

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

бакалавр

на тему: «Проект електропостачання споживачів із застосуванням компенсації реактивної потужності»

КРБ.141ЕЕбд_31[1].11.00.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
ступеня вищої освіти *бакалавр*
групи 141ЕЕбд_31[1]
ШАРЕНКО Олександр

Керівник: канд. техн. наук, доцент
БИЧКОВ Ярослав

Полтава – 2025 року

ВСТУП

Велике значення має ефективне використання електроенергії, про що слід пам'ятати при проектуванні та експлуатації систем електропостачання агропромислових підприємств. Огляд споживання електроенергії промисловими компаніями показує, що основні напрямки оптимізації витрат електроенергії – це компенсація реактивної потужності, підвищення якості споживаної електроенергії в мережах підприємств. Споживана реактивна потужність призводить до максимального зменшення втрат навантаження на 0,1 кВт для кожної спожитої реактивної потужності. Збільшення компенсації до 0,4 - 0,5 кВА/кВт зменшить витрати та знизить ціну на електроенергію, що важливо в умовах ринкової економіки. Одним з найбільш затребуваних питань на сьогоднішній день є проблема погашення реактивної енергії в електричних мережах промислових підприємств, особливо в плані електромагнітної сумісності енергетичних рецепторів з мережею живлення.

В кваліфікаційній роботі проаналізовано споживачів та джерела реактивної енергії відповідно до «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» та питання компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств відповідно до ДСТУ 13109-97 «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії у системах електропостачання загального призначення», у тому числі з несинусоїдальним навантаженням.

Мета роботи розробка засобів компенсації реактивної потужності у складі системи електрозабезпечення виробничого сільськогосподарського підприємства.

Об'єкт розробки система електрозабезпечення виробничого сільськогосподарського підприємства.

Предмет розробки – техніко-технологічні аспекти процесів, що призводять до виникнення явища реактивної потужності та методи і засоби компенсації втрат

реактивної потужності.

Методика досліджень системний аналіз можливостей та засобів реалізації зменшення енергоспоживання сільськогосподарським переробним підприємством за рахунок компенсації реактивної потужності. Розрахунок основних показників для реалізації проєкту, графічне відображення технологічних процесів, визначення параметрів електричних елементів, економічна оцінка та безпека технічного обслуговування електроустановок.

Практичні результати роботи – розроблено систему компенсації реактивної потужності, що зменшить витрати електроенергії на виробничі потреби.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Поняття про реактивну потужність

Електричні машини засновані на принципі електромагнітної індукції. Робота приладів змінного струму також супроводжується безперервною зміною магнітних потоків у цих магнітних провідниках та серед полів їх розсіювання [1]. Спостерігається зміна енергії відповідного магнітного поля. Якщо струм змінюється за законом синуса,

$$I = I_m \sin 2\pi vt = I_m \sin \omega t \quad (1.1)$$

то енергія магнітного поля змінюється з подвійною частотою

$$W_m = L I^2 (1 - \cos 2\omega t), \quad (1.2)$$

де $\cos 2\omega t$ – це місце, де в даному випадку L – індукційна обмотка електричного провідника.

Риснок 1.1 – Залежність магнітного поля від струму

На рисунку 1.1 ми спостерігаємо діаграми струму I , що протікає по обмотці довільного електроприймача і відповідну зміну енергії W_m магнітного поля. Струм I збільшується на ділянках 0-1, а також 2-3, і накопичена магнітна енергія W_m зростає, причому в зонах 1-2, а також 3-4 зменшується струм I і зменшується енергія W_m , накопичена у магнітному полі. На одному з етапів зміни струму I двічі використовує енергію струму від електроприймального джерела і двічі за цей період повертається в магнітне поле. Завдяки цій енергії магнітні провідники магнітних сердечників або електричних провідників намагнічуються, тобто створюється магнітне поле, в якому працюють електроприймачі. Ця енергія вважається реактивною і цей процес забезпечується реактивною потужністю, яка

