PR/X + Q}{3U^2/X} = \frac{PR/X + Q}{S_{K3}}.$$

Рисунок 1.2 ілюструє зміни напруги на шинах 10 кВ ($U_{ш}$) та реактивної потужності (Q) під час роботи потужного вентиляного перетворювача.

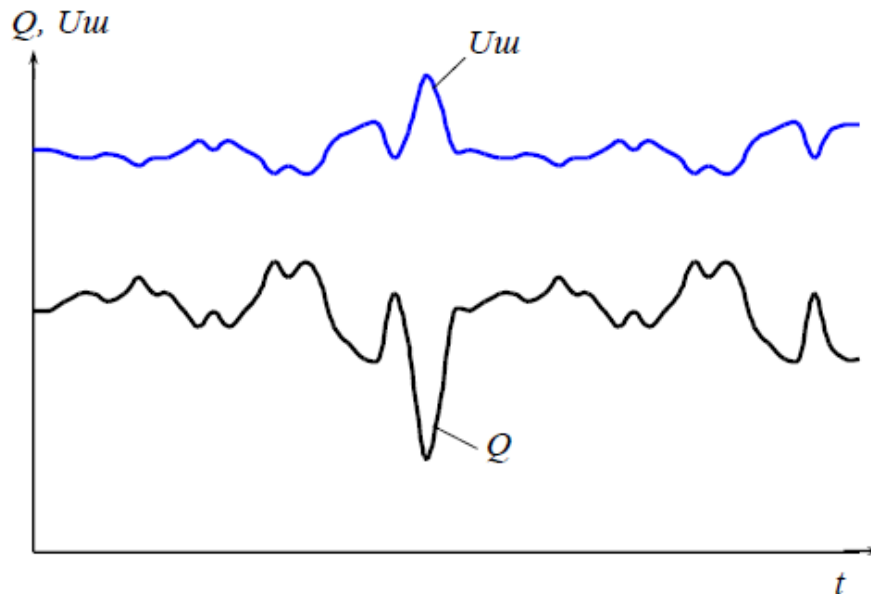


Рисунок 1.2 – Зміна напруги на шинах 10 кВ та реактивної потужності під час роботи вентиляного перетворювача

3. Зменшення пропускної спроможності системи електропостачання (СЕР) завантаженням реактивною потужністю [18], що тягне за собою вибір перерізів повітряних проводів і кабельних ліній, номінальної потужності чи числа силових високовольтних трансформаторів тощо. у бік їх збільшення.

З цих численних причин проектним організаціям ще на етапі проектування необхідно закласти в проектно-кошторисну документацію ці заходи, щоб зменшити реактивну складову потужності.

На підприємствах промислового виробництва ці цілі можуть досягатися різними шляхами. Наприклад, зміною режиму робіт установок, де використовуються сучасні електродвигуни з кращими характеристиками, виключаючи недовантаження обертових електричних машин і, звичайно ж, із застосуванням пристроїв, що компенсують (КП) [15].

Необхідно підкреслити, що компенсуючи реактивну потужність у вузлах системи промислового підприємства, ми отримуємо економію не тільки в точці підключення, а й економію у всіх елементах енергосистеми, починаючи від генераторів до силових трансформаторів головних понижуючих підстанцій (ГПП) промислового підприємства або до живильних ліній головних розподільчих підстанцій (ГРП).

1.3 Шляхи зниження споживання реактивної потужності в електричній мережі

1.3.1 Способи зменшення споживання реактивної потужності

Щоб зменшити споживання реактивної потужності в мережі, необхідно планувати заходи, які умовно поділяються на такі групи [3,15]:

- 1) із встановленням КП;
- 2) без встановлення КП;
- 3) заходи, які допускаються як виняток.

Останні дві групи заходів повинні обґрунтовуватись техніко-економічними розрахунками та повинні втілюватися в життя після погодження із системним оператором.

Розглянемо заходи, що не вимагають встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності [9, 25]:

-розгляд технологічних процесів на підприємстві, які можуть сприяти поліпшенню режиму роботи мережі з метою підвищення коефіцієнта потужності;

-перемикання схеми з'єднання статорних обмоток електричних обертових машин нижче 1000В з трикутника на зірку, у разі завантаження останніх нижче сорока відсотків;

-виключення роботи обертових електричних машин у режимі холостого ходу за допомогою установки обмежувачів холостого ходу. Слід наголосити, що цю систему необхідно впровадити у випадках, коли тривалість міжопераційного періоду синхронного двигуна (СД) перевищує 10 хв;

-реконструкція підстанцій із заміною силових трансформаторів або їх відключення у випадках їх завантаження менше ніж тридцять відсотків від номінальної потужності;

-реконструкція енергетичного об'єкта з метою заміни асинхронних двигунів (АД) синхронними двигунами тієї ж потужності;

-впровадження тиристорного управління обертових машин з метою регулювання напруги;

-закладання в проект СД на нових енергетичних об'єктах після техніко-економічного обґрунтування;

-Заміна слабо завантажених АД меншої потужності. Цю заміну необхідно в тих випадках, коли цей захід призводить до зменшення сумарної складової втрат активної енергії в системі загалом та електродвигуна [4];

-поліпшення якості ремонтних робіт над обертовими електричними машинами, без погіршення їх номінальних параметрів.

Зупинимося над заходами, які пов'язані з встановленням пристроїв компенсації реактивної потужності [4]. До цих заходів можна віднести встановлення статичних конденсаторів, використання СД як компенсаторів.

До заходів, що належать до групи «допущені як виняток» можуть бути віднесені такі пункти [5]:

-установка та використання синхронних генераторів як синхронні компенсатори (СК);

-синхронізація обертових електричних машин, що допускається при навантаженні на валу не вище 70% від номінальної потужності та відповідного техніко-економічного обґрунтування.

1.3.2 Пристрої для компенсації реактивної потужності

Засобами компенсації реактивної потужності є такі пристрої, як генератори електростанцій та СД. До компенсуючих пристроїв також відносяться СК, БК та статичні компенсуючі пристрої (СКП) [8, 9, 27].

Розглянемо зміст рисунка 1.3. На ньому представлена однолінійна схема секції якоїсь підстанції 110/10 кВ, де є джерела реактивної потужності та різні фільтри гармонік.

1. Синхронний двигун.

Одним із ефективних пристроїв компенсації реактивної потужності є електрична машина під назвою СД. Коефіцієнт потужності цього пристрою на випереджальному струмі становить 0,9.

Максимальна реактивна потужність даного пристрою, що виробляється, виражається наступним чином [3]

$$Q_{СД\max} = k_{перQ} \cdot \frac{P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ном}}{\eta_{ном}},$$

де $k_{перQ}$ - коефіцієнт перевантаження за реактивною потужністю.

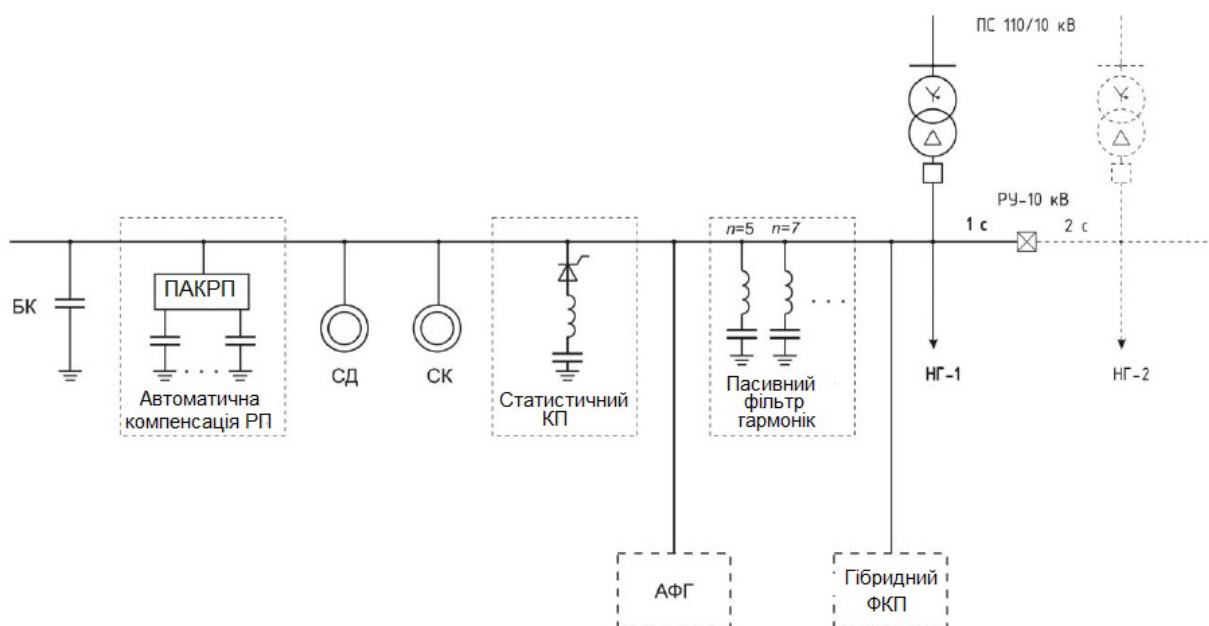


Рисунок 1.3 – Принципова схема підстанції з джерелами реактивної потужності та фільтрами гармонік

Максимальна реактивна потужність цієї машини, що генерується, залежить від завантаження двигуна активною потужністю. Вона також залежить від напруги U , що підводиться до її затискачів, та технічних даних двигуна.

На величину максимальної генерованої реактивної потужності СД сильний вплив має зміна коефіцієнта завантаження (k_3) двигуна в діапазоні від 0,8 до 1,1. При зниженні коефіцієнта завантаження нижче цієї величини цей ефект знижується.

2. Синхронний компенсатор

СД полегшеної конструкції без навантаження на валу називаються синхронними компенсаторами [11]. Вони можуть працювати як у режимі генерації реактивної потужності, так і в режимі її споживання шляхом регулювання його збудження.

Наведемо основні переваги застосування СК як джерело реактивної потужності [9, 18]. У цих пристроїв високі термічні та електродинамічні стійкості електричних обмоток у разі виникнення зовнішніх коротких замикань у системі. Ці пристрої призначені для автоматичного та плавного регулювання генерованої реактивної потужності.

Як і будь-який пристрій СК має недоліки. У порівнянні з БК у них великі експлуатаційні витрати та значна вартість. Шум під час їхньої роботи завдає великі незручності експлуатаційному персоналу [9, 18, 26]. Вони мають дуже значні втрати активної потужності. Особливо це проявляється при їх повному завантаженні. Втрати активної потужності у СК варіюються не більше від 0,011 до 0,03 кВт на один квар. У міру зменшення потужності СК питома їхня вартість та втрати активної потужності зростають пропорційно. З цього приводу наведемо лише один приклад.

Питома вартість СК потужністю 7,5 Мвар, включаючи всі витрати на встановлення, має 12,5, тоді як компенсатор потужністю 75 Мвар має 7,5 у.о. на один Мвар (у цінах до 1991 р.).

Зі сказаного можна зробити висновок, що ці пристрої вигідніше використовувати як компенсацію реактивної потужності на великих об'єктах енергетичної галузі. Що стосується доцільності їх застосування на підстанціях районного значення, їх слід порівняти з варіантом використання автоматично регульованих БК з техніко-економічним обґрунтуванням.

3. Батарея конденсаторів

Ці пристрої складаються із спеціальних ємностей, і вони також призначені для вироблення реактивної потужності. Випускаються вони на різні класи напруги та потужності, а працювати вони можуть лише як генератори реактивної потужності.