характеризується напругою $U=U_m \sin \omega t$ і струмом $I=I_m \sin(\omega t + \phi)$ та може бути визначена наступним співвідношенням.

$$Q = \frac{U_m I_m}{2} \sin \phi = UI \sin \phi \quad (1.3)$$

У наведеній формулі ϕ струм - це кут зрощування струму щодо напруги. U та I – це допустимі значення. Позначають струм і напругу так, щоб генерована реактивна потужність (РП) описувала безперервний обмін електромагнітною енергією між електроприймачами та їх джерелами. Відомо, що активна потужність в однофазній послідовності струму визначається за такою формулою:

$$P = UI \cos \phi \quad (1.4)$$

На рисунку 1.2 можна побачити 2-гу векторну діаграму, з якої ми знаходимо, що перший повний струм в системі координат Декарта можна розділити на складові активного струму і реактивного струму.

$$P = UI \cos \phi \quad (1.5)$$

Риснок 1.2 – активна і реактивна складова струму

Для трифазних електричних приймальних ліній РП визначимо його за такою формулою:

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \phi \quad (1.6)$$

Де U_L та I_L – діючі лінійні значення напруги і струму.

Слід зазначити, що на відміну від миттєвої активної потужності, поняття

миттєвого РП не має сенсу і з цієї причини не використовується. Але через концепцію РП використовується і вимірюється споживана реактивна енергія.

$$W_p = \int^t Q(t) dt \quad (1.7)$$

На відміну від активної потужності, яка корисна тим, що використовується електроприймачами, РП не працює корисно, вона використовується для створення магнітних полів. Реактивна потужність визначається для перших гармонік напруги і струмів, тому в розрахунку нелінійних ланцюгів при синусоїдальних напругах і несинусоїдальних струмах реактивна потужність для вищих гармонік не визначається.

1.2 Особливості передачі реактивної потужності через електричні мережі

Режими роботи в системах електропостачання промислових підприємств можна охарактеризувати в наступних величинах [1]:

- напруга на вузлах навантаження U_i ;
- струм у розгалуженнях I_i ;
- трата активної ΔP_i і реактивної ΔQ_i ємності та ін.

Ці величини залежать від поздовжніх опорів $Z=R+jX$ елементів системи електрозабезпечення (ЛЕП, силових трансформаторів, реакторів), а також від активної P_i і реактивної Q_i потужностей, що передаються через ці елементи. Існують деякі особливості передачі активної та реактивної потужності через наступні елементи системи електрозабезпечення:

а) Потужність на початку мережі $P_1 + jQ_1$ відрізняється від потужності в кінці мережі $P_2 + jQ_2$ на величину споживаної потужності, активна і реактивна складові якої визначаються за формулами:

$$\Delta P = (P^2 + Q^2) / U^2 \cdot R = P^2 / U^2 \cdot R + Q^2 / U^2 \cdot R = \Delta P_a + \Delta P_p$$

$$\Delta Q = (P^2 + Q^2) / U^2 \cdot X = P^2 / U^2 \cdot X + Q^2 / U^2 \cdot X = \Delta Q_a + \Delta Q_p \quad (1.8)$$

З цих рівнянь видно, що втрати активної і реактивної потужності можна розділити на дві частини, відповідно, в залежності від протікання активної і реактивної ємності на розглянутому нами елементі енергетичної системи;

б) Напруга на початку лінії і в кінці лінії U_1 U_2 пов'язана з наступними співвідношеннями, де $\Delta U'$ і $\Delta U''$ - поздовжня і поперечна складові вектору падіння напруги

$$\Delta Q = \sqrt{U_2^2 + \Delta U'^2} + (\Delta U'')^2 \quad (1.9)$$

поздовжня і горизонтальна складові вхідного вектора U' і вхідного вектора U'' є напругами, що визначаються наступними формулами:

$$\begin{aligned} \Delta U' &= (P_2 R + Q_2 X) / U_2 = \Delta U_a' + \Delta U_p' \\ \Delta U'' &= (P_2 X - Q_2 R) / U_2 = \Delta U_a'' + \Delta U_p'' \end{aligned} \quad (1.10)$$