Ці пристрої мають наступні переваги. У порівнянні з СК вони мають значні менші втрати активної потужності (2,5...5,0 Вт на один реактивний квар потужності). Зважаючи на те, що у них відсутні обертові елементи, то вони прості та надійні в експлуатації. Для їх встановлення немає необхідності виконання фундаментів. З огляду малих габаритів та ваги вони прості під час виконання монтажних робіт. Для їх встановлення придатне будь-яке сухе приміщення [16, 18].

У той же час, конденсаторні батареї мають свої недоліки. Вони чутливі до спотворень напруги живлення. Мають недостатню електродинамічну стійкість при зовнішніх КЗ та перенапругах. Їх генерована реактивна потужність залежить від напруги живлення [16]

$$Q_{БК} = \left(\frac{U_{мер}}{U_{БКном}} \right)^2 \cdot Q_{БКном},$$

де $U_{ном}$ — напруга на зажимах БК;

$U_{БК ном}$ — номінальна напруга конденсаторів;

$Q_{БК ном}$ — номінальна потужність БК.

Конденсаторні батареї можна встановити трьома способами: індивідуально, групами та централізовано [6, 10].

Конденсаторну батарею наглухо підключають до затискачів приймача у разі індивідуальної установки. Цей вид установки має той недолік, що з вимкненням приймача відключаються і БК, отже, вона використовується над повною мірою [6,7].

Групову схему установки передбачає приєднання БК до розподільного пункту мережі. Цей вид установки має ту перевагу, що в цьому випадку збільшується встановлена потужність конденсаторів.

Найбільш ефективним способом застосування БК є централізоване встановлення. Вона передбачає приєднання БК за вищої напруги трансформаторної підстанції промислового підприємства.

Необхідно пам'ятати, що після вимкнення цих пристроїв їх обов'язково слід розрядити. Розрядку виконують за допомогою активних опорів, які постійно увімкнені. Ці заходи дозволяють забезпечити техніку безпеки обслуговуючого персоналу. Значення опору вибираються таким чином, щоб при їх відключенні не виникало перенапруга на затискачі конденсаторів.

4. Статичні компенсуючі пристрої.

Загальновідомо, що під час різких змін реактивної потужності значення напруги живлення зазнають значних коливань. Особливо вони характерні при роботі потужних приймачів із різко змінним навантаженням. Ці пристрої у своєму складі мають нелінійні елементи, що суттєво впливають на форму струмів та напруг [18].

Нижче наведемо вимоги до СКП.

Вони повинні мати високу швидкодію і достатній діапазон регулювання при зміні реактивної потужності, мінімально спотворювати живильну напругу і володіти можливістю генерації та споживання реактивної потужності [19]. СКП є комплексом конденсаторних батарей з регулюючим елементом. Як останній може служити керований реактор з підмагнічуванням.

У цьому пристрої зміна реактивної потужності відбувається за рахунок зміни струму підмагнічування за допомогою блоку тиристорного управління.

У СКП як накопичувачі енергії використовуються як ємнісні, так і індуктивні накопичувачі енергії. Підключаючи їх до мережі через блоки зі штучною комутацією тиристорів, вибирають кут комутації α . Залежно від цього кута вибирають режими генерації або споживання реактивної

потужності цих електричних апаратів. Вони мають високу швидкодію, володіють малими втратами активної потужності і надійністю [23].

Їх недоліками є обмежувальна сфера застосування. Вони використовуються в мережі з різко змінним навантаженням, де гостро стоїть питання зниження напруги коливання з необхідністю компенсувати реактивну потужність. Необхідність встановлення додаткового регулюючого блоку розширює цей перелік недоліків.

Дослідження питань зниження втрат потужності при компенсації реактивної потужності КУ та управління якістю електроенергії в електроенергетичних системах України описані у роботах [16, 22]. Також джерелами реактивної потужності є пасивні, активні та гібридні фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП), які докладно розглянуті в роботах [7,9]. У роботах [13-15] розглянуто ФКП на базі каткону, який компенсує реактивну потужність на основній гармоніці та фільтрує вищі гармоніки.

1.4 Вищі гармоніки. Загальні відомості

Причина появи вищих гармонік – наявність у складі навантаження споживачів із нелінійними вольт-амперними характеристиками [53, 85, 102].

До таких споживачів відносяться перетворювачі на основі напівпровідникових елементів, електрозварювальні установки, електродугові печі, джерела світла з газорозрядними лампами, силові високовольтні трансформатори та автотрансформатори, а також високовольтні двигуни [11,14]. Особливість цих пристроїв проявляється в тому, що вони генерують струми вищих гармонік при підключенні до висновків джерела з синусоїдальною напругою.

Прикладом є крива струму вентильного перетворювача, представлена на рисунку 1.4.

Будь-які складні гармонійні коливання, тобто. несинусоїдальні криві струмів слід розглядати таким чином, що вони складаються з сукупності деяких гармонійних коливань різної частоти.

З іншого боку, будь-яку періодичну функцію часу $f(\omega t)$, що задовольняє умовам Діріхле, можна представити у вигляді тригонометричного ряду Фур'є [7]

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t), \quad (1.4)$$

де A_0 – якась постійна складова;

n - номер гармоніки кривої;

a_n, b_n – коефіцієнти ряду Фур'є.

При $n = 1$ за виразом (1.4) визначається основна гармоніка. По іншому її називають першою гармонікою.

Тоді інші члени низки ($n > 1$) будуть найвищими гармоніками.

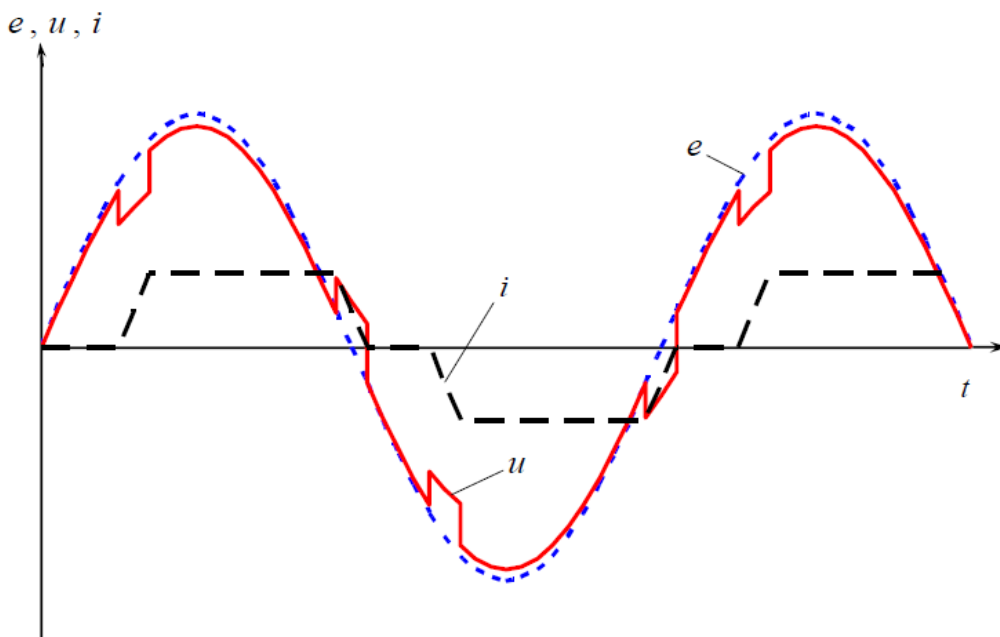


Рисунок 1.4 - Криві електрорушійної сили (ЕРС) джерела живлення e , напруги на затисках та струму i вентильного перетворювача

Для визначення коефіцієнтів ряду Фур'є існують формули:

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos n\omega t d(\omega t); \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin n\omega t d(\omega t). \end{cases}$$

Амплітуда n -ї гармоніки визначається із наступного виразу

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2},$$

початкову фазу n -ї гармоніки визначають за формулою

$$\varphi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}.$$

Очевидно, що струми вищих гармонік, як і першої, викликають падіння напруги в опорах пристроїв, підключених до нашої мережі. Очевидно, що ці струми вищих гармонійних складових накладатимуться на основну гармоніку.

Внаслідок цього відбувається спотворення форми кривої напруги на елементах мережі [15] (крива u на рисунку 1.4). Ступінь несинусоїдності напруги цієї мережі характеризується коефіцієнтом несинусоїдності напруги. Цей коефіцієнт є відношення еквівалентного чинного значення напруг вищих гармонік до напруги першої гармоніки, яке виражено у відсотках від напруги першої гармоніки [15]:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} 100,$$

де U_n , U_1 – діючі значення, відповідно n -ї та основний гармонік напруги.

1.4.1 Напівпровідникові перетворювачі

Вентильні пристрої знайшли широке застосування у народному господарстві. Без них не обходиться жодне підприємство чорної та кольорової металургії, а також хімічна промисловість. Електроенергетичні пристрої, що мають у своєму складі напівпровідникові перетворювачі споживають постійний струм. Цими пристроями можуть бути електроприводи, що регулюються, установки для виконання електролізу, гальванічні ванни, електрифікований залізничний транспорт і тролейбусні лінії, магнітні сепаратори та інші різноманітні установки.

Згідно з джерелом [9], на деяких підприємствах потужність вентильних перетворювачів іноді може досягти значень 300 МВт.

Як випрямні пристрої великої і середньої потужності широко застосовують трифазну мостову схему Ларіонова, а також шестифазну нульову схему з

зрівняльним реактором. Струми в цих схемах крім основної гармоніки містять гармонійні складові.

Номери гармонійних складових виражаються як

$$n = p\kappa \pm 1,$$

де p - число фаз випрямлення;

$\kappa = 1, 2, 3, \dots$ - ряд натуральних чисел.

На рисунку 1.5 представлені криві первинного струму перетворювача.

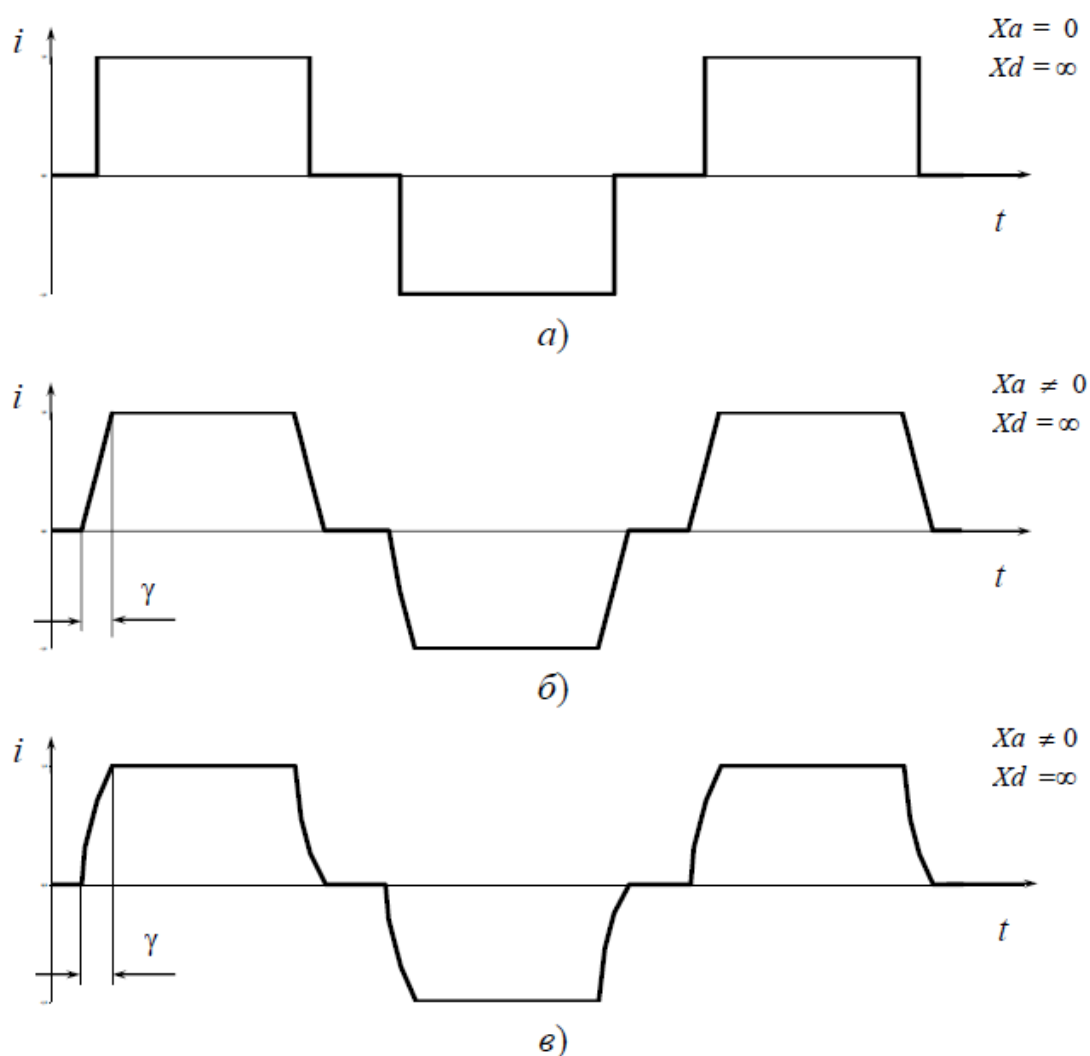


Рисунок 1.5 – Криві первинного струму вентильного перетворювача:

а – без урахування комутації; б - при комутації по прямій лінії (спрощено);

в - при комутації по косинусоїді.

1.4.2 Дюгові електричні печі та установки електродугового зварювання

Дугові електричні печі набули широкого поширення на сучасних металургійних та машинобудівних підприємствах. Печі будуються ємністю від 0,5 до сотень тонн і живляться від силових трансформаторів потужністю 0,4 - 150 МВ·А. У цих печах генеруються струми вищих гармонік внаслідок нелінійної вольт-амперної характеристики дуги. Залежно від режиму горіння дуги в печах у різні етапи плавки металу виникають різні форми кривої струму.

У початковий період плавки металу струм печі змінюється у межах, від значень струмів холостого ходу до металевого замикання. На цьому етапі плавлення значення струму навантаження носить випадковий характер, і він помітно відрізняється від синусоїдального. На наступному етапі плавки металу цей процес відбувається при короткій дузі. Початком цього процесу є ознаки появи рідкої фази металу, а криві струму помітно змінюються у бік поліпшення і прагнуть ближче до синусоїди.

Дугові електричні печі генерують гармоніки порядку $n = 6k \pm 1$ ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Дугові печі в основному генерують п'яту, сьому, одинадцяту та тринадцяту гармоніки. Їх рівень у порівнянні з основною гармонікою невеликий, а їхнє еквівалентне діюче значення на порядок нижче, ніж основна гармоніка.

Крива струму даних пристроїв, крім непарних гармонік, містять і парні гармоніки, такі як друга, четверта і шоста. Вони тут утворюються через безперервні зміни умов горіння дуги, а також через розбаланс опору короткої мережі.

Значення струму в плавильній печі внаслідок цих причин може зрости практично вдвічі [17].

Жодне промислове підприємство не обходиться без застосування зварювальних агрегатів. Відомо, що для живлення цих електричних апаратів необхідні випрямляючі пристрої. У зварювальних випрямлячах використовується трифазна мостова схема випрямлення з некерованими вентилями. Потужності цих пристроїв невелика і становлять до кількох десятків кВ·А, а живляться вони, як правило, від мережі 380/220 Ст.

Наявність тих чи інших гармонійних складових струму зварювальних випрямлячів в основному залежить від режиму їх роботи. Можна виділити основні три режими роботи цих пристроїв [19].

У режимі, так званому «А», при малих навантаженнях – переривчасті струми.

У режимі, так званому «В», при середніх навантаженнях струми зазнають дво- і тривентильної комутації.

У режимі, так званому «С», при великих навантаженнях – струми зазнають тривентильної комутації.

У кривих струму зварювальних агрегатів, крім п'ятої та сьомої гармонік, спостерігається й інші гармоніки. Це гармоніки парного порядку та гармоніки кратні трьом. Причиною їх є розкид кутів запалювання груп вентилів, що зумовлено нестабільністю характеристик окремих вентилів.

В останні роки широко використовується контактне електрозварювання. Таке зварювання здійснюється із застосуванням тиристорних ключів і вони забезпечені системою фазового регулювання, використання яких призводить до спотворення форми струму, що споживається зварювальними машинами.

Еквівалентна схема зварювальної машини представлена на рисунку 1.6.

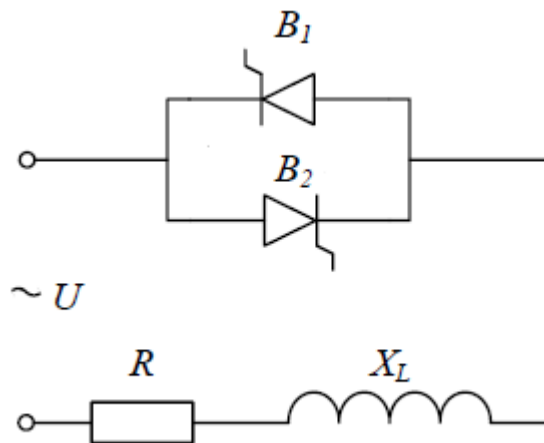


Рисунок 1.6 – Еквівалентна схема зварювальної машини:

B_1 та B_2 – керовані елементи; R та X_L – відповідно, активний та індуктивний опір машини.

Наведемо формулу, за якою проводиться визначення середніх діючих значень струму

$$I_{n,p} = \frac{S_{\text{пасп}} \cdot k_z \cdot k_{\text{зап}}}{n^2 \cdot U_{\text{ном}}},$$

де $S_{\text{пасп}}$ – потужність зварювального агрегату відповідно до паспорта;

k_z - коефіцієнт завантаження зварювального агрегату;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга агрегату;

$k_{\text{зап}}$ - коефіцієнт запасу.

Нижче наведемо значення коефіцієнта запасу для наступних гармонік.

Для першої гармоніки він становить 0,97, для третьої – 2,0, для п'ятої – 2,3, для сьомої – 1,4.

У кривій струму зварювального агрегату переважають перша, третя та п'ята гармонійні складові. Крім цих гармонік тут мають місце гармоніки парного порядку [13]. Їхнє перебування тут, як ми вже говорили, пояснюється розкидом кутів регулювання вентилів. Ці розбіжності можуть досягати 10 градусів. На практиці вплив парних вищих гармонійних складових незначний і становить частки відсотків.

Електричні перетворювачі, такі як силові трансформатори та електродвигуни також є джерелами вищих гармонік. У нормальному робочому режимі ці пристрої практично не генерують гармоніки. У режимі живлення підвищеною напругою відбувається насичення магнітопроводів, що призводить до зниження опору намагнічування цих елементів. В результаті споживаний з мережі струм збільшується - у спектрі струму з'являються вищі гармоніки.

Наступний тип найвищих гармонік – газорозрядні лампи. З урахуванням незначної споживаної потужності промисловими підприємствами на освітлення та невеликої частки вищих гармонік щодо основного впливу таких ламп на несинусоїдність практично не позначається.

1.5 Вплив несинусоїдності на роботу електроприймачів

На елементах СЕП найвищі гармонічні складові струму призводять до появи додаткових втрат активної потужності [24]. Ці втрати можна розрахувати за наступною формулою

$$\Delta P = 3 \sum_{n=2}^m I_n^2 \cdot R_n,$$

де R_n - активний опір елемента струму n -ї гармоніки;

I_n - струм n -ї гармоніки.

Силові трансформатори, електродвигуни, генератори мають великі додаткові втрати активної потужності. Ці втрати залежать від активних опорів їх обмоток і збільшуються приблизно пропорційно $\sqrt{n}$. У деяких випадках вони можуть призводити до неприпустимих перегріву обмоток цих пристроїв [17].

Наявність вищих гармонік призводять до старіння ізоляції обмоток електричних машин [24]. Цей процес протікатиме значно швидше, ніж у випадку роботи їх під синусоїдальною напругою [12, 17, 19]. Пояснення цього процесу дуже просте. Під дією вищих гармонік прискорюються фізико-хімічні процеси в діелектриках.

На підтвердження цього твердження наведемо такий приклад. Виявлено, що за два роки експлуатації тангенс кута діелектричних втрат ($\tan \delta$) конденсаторів збільшився удвічі. Таке збільшення відбулося під дією еквівалентного чинного значення вищих гармонік, яке дорівнювало п'яти відсоткам напруги промислової частоти.

Струми та напруги вищих гармонік негативно впливають і на точність виміру [12, 17, 19, 26]. Вони викликають збільшення похибки приладів обліку електроенергії. Особливо вони впливають на індукційні прилади, які під дією вищих гармонік можуть мати значну похибку, досягаючи до 10 відсотків [12, 17, 22].

Похибки таких величин суттєво впливають на облік споживання електроенергії. У літературі [9] представлено, що з додаткової частотної

похибки від однієї до чотирьох відсотків за умов однієї з прокатних станів на рік недообліковувалось близько п'яти млн. кВт·год. електричної енергії.

Вищі гармоніки серйозно перешкоджають нормальній роботі передачі інформації каналами зв'язку. Вони надають сильний вплив під час обміну інформацією між підстанціями повітряними лініями електропередач. Під їх впливом відбуваються збій на телемеханічних пристроях.

Під їхньою дією можуть відбуватися неправильна робота пристроїв релейного захисту з помилковим відключенням енергетичного об'єкта, в якій використовуються фільтри струмів зворотної послідовності [12,].

У роботі [91] показано, що за наявності вищих гармонійних складових кривої струму від п'яти до семи відсотків, може статися хибна робота релейного захисту та автоматики. Самі вентиляльні перетворювачі теж страждають від їхньої присутності. Вищі гармоніки погіршують їхню якість роботи.

Істотно впливають вони на функціонування БК. Під впливом вищих гармонійних складових ці пристрої спучуються, а потім і руйнуються [12, 17]. Положення посилюється і тоді, коли БК перевантажені струмами вищих гармонік у режимі резонансу хоча б на одній частоті [12,17].

У роботі [9] наводиться випадок, коли були зареєстровані амплітуди резонансних гармонік в струмах батарей, що вдвічі перевищують амплітуду першої гармоніки.

Насправді використання батарей конденсаторів зафіксовано випадки, коли амплітуда струму окремих гармонік перевищували амплітуду основний гармоніки вдвічі. При цьому напруга на резонансній частоті дорівнювала 60% напруги промислової частоти. Щоб обмежити несинусоїдність форми кривої напруги у повсякденному житті свого часу було введено ДСТУ 32144-20131. Тут основним показником, який характеризував би цю несинусоїдність, був прийнятий такий параметр, як еквівалентне значення вищих гармонік, що діє. Відповідно до цього стандарту, чинне значення вищих гармонік напруги не

повинен вийти за межі 5-відсоткового чинного значення напруги промислової частоти на виводах будь-якого електроприймача в мережі 6-10 кВ.

Висновки по першому розділу

Різнотактні електричні перетворювачі, такі як силові трансформатори та електродвигуни є джерелами вищих гармонік.

На елементах СЕП найвищі гармонічні складові струму призводять до появи додаткових втрат активної потужності.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ КОНДЕНСАТОРНИХ УСТАНОВОК

2.1 Способи зниження частки вищих гармонійних складових у системах електропостачання

Вище було показано, що наявність вищих гармонійних складових у мережі не найкраще впливає як на роботу електроприймачів, так і на електричну мережу. Через їхню присутність у мережі виникають значні матеріальні витрати, як лініях електропередачі, і на енергетичних об'єктах. З цієї причини виникає потреба їх зниження в електричних мережах [18].

Заходи щодо зниження частки вищих гармонік можуть бути різними. Вони залежить від режиму роботи промислового підприємства, електричної мережі, виду джерела вищих гармонік, схеми електропостачання, і навіть очікуваного економічного ефекту.

Зменшення рівня вищих гармонійних складових у системі електричної мережі можна досягти рахунок оптимального проектування схеми електропостачання, використання багатофазних схем випрямлення, пасивних фільтрів гармонік [19].

Застосовуються також активні фільтри гармонік (динамічні фільтрокомпенсуючі пристрої) [12, 17, 20] та роздільне живлення навантажень, що містять джерела вищих гармонік та навантажень з лінійною вольтамперною характеристикою. Останній захід вважається одним із найдоступніших способів зниження несинусоїдності. Зазвичай це завдання вирішується виділенням споживачів із нелінійними навантаженнями на окрему секцію шин. У більшості випадків ці навантаження підключаються до однієї з обмоток триобмотувального силового трансформатора або реактора [6]. При цьому розв'язанні задачі допустиме значення сумарного коефіцієнта гармонійних складових напруги (K_U) на шинах РП з нелінійним навантаженням визначається лише з однією метою: забезпечити надійну роботу систем керування та надійність роботи самих споживачів. Розглядається і альтернативний варіант: розподіл нелінійних споживачів за

різними вузлами електричної мережі, виходячи з нормативного рівня несинусоїдності [20].

Збільшення потужності КЗ на шинах РП. До схемних заходів відноситься також спосіб збільшення потужності КЗ у загальній точці приєднання нелінійного та іншого навантаження. У мережах з вентильними перетворювачами сумарний коефіцієнт гармонійних складових напруги K_U з достатнім ступенем точності може бути розрахований за формулою [21]

$$K_U = \frac{S_{np}}{S_{K3}} \cdot \sqrt{\frac{0.995 \sin \varphi}{S_{np}/S_{K3} + x_{np}^*}} - 0,91. \quad (2.1)$$

де S_{K3} – потужність КЗ системи;

$$x_{np}^* = \frac{U_K (1 + K_p) S_{np}}{100 S_{ном.т}} - \text{індуктивний опір перетворювального агрегату};$$

$U_K\%$ - напруга КЗ трансформатора;

K_p – коефіцієнт розщеплення обмоток трансформатора;

$S_{ном.т}$ – номінальна потужність трансформатора;

φ – кут зсуву між основною гармонікою змінної напруги, що додається до перетворювача, та основною гармонікою струму.

Аналогічно розраховується K_U в мережах з електроприводом, виконаним за схемою асинхронного вентильного каскаду [21].

Відповідно до (1.8) зі збільшенням потужності КЗ мережі, рівень вищих гармонійних складових у мережі зменшується.

Зменшення гармонійних складових струму та напруги можна досягти шляхом зміни числа фаз випрямлення у бік їх збільшення. Ця констатація очевидна з формули 1.5 де спектральний склад струмів вентильного перетворювача залежить від числа фаз випрямлення p .

Очевидно, що форма первинного струму перетворювача наближається до синусоїди у разі збільшення числа p , а кількість гармонік зменшується.

У разі використання шести фазної схеми випрямлення ($p = 6$) в струмі вентильного перетворювача можуть бути гармоніки: п'ята, сьома, одинадцята, тринадцята, сімнадцята, дев'ятнадцята, двадцять третя, двадцять п'ята. При

використанні дванадцяти фазної схеми ($p = 12$), в кривій напруги містяться одинадцята, тринадцята, двадцять третя, двадцять п'ята гармоніка. Таким чином, при переході із шести фазної до дванадцяти фазної схеми випрямлення ліквідуються гармоніки з номерами $n=6$ $(2k-1)\pm 1$. Таким чином, несинусоїдність напруги в мережі може зменшитися в 1,4 рази [21].

Отже, зі збільшенням кількості фаз випрямлення знижується вміст вищих гармонік у кривих первинного струму перетворювачів та напруги мережі.

Використання фільтрів найвищих гармонік. Схема підключення пасивного фільтра гармонік (ПФГ) до шин розподільчого пристрою представлена рисунку 2.1.

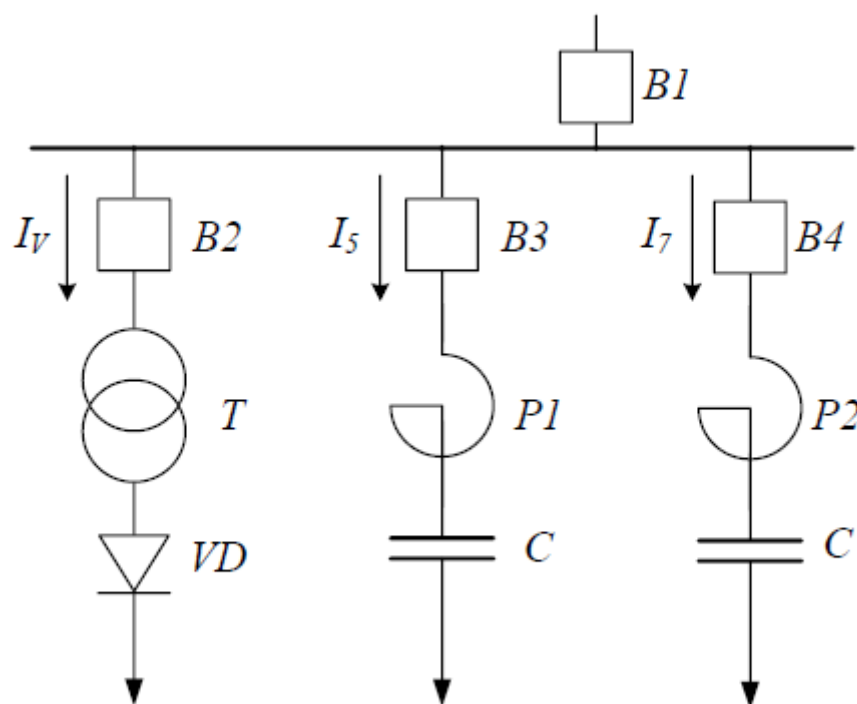


Рисунок 2.1 – Схема включення пристрою фільтра вищих гармонік до ошиновування, де B1-B4 – вимикачі, P1, P2 – реактори, C – конденсатор, VD – випрямляч

Наведемо вираз визначення опору ланки ПФГ струмами вищих гармонік

$$X_{\phi,n} = X_{L,n} - X_{C,n},$$

або

$$X_{\phi,n} = X_L n - \frac{X_C}{n},$$

де X_L , X_C - опір індуктивності реактора і ємності конденсатора на частоті 50 Гц, відповідно.

З цього виразу очевидно, що чим більша частота, тим більший індуктивний опір реактора, і він зростає в міру збільшення гармоніки. Також очевидно, що у міру збільшення гармоніки, опір конденсатора падає пропорційно до значення гармоніки (рисунок 1.8).

Якщо на певній частоті індуктивний опір реактора і ємнісний опір конденсатора будуть рівні, то відбувається резонанс напруги. У цьому випадку опір ланки $X_{\phi n}$ току цієї гармоніки стає рівним нулю. При цьому на цій частоті електрична схема буде зашунтована.

Номер резонансної гармоніки n можна визначити, використовуючи формулу

$$n_p = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}.$$

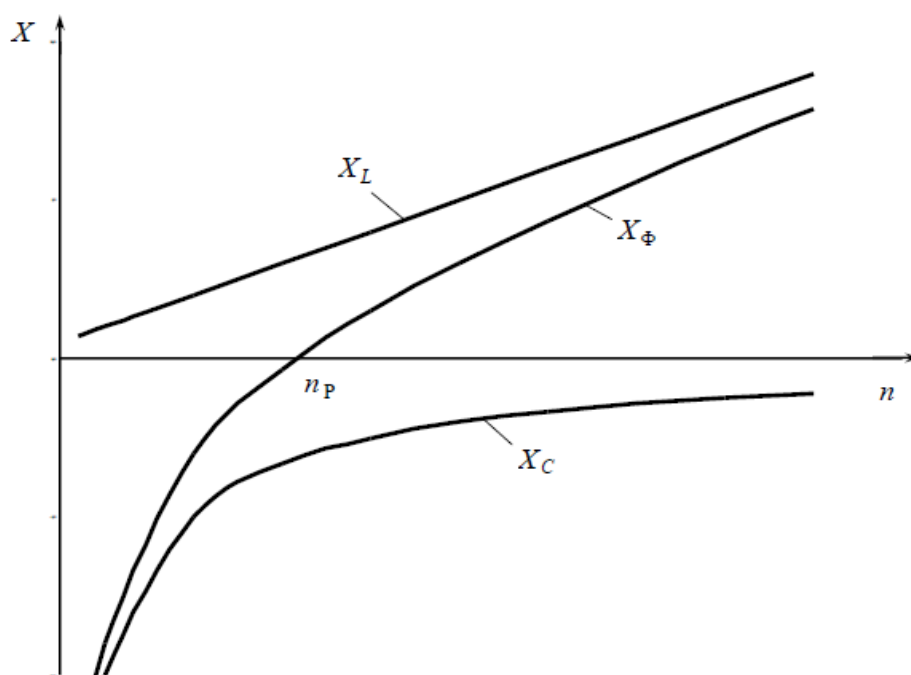


Рисунок 1.8 – Залежність опорів елементів ланки пасивного фільтра від номера гармонік

Теоретично, ідеальний фільтр повністю споживає струм гармоніки I_n , що генерується нелінійними елементами. Однак, виду того, що реактор і

конденсатор мають певне значення активного опору, то повна фільтрація гармонійних складових неможливо.

ПФГ складається з кількох ланок. Кожна ланка налаштована на резонанс на своїй гармоніці.

Число ланок у цьому пристрої може бути будь-яким. Однак, як правило, найчастіше кількість ланок у фільтрі становить два або чотири. Вони налаштовуються на 5, 7, 11, 13, 23 і 25-ю гармоніки. Фільтри необхідно підключати там, де можуть бути найвищі гармоніки або там, де вони можуть бути посилені (резонанс струмів).

Недоліком цих пристроїв є їх висока вартість [22]. Тому їх застосовують в обмежених випадках, коли одночасно необхідно компенсувати реактивну потужність у розглянутому пункті електричної мережі і не допустити проникнення в цю мережу струмів деяких гармонік. Іншим недоліком є труднощі їх налаштування. Якщо це налаштування досягти не вдасться, то ефективність фільтра зменшується з подальшим збільшенням гармонік напруги на шинах розподільчого пристрою (РП).

2.2 Розрахунок потужності КУ для забезпечення необхідного значення коефіцієнта реактивної потужності

Коефіцієнт потужності на введенні підприємства значно менший за 1,0. Особливо це виражено в електричних мережах до 1000 В: значення $\cos\varphi$ зазвичай не більше 0,8 [22]. Істотну частка споживаної цієї потужності підприємства посідають установки частотно регульованих приводів (ЧРП). В останні роки спостерігається тенденція зростання цього показника.

З метою підвищення коефіцієнта потужності можуть застосовуватись КУ. Їх застосування приводять [9, 23]:

- до зниження втрат активної потужності і відповідно втрат електричної енергії;
- до підтримки певного рівня напруги на затискачах електроприймачів;
- до розвантаження елементів мережі;
- до поліпшення якості електричної енергії;

-до збільшення пропускної спроможності мережі (стає можливим використання додаткового активного навантаження, не збільшуючи номінальних параметрів елементів СЕС);

-до подовження терміну служби електроустановок і т.д.