Як правило, для високовольтних мереж $X > R$, тому $\Delta U'$ в основному визначається складниками $Q_2 X$, а $\Delta U''$ визначається складниками $P_2 X$. Вплив $\Delta U''$ не значний на напругу U_2 споживача, тому що $U_2 \gg \Delta U''$. Це означає, що рівні напруги в різних точках ЕС набагато слабкіше залежні від переданої активної потужності і часто визначається реактивною складовою. Математична різниця між напругою на початку і в кінці лінії називається втратою напруги:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx \Delta U' \quad (1.11)$$

Промислові та агропромислові підприємства часто ведуть активну діяльність і мають перехідний режим споживання реактивної енергії. Вранці та ввечері – максимальні навантаження на електроенергію, а вночі – мінімальні. При цьому більшість промислових підприємств не відключені від мережі через відсутність

автоматичного регулювання потужності КП. Автоматичне регулювання потужності КП дає можливість компенсувати змінне реактивне навантаження трансформаторних підстанцій (ТП) підприємств, що в кінцевому підсумку призводить до зменшення струму в лініях передачі, зменшення загальної споживаної потужності і дозволяє реалізувати найбільш економічний режим роботи мережі

Рисунок 1.3 – Векторна діаграма напруг і струмів

На рисунку 1.3 показана векторна діаграма напруг і струмів для електромережі, на початку яких напруга U_1 не змінюється. При максимальних електричних навантаженнях струм I_2' є індуктивним, і напруга U_2' в кінці мережі менше напруги U_2 на початку лінії. При мінімальних електричних навантаженнях, коли реактивна потужність, що виробляється за рахунок КП на підприємствах агропромислового комплексу виявляється набагато більше РП, що споживається підприємством, струм I_2 буде випереджати криву. При цьому напруга U' в кінці лінії може не тільки дорівнювати напрузі U_1 , але і перевищувати його. Якщо не вжити заходів щодо регулювання напруги U_1 або U_2 , то значне підвищення напруги на клеммах електроприймачів може створити на них негативний вплив.

1.3 Ефективність компенсації реактивної потужності

Для аналізу цих умов компенсації РП розглянемо ланцюг змінного струму (рис. 1.4, а), яка складається з опору лінії електропередачі R і X , опору навантаження споживача R_n , X_n і опору конденсаторної батареї $X_{БК}$. На рис. 1.4, б показана векторна діаграма напруг і струмів в кінці ліній. Струм навантаження споживача I_n він має активний $I_{на}$ і індуктивний $I_{ли}$, і відстає на кут φ_2 від вектору напруги U_2 в кінці лінії.

Рисунок 1.4 – Ланцюги змінного струму

Струм навантаження в кінці мережі зменшується на певну величину при паралельному підключенні КП до споживача

$$\Delta I = I_{\Pi} - I_1 \quad (1.12)$$

і дорівнює в наступному вигляді

$$I_1 = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_k^2)}}{\sqrt{3} U_2} = \frac{P}{\sqrt{3} U_2} \sqrt{1 + tg^2 \phi_1} \quad (1.13)$$

ϕ_1 - кут обміну між струмом і напругою на початку лінії, що дозволяє розвантажити електромережу або зменшити горизонтальний перетин проводів або кабелів на значення.

$$\Delta F = (I_{\Pi} - I_1) / j_{\text{в}} \quad (1.14)$$

З урахуванням економічної щільності $j_{\text{в}}$ струму відповідно, можна буде зменшити встановлену потужність трансформаторів, тобто зменшаться капітальні витрати на спроектовану нами мережу. Якщо мережа вже існує, то компенсація потужності струму дозволить збільшити пропускну здатність на її активній потужності, що теж дуже важливо. Ефективність погашення реактивної потужності очевидна при проектуванні великих промислових підприємств з великою кількістю трансформаторів та електродвигунів. При використанні компенсаційних пристроїв з напругою 0,38 або 0,66 кВ потужність трансформаторів скоротиться приблизно на 5 до 8%, тим самим зменшиться капітальні вкладення в роботу цехів агропромислових підприємств.