Широке застосування БК в якості компенсації реактивної потужності на промислових підприємствах з малою встановленою потужністю активізується із запровадженням на дію Наказу Міністерства енергетики України №764, оскільки цей документ регламентує співвідношення споживання активної та реактивної потужностей для окремих груп споживачів [11].

У точці підключення КУ баланс реактивної потужності записується як [21]

$$Q_{\text{нв}} = Q_C + Q_{\text{КУ}},$$

де $Q_{\text{нв}}$ - реактивна потужність навантаження;

Q_C - реактивна потужність, що споживається із системи;

$Q_{\text{КУ}}$ – реактивна потужність КУ.

Звідси потужність КУ визначається

$$Q_{\text{КУ}} = Q_{\text{нв}} - Q_C.$$

Даний вираз можна переписати наступним чином

$$Q_{\text{КУ}} = P_{\text{нв}} \left(\frac{Q_{\text{нв}}}{P_{\text{нв}}} - \frac{Q_C}{P_{\text{нв}}} \right),$$

де $P_{\text{нв}}$ - активна потужність навантаження.

На основі тотожності $\text{tg}\varphi = Q/P$ потужність КУ через коефіцієнти реактивної потужності навантаження та живильної системи визначається за формулою [9, 21]

$$Q_{\text{КУ}} = P_{\text{нв}} (\text{tg}\varphi_{\text{нв}} - \text{tg}\varphi_C).$$

Отриманий вираз дозволяє визначити потужність КУ у вузлі навантаження $P_{\text{нв}}$, яка необхідна для забезпечення коефіцієнта реактивної потужності у галузі живильної системи $\text{tg}\varphi_C$. Остаточну, відповідно до Наказу №764, необхідна потужність КУ розраховується за формулою [1,16]

$$Q_{\text{КУ}} = P_{\text{нв}} (\text{tg}\varphi_{\text{нв}} - \text{tg}\varphi_{\text{норм}}). \quad (2.2)$$

Отриманий вираз дозволяє розрахувати потужність КУ, що забезпечує індуктивний режим навантаження на введенні енергооб'єкта.

Коефіцієнт потужності навантаження розраховується за такою формулою [25]

$$\cos \varphi_{\text{нв}} = \frac{P_{\text{нв}}}{\sqrt{P_{\text{нв}}^2 + Q_{\text{нв}}^2}} .$$

де $P_{\text{нв}}$, $Q_{\text{нв}}$ – активна та реактивна потужності, що споживаються навантаженням.

Загальний коефіцієнт потужності у разі застосування КУ обчислюється за виразом

$$\cos \varphi_{\text{КУ}} = \frac{P_{\text{нв}}}{\sqrt{P_{\text{нв}}^2 + (Q_{\text{нв}} - Q_{\text{КУ}})^2}} .$$

Замінивши в даному виразі $\cos \varphi_{\text{КУ}}$ на $\cos \varphi_{\text{норм}}$, відповідний значенню коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg} \varphi_{\text{норм}}$, що нормується, з урахуванням $Q_{\text{нв}} = P_{\text{нв}} \cdot \text{tg} \varphi_{\text{нв}}$ можна переписати

$$Q_{\text{КУ}}^2 - 2P_{\text{нв}} \text{tg} \varphi_{\text{нв}} Q_{\text{КУ}} + P_{\text{нв}}^2 \text{tg}^2 \varphi_{\text{нв}} + P_{\text{нв}}^2 - \frac{P_{\text{нв}}^2}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} = 0 . \quad (2.3)$$

Другу частину даного виразу, що містить множник $P_{\text{нв}}^2$, слід подати в наступному вигляді

$$P_{\text{нв}}^2 \text{tg}^2 \varphi_{\text{нв}} + P_{\text{нв}}^2 - \frac{P_{\text{нв}}^2}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} = P_{\text{нв}}^2 \left(\text{tg}^2 \varphi_{\text{нв}} + 1 - \frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} \right) .$$

З урахуванням наступних послідовних перетворень:

$$1 - \frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} = \frac{\cos^2 \varphi_{\text{норм}} - 1}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} ,$$

$$1 - \frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} = -\frac{\sin^2 \varphi_{\text{норм}}}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} ,$$

$$1 - \frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} = -\text{tg}^2 \varphi_{\text{норм}} .$$

одержуємо

$$P_{\text{нв}}^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{нв}} + P_{\text{нв}}^2 - \frac{P_{\text{нв}}^2}{\cos^2 \varphi_{\text{норм}}} = P_{\text{нв}}^2 (\operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{норм}}) .$$

На основі вищенаведених перетворень формулу (2.3) можна подати у вигляді

$$Q_{KV}^2 - 2P_{\text{нв}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} Q_{KV} + P_{\text{нв}}^2 (\operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{норм}}) = 0 . \quad (2.4)$$

Отриманий вираз є квадратним рівнянням виду $ax^2+bx+c=0$ щодо Q_{KV} . Коефіцієнти даного рівняння рівні:

$$\begin{aligned} a &= 1; \\ b &= -2P_{\text{нв}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}; \\ c &= P_{\text{нв}}^2 (\operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{норм}}) . \end{aligned}$$

З урахуванням, що $a=1$ і b кратно двом, корені рівняння (2.4) доцільно обчислити за виразам:

$$\begin{aligned} Q_{KV1} &= -\frac{b}{2} - \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - c}; \\ Q_{KV2} &= -\frac{b}{2} + \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - c}. \end{aligned}$$

Відповідно до розрахунків, перше значення відповідає режиму компенсації. Воно необхідне досягнення бажаного значення $\cos \varphi_{\text{норм}}$ в індуктивному режимі. Друге значення необхідне для досягнення $\cos \varphi_{\text{норм}}$, що забезпечує активно-ємнісний режим роботи мережі, тобто. $Q_{KV2} > Q_{\text{нв}}$. Як показує аналіз економічного розрахунку, підтримка активно-ємнісного режиму роботи у розподільчій мережі неефективна. У разі значно збільшуються витрати на КУ [24].

Висновки по другому розділу

У нинішніх умовах компенсації реактивної потужності застосовуються компенсуючі пристрої різних типів. До них відносяться батареї конденсаторів, синхронні двигуни та компенсатори, статичні пристрої, що компенсують. Батареї конденсаторів мають низькі питомі втрати активної потужності та малу питому вартість. Вони прості при монтажі та експлуатації. При ступінчастому регулюванні реактивну потужність, що генерується, можна

здійснити в широких межах. Таким чином, застосування батарей конденсаторів як компенсуючі пристрої має певні переваги в порівнянні з іншими варіантами.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇ АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

3.1 Автоматична компенсація реактивної потужності батареями конденсаторів

В даний час для компенсації реактивної потужності застосовуються КУ різних типів: БК, СД та СК, СКУ [17,19]. Питомі втрати активної потужності на вироблення реактивної потужності в БК становлять 2,5 5,0 Вт/квар [16].

Як було зазначено, що цей показник інших джерел реактивної потужності значно більше наведених значень. Важливе значення має їх мала питома вартість, простота монтажу та експлуатації. У доповненні цих переваг, вони дозволяють у широких межах регулювати генеровану реактивну потужність. Отже, БК мають низку важливих переваг щодо інших пристроїв компенсації реактивної потужності [6].

Згідно з літературою [9, 18] промислові підприємства залежно від сумарної встановленої потужності електроприймачів умовно поділяються на три групи:

- великі - $P_{уст}$ більше 75 МВт;
- середні - $5 \leq P_{уст} \leq 75$ МВт;
- з малою встановленою потужністю електроприймачів – не більше 5 МВт.

Досвід експлуатації показує, що на середніх та великих підприємствах вигідно використовувати СК або СД. Тут лише в окремих випадках як компенсацію реактивної потужності застосовуються БК. Вигідність використання СК на середніх та великих енергооб'єктах пояснюється тим, що відповідно до ГОСТ 609-84 ці пристрої на клас напруги 6 кВ випускаються з мінімальною потужністю 2,8 МВ·А, а на 10 кВ з мінімальною потужністю 10 МВ·А. Тому на цих енергооб'єктах вони будуть недовантажені, а отже ефективність їх застосування буде низькою. З іншого боку, зростуть витрати на будівельно-монтажні, пусконаладжувальні роботи, а також на експлуатацію цих пристроїв. Важливим фактором є й підвищення питомої

вартості СК та втрати активної потужності у міру зменшення їхньої номінальної потужності.

Безперечно, навантаження будь-якого підприємства є нестабільним: відбувається як добова, так і сезонна зміна навантаження. Також можливі варіювання навантаження, що визначаються випадковими подіями. При цьому коефіцієнт потужності залежить від режиму роботи підприємства і може перебувати в межах $0,7 \dots 0,9$ і менше [22]. Через війну споживання реактивної потужності змінюється у межах. У цьому випадку застосування нерегульованих БК не дає змоги забезпечити значення коефіцієнта реактивної потужності, що регламентуються Наказом №764. Досить часто на підприємствах з великим розкидом параметрів енергоспоживання використовується ПАКРП – зміна генерованої реактивної потужності залежно від параметрів споживання електроенергії (іноді доби та сезону) [17].

На рисунку 3.1 наведено розрахункову схему електричної мережі для розрахунку компенсації реактивної потужності. Електропостачання енергооб'єкта здійснюється від системи С. Від РП отримують живлення споживачі різних рівнів напруги, які показані у вигляді узагальненого навантаження (НВ). Для компенсації реактивної потужності застосовують БК.

Досить часто у разі широкого діапазону зміни реактивної потужності, що споживається, застосовується автоматичне регулювання потужності БК – ПАКРП.

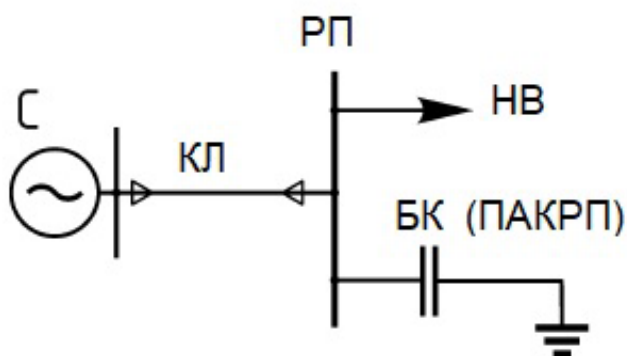


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема електричної мережі для розрахунку компенсації реактивної потужності

На рисунку 3.2 показані графіки, що пояснюють роботу такого пристрою на різних щаблях компенсації. Робочі зони щаблів перебувають між прямими $Q_{ст}=f(P_{нв})$, побудованими з урахуванням гранично допустимих значень коефіцієнтів реактивної потужності на введенні підприємства $\text{tg}\varphi=0$ та $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}$ [15].

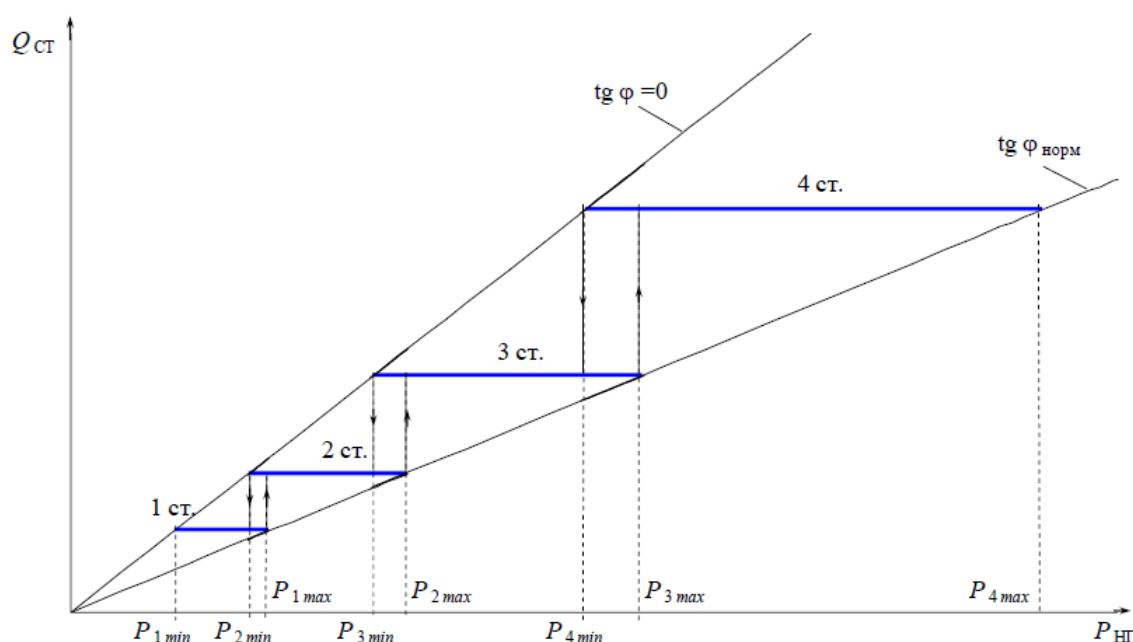


Рисунок 3.2 – Робота ПАРП на різних щаблях компенсації реактивної потужності

Збільшення активної потужності $P_{нв}$ супроводжується зростанням споживаною навантаженням реактивної потужності $Q_{нв}$. При незмінній потужності щаблі компенсації $Q_{ст}$ і коефіцієнт реактивної потужності на введенні промислового підприємства збільшується. В результаті при навантаженні $P_{i \max}$ значення $\text{tg}\varphi$ досягає нормованого значення $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}$. Блок регулювання в такому випадку переводить ПАРП на наступний ступінь компенсації $Q_{ст(i+1)}$ з великим значенням реактивної потужності, що генерується (стрілка вгору на рисунку 3.2). У результаті значення коефіцієнта реактивної потужності на введенні підприємства знижується практично до нуля.

Зменшення активної потужності $P_{\text{нв}}$ передбачає зниження споживаної реактивної потужності $Q_{\text{нв}}$. Таке зниження може призвести до надлишку реактивної потужності на введенні підприємства ($\text{tg}\varphi \leq 0$). Для виключення цього режиму слід зменшити реактивну потужність, що генерується, тобто. переключити ПАКРП на менший рівень компенсації (стрілка вниз рисунку). Даному перемикаючому відповідає точка на графіку $P_{\text{нв}} = P_{\text{min I}}$.

Таким чином, кожен ступінь забезпечує компенсацію реактивної потужності у певному інтервалі зміни навантаження підприємства: перший – в інтервалі від $P_{1\text{min}}$ до $P_{1\text{max}}$, друга – від $P_{2\text{min}}$ до $P_{2\text{max}}$ тощо. Режим компенсації визначається кількістю одночасно включених секцій БК $N_{\text{роб.секц}}$, сумарна потужність яких $\sum_{i=1}^{N_{\text{роб.секц}}} Q_{\text{секц } i}$ визначає генеровану реактивну потужність ПАКРП на кожному ступені компенсації. Це дозволяє ступінчасто регулювати реактивну потужність, що генерується пристроєм.

Таке регулювання є найбільш ефективним при співвідношенні потужностей секцій 1:2:4 і т.д., що дозволяє більш повно використовувати БК [23]. У цьому випадку регулювання генерованої потужності можна здійснювати з фіксованим кроком. Крок регулювання визначається потужністю секції з мінімальним значенням $Q_{\text{секц } 1}$. Потужність будь-якої з наступних секцій може бути визначена за виразом

$$Q_{\text{секц } n} = 2^{n-1} Q_{\text{секц } 1}.$$

Кількість всіх можливих ступенів $N_{\text{ст}}$ (кількість режимів компенсації, з різними значеннями потужності, що генерується) виражається формулою

$$N_{\text{ст}} = N_{\text{секц}}^2 - 1,$$

де $N_{\text{секц}}$ - кількість секцій ПАКРП.

Як правило, з метою зниження кількості перемикачів використовуються не всі можливі ступені. Робочі зони суміжних ділянок перекриваються на величину $P_{s\ i}$, що необхідно для сталої роботи пристрою. Вибір потужності робочого ступеня ПАКРП визначається з умови перекриття робочих зон двох суміжних щаблів на 5...10%. Така вимога особливо важлива у разі різко

змінного навантаження - з метою забезпечення стабільної роботи пристрою перекриття робочих зон може бути збільшено в 1,5... 2 рази.

Збільшення перекриття робочих зон дозволяє виключити безперервні перемикання (брязкіт контактів) при зміні навантаження.

3.2 Розрахунок параметрів ПАКРП

3.2.1 Розрахунок відносини потужностей суміжних щаблів ПАКРП

Потужність кожного ступеня ПАКРП Q_{cti} залежить від параметрів суміжних щаблів компенсації, можливих значень коефіцієнта реактивної потужності навантаження нормованого значення на введенні підприємства. При розрахунку значень Q_{cti} необхідно врахувати необхідну зону перекриття робочих зон суміжних щаблів [15].

На рисунку 3.3 показані робочі зони двох суміжних щаблів компенсації Q_{cti} та $Q_{ct(i+1)}$. На щаблі Q_{cti} компенсація реактивної потужності виконується за зміни навантаження від $P_{i\min}$ до $P_{i\max}$, на щаблі $Q_{ct(i+1)}$ – в інтервалі від $P_{(i+1)\min}$ до $P_{(i+1)\max}$. У межах робочої зони кожного ступеня забезпечується зміна коефіцієнта реактивної потужності на введенні підприємства від 0 до $\tan \varphi_{\text{норм}}$.

Як очевидно з графіка, робочі зони щаблів перекриваються, тобто. є загальна робоча область між ступенями, ширина якої дорівнює P_{Si}

$$P_{Si} = P_{i\max} - P_{(j+1)\min}.$$

Відносне значення даної галузі може бути виражене у вигляді відношення

$$k_p = \frac{P_{i\max} - P_{(j+1)\min}}{P_{i\max}}.$$

На підставі виразу (2.1) потужність БК i -ої ступені компенсації визначається з обліком режиму повної компенсації

$$Q_{cti} = P_{i\min} \tan \varphi_{\text{нв}}.$$

Аналогічним чином розраховується потужність БК $(i+1)$ -ої ступені

$$Q_{ct(i+1)} = P_{(i+1)\min} \tan \varphi_{\text{нв}}. \quad (3.1)$$

Відповідно до виразу (2.1) максимальна потужність навантаження робочої зони i -го щаблі складає

$$P_{i \max} = \frac{Q_{\text{ст } i}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} . \quad (3.2)$$

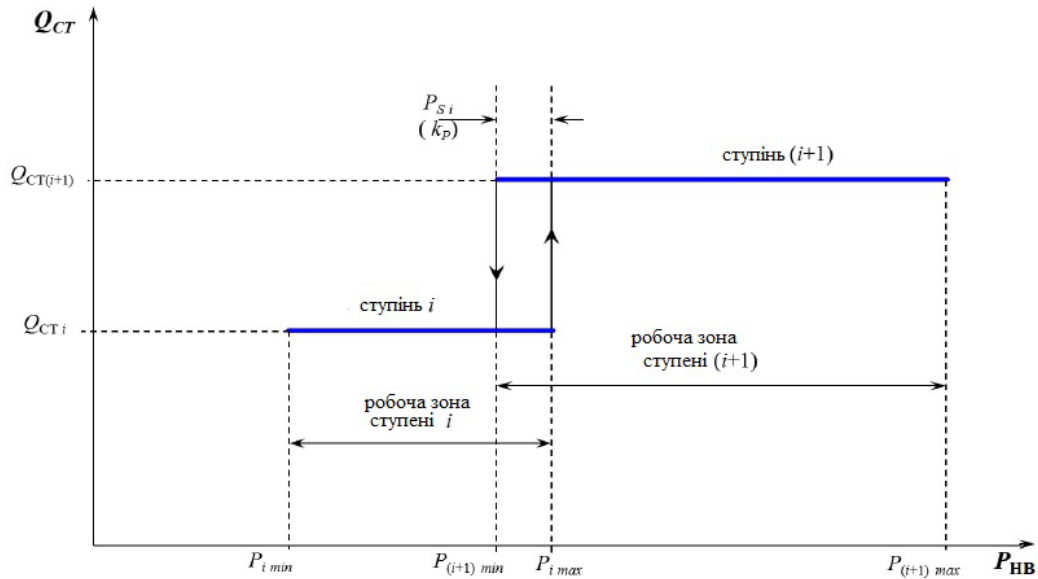


Рисунок 3.3 – Робочі зони двох суміжних ступенів компенсації

Для забезпечення перекриття робочих зон суміжних щаблів мінімальна потужність навантаження на щаблі $(i+1)$ має бути менше максимальної потужності на попередній щаблі. З урахуванням загальної робочої області $P_{S i}$ між ступенями має виконуватися умова

$$P_{(i+1) \min} \leq (1 - k_p) P_{i \min} .$$

Дане співвідношення з урахуванням рівності (3.2) виражається у вигляді

$$P_{(i+1) \min} \leq (1 - k_p) \frac{Q_{\text{ст } i}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} .$$

Потужність БК $(i+1)$ -го ступеня компенсації з урахуванням отриманого співвідношення та виразе (3.1) має задовольняти умові

$$Q_{\text{ст}(i+1)} \leq (1 - k_p) Q_{\text{ст } i} \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} . \quad (3.3)$$

Відношення реактивних потужностей двох суміжних щаблів компенсації доцільно подати через коефіцієнт k_Q

$$k_Q = \frac{Q_{\text{ст}(i+1)}}{Q_{\text{ст } i}} . \quad (3.4)$$

З урахуванням виразу (3.3) значення коефіцієнта k_Q має задовольняти умові [9]

$$k_Q \leq (1 - k_p) \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} . \quad (3.5)$$

Як показує аналіз, область перекриття робочих зон k_p мінімальна в режимі роботи споживача з найменшим значенням коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{\text{нв}}$. Відповідно до цього при визначенні значення k_Q як розрахунковий слід прийняти навантаження з мінімальним $\cos \varphi_{\text{нв}}$.

На малюнку 3.4 наведено залежність коефіцієнта k_Q від $\cos \varphi_{\text{нв}}$ при різних значеннях перекриття робочих зон суміжних щаблів k_p .