Завдяки компенсації РП втрати активної потужності та електроенергії будуть зменшені. Втрати активної потужності для елемента системи електроспоживання з активним опором R :

$$\Delta P = \frac{P^2(Q-Q_k)}{U^2} R = \Delta P + \Delta P(Q_k) \quad (1.15)$$

Діаграма на рисунку 1.5 вказує, що перекомпенсація РП ($Q_k > Q$) не тільки недоцільна, але і шкідлива, так як втрати активної потужності зростають у порівнянні з їх можливим мінімумом.

При компенсації реактивної потужності її втрати зменшуються за формулою:

$$\Delta Q = (P^2 + (Q - Q_k)) / U^2 \cdot X = \Delta Q_a + \Delta Q_p(Q_k) \quad (1.16)$$

На високовольтних каскадах, де $X \gg R$, втрати реактивної потужності можуть значно перевищувати втрати активної потужності. Зменшення втрат ΔP і ΔQ тим більше, чим ближче встановлені компенсуючі пристрої до споживачів реактивної потужності.

$$\Delta U = (P \cdot R + (Q - Q_k) \cdot X) / U^2 \quad (1.17)$$

Рисунок 1.5 – Векторна діаграма U-відношень

На рисунку 1.5 показана векторна діаграма для напруг і струмів двох випадків: при відсутності ($U'_1 I'$) і наявності ($U''_1 I'', I_k$) компенсації. Дана діаграма побудована на основі постійних значень напруги U_2 в кінці ліній електропередач і активної потужності P споживача. Наявність у споживача компенсуючих пристроїв з регульованою реактивною потужністю дає можливість використовувати їх не

тільки для компенсації реактивної потужності, але і, при необхідності, для регулювання напруги за рахунок того, що змінюються втрати напруги в цих елементах. Виходить, що компенсація РП підвищує ефективність систем електропостачання промислових підприємств, адже зменшуються втрати активної потужності та електроенергії, втрати РП, поліпшується режим роботи системи електропостачання агропромислового підприємства.

Висновок до розділу 1

У теоретичній частині розглянуто сутність реактивної потужності в електроенергетиці, її роль у створенні магнітного поля для роботи електроприймачів та принципи її взаємодії з активною потужністю. Наведено математичні вирази для розрахунку реактивної та активної потужності у однофазних і трифазних системах, а також показано, що реактивна потужність не виконує корисної роботи, але є необхідною для функціонування електричних машин. Окрема увага приділена особливостям передачі реактивної потужності в електричних мережах, впливу поздовжніх опорів, втрат потужності та зміни напруги вздовж лінії. У розділі про ефективність компенсації реактивної потужності розглянуто, як використання компенсуючих пристроїв (КП) (зокрема, конденсаторних батарей) дозволяє зменшити струми в мережі, знизити втрати енергії та напруги, підвищити економічність і надійність роботи електропостачання промислових та аграрних підприємств. Також відзначено, що перекомпенсація є небажаною, оскільки може призвести до додаткових втрат.

2 СПОЖИВАЧІ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Загальна характеристика споживачів реактивної потужності.

Реактивна потужність використовується наступними електроприймачами:

- асинхронні двигуни – 40%;
- силові трансформатори від генераторів електростанцій до споживачів електроенергії (від 3 до 5) – 35%;
- вентильні конвертери – 10%;
- електротермічні установки – 8%;
- ЛЕП (їх реактивні витрати) – 7%.