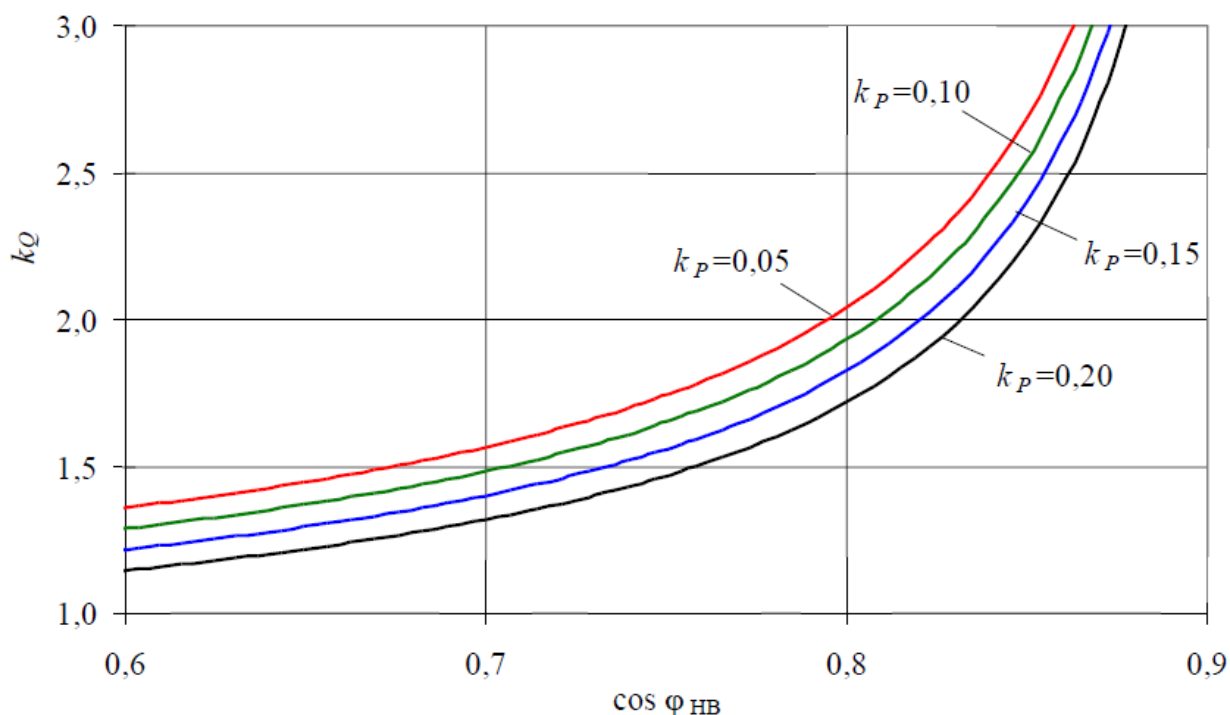


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта k_Q від $\cos \varphi_{\text{нв}}$ при різних значеннях перекриття робочих зон суміжних ступенів k_p .

3.2.2 Розрахунок потужностей секцій ПАКРП

Розрахунок найменшої потужності секції ПАКРП виконується урахуванням:

- потужності першого ступеня компенсації;
- збільшення потужності компенсації при переході з першого ступеня на другий.

Як мінімальна секція БК приймається найменше значення з отриманих величин.

На першому етапі, виходячи з умови повної компенсації реактивної потужності, визначається розрахункова потужність першого ступеня

$$Q_{\text{ст } 1} = P_{\text{нв min}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} .$$

Найменше споживання реактивної потужності має місце за мінімального навантаження підприємства з максимальним значенням коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{\text{нв max}}$. Тому у виразі (3.5) враховується коефіцієнт реактивної потужності навантаження, що відповідає цьому режиму. Як перший щабель ПАРП $Q_{\text{ст } 1}$ спочатку намічається найближча менша стандартна потужність БК.

На другому етапі визначається потужність першої секції ПАРП (секції з мінімальною потужністю БК). За формулою (3.4) розраховується максимально допустиме значення коефіцієнта k_Q , що характеризує відношення реактивних потужностей суміжних ступенів.

При переході з i -го ступеня на $(i+1)$ -ю ступінь генерована потужність збільшується на величину dQ_i .

$$dQ_i = Q_{\text{ст}(i+1)} - Q_{\text{ст}i} .$$

З урахуванням виразу (3.2) збільшення потужності III має задовольняти умову

$$dQ_i \leq Q_{\text{ст}i} (k_Q - 1) .$$

Як очевидно з цього виразу, dQ_i мінімально при найменшому значенні $Q_{\text{ст}i}$, тобто. при переході з першого ступеня на другий. При $k_Q \geq 2,0$ збільшення генерованої реактивної потужності при переході на другий ступінь може перевищувати потужність першого ступеня: $dQ_1 \geq Q_{\text{ст}1}$. Потужність першої секції такого режиму приймається рівною потужності мінімальної щаблі, тобто. потужності першого ступеня

$$Q_{\text{секц}1} = Q_{\text{ст}1} .$$

При $k_Q < 2,0$ дотримується співвідношення $dQ_1 < Q_{ст1}$. Якщо прийняти що $Q_{секц1} = Q_{ст1}$, то не забезпечується необхідне перекриття робочих зон суміжних ступенів. Більше того, при співвідношенні $Q_{ст(i+1)} / Q_{ст1} < 2,0$ відбувається розрив між робочими зонами суміжних щаблів.

В результаті при переході з i -го ступеня на ступінь $(i+1)$ виникає режим перекомпенсації реактивної потужності, внаслідок якого блок управління ПАКРП спробує повернути пристрій у попередній режим. Аналогічний процес відбувається при переході з $(i+1)$ -го ступеня на ступінь i через перевищення коефіцієнта реактивної потужності нормованого значення $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}$. Даний процес буде повторюватися безперервно доти, доки режим роботи споживача не опиниться в робочій зоні одного з ступенів компенсації. З метою виключення таких нестійких режимів роботи пристрою необхідно ввести додаткову секцію БК, потужність якої менша за потужність першого ступеня компенсації. Потужність цієї секції визначається виразом

$$Q_{секц1} \leq (1 - k_Q) Q_{ст1}.$$

З урахуванням викладеного, потужність першої секції ПАКРП залежно від допустимого значення співвідношення потужностей суміжних щаблів компенсації приймається рівною

$$Q_{секц1} \leq \begin{cases} Q_{ст1} & \text{при } k_Q \geq 2,0 \\ 0,5 Q_{ст1} & \text{при } 1,5 \leq k_Q \leq 2,0 \end{cases}.$$

У разі $k_Q < 1,5$ слід ввести другу додаткову секцію потужністю в чотири рази менше потужності першого ступеня. Усе це призводить до збільшення витрат на ПАКРП.

Тому рішення про застосування такого пристрою слід ухвалити на основі техніко-економічних розрахунків.

На третьому етапі уточнюються потужності секцій та робочих щаблів. При цьому повинне дотримуватися співвідношення між значеннями потужностей секцій БК як 1:2:4 і т.д.

При співвідношенні потужностей секцій 1:2:4 сумарна потужність конденсаторів ПАКРП дорівнює [21]

$$Q_{\text{ПАКРП}} = 2 \cdot Q_{\text{секц}N} - Q_{\text{секц}1}, \quad (3.6)$$

де $Q_{\text{секц}N}$ - потужність секції з максимальним значенням $Q_{\text{БК}}$.

З урахуванням компенсації реактивної потужності у максимальному режимі споживання має виконуватись співвідношення

$$Q_{\text{ПАКРП}} \geq P_{\text{нв max}} (tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{норм}}).$$

З урахуванням виразу (3.6) потужність секції з максимальним значенням $Q_{\text{БК}}$ повинна задовольняти умову

$$Q_{\text{секц}N} \geq \frac{Q_{\text{секц}1} + P_{\text{нв max}} (tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{норм}})}{2}.$$

На основі вищевикладеного можна навести **методичні рекомендації** щодо розрахунку параметрів ПАКРП [21]:

1. З урахуванням необхідного перекриття робочих зон суміжних щаблів компенсації визначається допустиме значення коефіцієнта k_Q

$$k_Q \leq (1 - k_p) \frac{tg\varphi_{\text{нв}}}{tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{норм}}}.$$

де $tg\varphi_{\text{нв}}$ – коефіцієнт реактивної потужності навантаження, що відповідає мінімальному значенню $\cos\varphi_{\text{нв min}}$.

2. Потужність першого ступеня компенсації розраховується з урахуванням коефіцієнта реактивної потужності, що відповідає максимальному значенню коефіцієнта потужності навантаження $\cos\varphi_{\text{нв max}}$

$$Q_{\text{ст}1} = P_{\text{нв min}} tg\varphi_{\text{нв}},$$

в якості якого приймається найближче менше стандартне значення потужності БК.

3. Потужність першої секції ПАКРП приймається рівною

$$Q_{\text{секц}1} \leq \begin{cases} Q_{\text{ст}1} & \text{при } k_Q \geq 2,0 \\ 0,5Q_{\text{ст}1} & \text{при } 1,5 \leq k_Q \leq 2,0 \end{cases}.$$

4. Розраховується реактивна потужність кожного наступного ступеня за виразом

$$Q_{\text{ст}(i+1)} \leq k_Q Q_{\text{ст } i},$$

доки її значення $Q_{\text{ст}(i+1)}$ не задовольнятиме умові

$$Q_{\text{ст}(i+1)} \geq P_{\text{нв max}} (tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{норм}}),$$

де $tg\varphi_{\text{нв}}$ – коефіцієнт реактивної потужності навантаження, що відповідає мінімальному значенню $\cos\varphi_{\text{нв min}}$.

При необхідності пристрій доповнюється секцією БК, потужність якої приймається вдвічі більша за потужність попередньої

$$Q_{\text{секц}(i+1)} = 2Q_{\text{секц } i}.$$

3.2.3 Розрахунок мінімальної кількості ступенів компенсації

У загальному випадку розрахункова потужність першої секції ПАКРП (мінімальної по потужності) може бути розрахована за виразом

$$Q_{\text{лсекц}} \leq Q_{\text{ст } 1} / k_Q,$$

де k_Q - коефіцієнт, що визначає співвідношення потужності першого ступеня компенсації до потужності першої секції ПАКРП.

Цей коефіцієнт визначається за виразом

$$k_Q = \left[1 + \frac{1}{Q_{\text{ст}(i+1)} / Q_{\text{ст } i} - 1} \right],$$

де квадратна дужка [] означає цілу частину числа.

Як потужність першої секції приймається найближча менша стандартна потужність БК. Кількість додаткових секцій може бути розрахована за формулою [21]

$$N_{\text{дон}} = \frac{\lg k_Q}{\lg 2}.$$

При нестандартній потужності БК, її значення уточнюється у бік найближчого меншого стандартного значення.

На підставі виразу (2.1) можна стверджувати, що в межах одного ступеня компенсації виконується система рівностей[8]

$$\begin{cases} Q_{\text{ст } i} = P_{\text{min } i} (tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{min}}), \\ Q_{\text{ст } i} = P_{\text{max } i} (tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{max}}). \end{cases} \quad (3.7)$$

де i – номер ступеня компенсації;

$tg\varphi_{\text{min}}$, $tg\varphi_{\text{max}}$ – мінімальні та максимальні величини коефіцієнта реактивної потужності, які потрібні згідно нормативним документам;

$P_{\text{min } i}$, $P_{\text{max } i}$ – мінімальні та максимальні величини потужності навантаження на i -му ступені компенсації, які необхідні відповідно до нормативних документів за допустимими умовами нормування коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi_{\text{норм}}$.

У режимі повної компенсації коефіцієнт реактивної потужності $tg\varphi=0$, максимальне значення не повинно перевищувати значення, що регламентується Наказом №764 $tg\varphi_{\text{норм}}$. Тоді система (3.7) перепишеться у такому вигляді [8]

$$\begin{cases} Q_{\text{ст } i} = P_{\text{min } i} tg\varphi_{\text{нв}}, \\ Q_{\text{ст } i} = P_{\text{max } i} (tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{max}}). \end{cases} \quad (3.8)$$

На основі системи справедлива рівність

$$P_{\text{min } i} tg\varphi_{\text{нв}} = P_{\text{max } i} (tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{max}}).$$

Відповідно до цього можна стверджувати, що для будь-якого ступеня компенсації справедливій рівності

$$\begin{aligned} P_{\text{max } i} &= P_{\text{min } i} \frac{tg\varphi_{\text{нв}}}{(tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{max}})}, \\ P_{\text{min } i} &= P_{\text{max } i} \frac{(tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{max}})}{tg\varphi_{\text{нв}}}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Відповідно до виразу (3.1) мінімальна потужність навантаження робочої зони на наступному ступені компенсації повинна задовольняти умові

$$P_{\text{min}(i+1)} = (1 - dQ_S) P_{\text{max } i}.$$

У більш розгорнутому вигляді, з урахуванням виразу (3.9), мінімальні потужності будь-яких суміжних щаблів повинні задовольняти умові[8]

$$P_{\text{min}(i+1)} = P_{\text{min } i} (1 - dQ_S) \frac{tg\varphi_{\text{нв}}}{tg\varphi_{\text{нв}} - tg\varphi_{\text{норм}}}.$$

Ця властивість визначає геометричну прогресію. Знаменником q даної прогресії є величина

$$q = (1 - dQ_S) \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}}.$$

Відповідно до властивості геометричної прогресії його k -ий член визначається виразом

$$b_k = b_1 q^{k-1}.$$

Нехай для компенсації реактивної потужності у всьому інтервалі зміни навантаження підприємства потрібно $N_{\text{ст}}$ ступенів компенсації. Тоді для щабля $N_{\text{ст}}$ мінімальна потужність навантаження розраховується за формулою[8]

$$P_{\min N_{\text{ст}}} = P_{\min 1} \left[(1 - dQ_S) \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} \right]^{N_{\text{ст}} - 1}.$$

З урахуванням виразу (3.9) справедлива рівність

$$P_{\min N_{\text{ст}}} \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}} = P_{\min 1} \left[(1 - dQ_S) \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} \right]^{N_{\text{ст}} - 1}.$$

Виходячи з умови забезпечення нормованого значення коефіцієнта реактивної потужності у всьому інтервалі зміни навантаження підприємства, ПАКРП має забезпечувати виконання співвідношень:

$$\begin{aligned} P_{\min 1} &\leq P_{\text{нв min}}, \\ P_{\min N_{\text{ст}}} &\geq P_{\text{нв max}}. \end{aligned}$$

З урахуванням граничних значень навантаження

$$P_{\text{нв max}} \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}} = P_{\min \text{нв}} \left[(1 - dQ_S) \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} \right]^{N_{\text{ст}} - 1},$$

що тотожний вираз

$$P_{\text{нв max}} = P_{\min \text{нв}} (1 - dQ_S)^{N_{\text{ст}} - 1} \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} \right)^{N_{\text{ст}} - 1}.$$

У більш компактному вигляді

$$(1 - dQ_S) P_{\text{нв max}} = P_{\min \text{нв}} \left[(1 - dQ_S) \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}}}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{нв}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{норм}}} \right]^{N_{\text{ст}}}.$$

Цю рівність можна переписати у вигляді[8]

$$\frac{(1-dQ_s)P_{\text{нв м ax}}}{P_{\text{min нв}}} = \left[(1-dQ_s) \frac{\text{tg}\varphi_{\text{нв}}}{\text{tg}\varphi_{\text{нв}} - \text{tg}\varphi_{\text{норм}}} \right]^{N_{\text{ст}}} . \quad (3.10)$$

На підставі властивості логарифму $\log_a b = x$ при $a^x = b$ з урахуванням виразу (3.10) слідує рівність

$$N_{\text{ст}} = \log_{(1-dQ_s) \frac{\text{tg}\varphi_{\text{нв}}}{\text{tg}\varphi_{\text{нв}} - \text{tg}\varphi_{\text{норм}}}} \cdot \frac{(1-dQ_s)P_{\text{нв м ax}}}{P_{\text{min нв}}} .$$

Як відомо, логарифм з однією основою можна подати у вигляді частого логарифмів з будь-якою іншою основою [8]:

$$N_{\text{ст}} = \frac{\lg \left[(1-dQ_s) \text{tg}\varphi_{\text{нв}} / \text{tg}\varphi_{\text{нв}} - \text{tg}\varphi_{\text{норм}} \right]}{\lg \left[(1-dQ_s) P_{\text{нв м ax}} / P_{\text{min нв}} \right]} .$$

Висновки по третьому розділу

Необхідною та достатньою умовою при виборі потужності щаблів ПАКРП є дотримання співвідношення між суміжними ступенями компенсації. При цьому автоматично забезпечується необхідне перекриття робочих зон суміжних ступенів, значення співвідношення активної і реактивної потужностей в точці поставки електроенергії в режимі зміни коефіцієнта реактивної потужності навантаження в заданому інтервалі. Таким чином, коефіцієнт k_Q слід розглядати як узагальнений параметр під час розрахунку потужності ступенів ПАКРП.

ВИСНОВКИ

З проведених досліджень виконаних кваліфікаційній роботі можна зробити слідуєчий висновок:

1. Причина появи вищих гармонік – наявність у складі навантаження споживачів із нелінійними вольт-амперними характеристиками. До таких споживачів можна віднести вентиляльні пристрої, електрозварювальні агрегати, печі для плавки металу, газорозрядні лампи, а також силові трансформатори та двигуни.

2. Струми вищих гармонійних складових створюють додаткові втрати активної потужності, інтенсивне старіння ізоляції, похибки електровимірювальних приладів. Їх наявність ускладнює застосування силових ланцюгів в якості каналів обміну інформацією між енергооб'єктами, викликає хибне спрацьовування пристроїв релейного захисту.

3. Перевантаження струмами вищих гармонік має руйнівну дію на батареї конденсаторів.

4. Основними способами зниження вищих гармонійних складових в електричній мережі є збільшення числа фаз випрямлення, застосування багатофазного еквівалентного режиму роботи випрямлячів, а також встановлення фільтрів вищих гармонік.

5. Компенсація реактивної потужності на підприємствах з малою встановленою потужністю електроприймачів з погляду економії електроенергії стає актуальною .

6. У нинішніх умовах компенсації реактивної потужності застосовуються компенсуючі пристрої різних типів. До них відносяться батареї конденсаторів, синхронні двигуни та компенсатори, статичні пристрої, що компенсують. Батареї конденсаторів мають низькі питомі втрати активної потужності та малу питому вартість. Вони прості при монтажі та експлуатації. При ступінчастому регулюванні реактивної потужності, що генерується, можна здійснити в широких межах. Таким чином, застосування батарей

конденсаторів як компенсуючі пристрої має певні переваги в порівнянні з іншими варіантами.

7. Розрахунок параметрів ПАКРП слід виконати з урахуванням усіх можливих режимів роботи споживача. Необхідно передбачити компенсацію реактивної потужності в мінімальному режимі навантаження з найбільшим значенням коефіцієнта потужності та в максимальному режимі з найменшим значенням коефіцієнта потужності. В іншому випадку можливі режими перекомпенсації при мінімальному навантаженні та недокомпенсація при максимальному навантаженні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. НАКАЗ МІНІСТЕРСТВА ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ від 30.11.2020 № 764 «Про затвердження Змін до Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії»// <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text>
2. Конспект лекцій з дисципліни "Електропостачання промислових підприємств" для студентів напряму 6.050701 – електротехніка і електротехнології, 6.050702 - електромеханіка / Укладачі Є.Д.Хмельницький, О.О.Крупник — Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2016, 126 с.(Частина 2)
3. А. В. Чумачова , А. П. Калінов ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДХОДУ ДО КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НЕСИМЕТРІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА У СКЛАДІ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА //Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського
4. Домнин, И. Ф. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Е. И. Сокол // Техн. электродинамика. – 2004. – Тем. выпуск. – С. 80–91.
5. https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Postanova_obgruntuvannya/2022/veresen/30.09.2022/p1_30-09-22.pdf
6. Б. С. Рогальський, С. О. Кузьмінська, ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СТУПЕНЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ ЧУТЛИВОСТІ// Вісник ВПІ, 2004, № 5
7. Рогальський Б. С., Вознюк С. І. Обґрунтування необхідності і метод визначення оптимального ступеня компенсації реактивних навантажень в електричних мережах споживачів і енергосистем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2001. —№ 6. — С. 87—90.
8. Рогальський Б. С. Методи поетапного розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем і споживачів //

Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2001. — Вип. 6. — С. 22—39.

9. Карпов Ф. Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 1975. — 182 с. 6. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д. Применение критериального метода в электроэнергетике. — Киев: УМК ВО, 1989. — 137 с.

10. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом. — Вінниця: УНІВЕРСУМ—Вінниця, 2003. — 131 с.

11. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. I частина. Навчальний посібник. — Вінниця: 2002. — 119 с.

12. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії: наказ Міністерство енергетики та вугільної промисловості України від 06.02.2018 р. №87

13. Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами шляхом регулювання їх реактивної потужності: пат. 141771 Україна: G01N 25/30, G21C 3/40, G01R 15/12. u 2019 10423; заявл. 17.10.2019; опубл. 27.04.2020, Бюл.№8. 11 с.

14. Пристрій для підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами: пат. 149078 Україна: E21C 41/00, E21C 41/16 u 2021 02972; заявл. 03.06.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл.№41. 10 с.

15. Купін А.І.,Осадчук Ю.Г.,Савицький О.І. Шерстньов Ю.В. (аспірант). До питання керування процесом компенсації реактивної потужності та підвищення якості напруги живлення підстанцій промислових підприємств. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/23>. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 4 2022. С. 149-159.

16. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами.

Затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України №19 від 17.01.2002/ Офіційний вісник України. – 2002. – №48. – С. 71 – 147. 3. 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 (основного споживача та субспоживача). – 48 с.

17. Омельчук А.О. Щодо балансу реактивної потужності в мережах живлення в нових нормативних умовах перетоків реактивної енергії в Україні / А.О.Омельчук, А.М.Скрипник, В.С.Трондюк// Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК».– 2011.– №161.– С. 111 – 119.

18. Резніченко Т.П., Омельчук А.О. Про ефективність компенсації реактивної потужності в районних електричних мережах// Енергетика и электрификация. –2001. – №6. – С. 26 – 29. 6. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях.– М.: Энергия, 1974. – 73 с.

19 Паламарчук О.П., Демов О.Д., Григоращ Ю.А., Бандура І.О. Спрощений розрахунок плати за реактивну енергію// Промелектро. –2010. – №2. – С. 9 – 11.

20. Скрипник А.М. Використання методу питомих транспортних витрат для сезонної оптимізації конфігурації схем / А.М.Скрипник, А.О.Омельчук, О.В. Хоменко // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК», 2011.– №166, частина 3. – С. 133-140.

21. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ А.О./ Омельчук, А.М., Б.П. Савченко, //Національний університет біоресурсів і природокористування України- Енергетика і автоматика", №4, 2013 р

22. Обґрунтування рівня компенсації реактивної потужності для систем підземного електропостачання шахт / Г.Г. Півняк, В.Т. Заїка, В.В. Самойленко // Доп. НАН України. — 2007. — N 4. — С. 96-103.

23. Папаїка, Ю. А., Лисенко, О. Г., & Буртний, Д. І. (2024). ПРОБЛЕМА ПЕРЕТОКІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПІДЗЕМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ. Електротехнічні та інформаційні системи, (105), 14–17. <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-3>

24. Реактивна потужність в електричних мережах : монографія / І. В. Жежеленко, Г. Г. Півняк, Г. Г. Трофімов, Ю. А. Папаїка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. у-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 72 с.

25. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія / Г. Г. Півняк, І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 148 с.

26. Папаїка Ю. А. Застосування індивідуал. графіків вищих гармонік в задачах електромагн. сумісності та енергоефективності гірничих підприємств / І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, О. Г. Лисенко, К. С. Родна. Гірничя електромеханіка. 2019. № 101. С. 3–7.

27. Оціночні методи визначення економічного еквівалента реактивної потужності / І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, О. Г. Лисенко. Гірничя електромеханіка та автоматика. 2017.