Серед виробництв агропромислового комплексу сюди входять елеватори, млини, круп'яні та комбикормові заводи, хлібозаводи, макаронні заводи, цукрові заводи, молокозаводи, м'ясопереробні заводи, спиртзаводи, олійножирові заводи тощо [3, 4].

Характер електроприймачів дуже різноманітний, основні електроприймачі мають потужність від 0,2 до 30 кВт.

Більші електроприймачі – це насоси, вентилятори, дробарки, сушарки, мангали, центрифуги, вони мають потужність до 100 кВт.

Напруга живлення змінна 380 В. Режим роботи безперервний і короткочасний. До першої категорії відносяться великі пекарні, аварійне освітлення і пожежні насоси.

У загальному випадку величина реактивної потужності котушки індуктивності (обмотки), що має магнітну систему (асинхронні двигуни, трансформатори і т.п.), визначається співвідношеннями:

$$Q = \frac{3U_{\phi}^2}{X_{\phi}} = \frac{U_{\text{л}}^2}{X_{\phi}} = c_1 \frac{U_{\text{л}}^2}{\Phi} R_{\mu} = C_2 \Phi_{\text{м}}^2 \Phi R_{\mu} \quad (2.1)$$

де U_{ϕ}^2 - $U_{\text{л}}^2$ -фазна і лінійна, мережеві напруги;

X_{ϕ} - індуктивний опір споживача реактивної потужності;

$C_1 = 1/(2\pi W)$ - коефіцієнт пропорційності;

W - число витків обмотки, що виробляють магнітний потік X_m ;

f - лінійна частота напруги мережі;

R_m - магнітний опір шляху магнітного потоку; l і S - довжина і поперечний переріз шляху магнітного потоку;

μ - магнітна проникність матеріалу на шляху магнітного потоку;

$C_2=3\pi$ - коефіцієнт пропорційності.

З виразу 2.1 видно, що чим вище магнітний опір шляху магнітного потоку R_m та значення силових напруг U_ϕ^2 і U_λ^2 , тим вище витрата РП. Згідно з (2.1), РМ пропорційна квадрату прикладеної напруги. Але з збільшенням напруги також збільшує магнітний потік F_m . Через це магнітна система насичується, а магнітна проникність μ зменшується. А також, якщо магнітопровід, через який проходить магнітний потік, має повітряний прошарок, то споживана реактивна потужність також різко зростає, тому що магнітна проникність повітря набагато менше, ніж для електротехнічної сталі.

2.1 Асинхронні двигуни

Асинхронні двигуни стали популярними у всіх галузях промисловості. Асинхронні двигуни використовують велику кількість струминної енергії з мережі. Однією з основних причин великої витрати РП є те, що між ротором і статором асинхронний двигун має повітряний проміжок. У спробі зменшити розміри повітряного проміжку витрати на виготовлення асинхронних двигунів зростають, так як збільшується магнітне тяжіння, а також розмір станини і валу, погіршується охолодження, а також зростають вимоги до підшипників і вібрації. Якщо напругу збільшити вище номінальної, то реактивна потужність, що використовується асинхронним двигуном, збільшиться до більш ніж другого ступеню [3].

Зміна РП, яка витрачається при зміні напруги живлення на одиницю, зазвичай описується як часткова похідна $q = \partial Q / \partial U$. На рисунку 2.1 наведено середні статистичні характеристики асинхронного двигуна у вигляді

залежності $\frac{Q}{Q_n}$, що споживає реактивна потужність відносно величини $\frac{U}{U_n}$ при різних коефіцієнтах навантаження β .

Для визначення кількості споживаної РП розглянемо схему заміщення асинхронного двигуна (рис. 2.2 а).

$$Q = 3(I_1^2 X_1 + I_0^2 X_0 + I_2^2 X_2) = Q_0 + Q_p = Q_0 + \beta^2 Q_{p.n.} \quad (2.2)$$

де I_1, I_0, I_2 - відповідний початковий струм, потім струм холостого ходу, а останній наводиться вторинний;

X_1, X_2, X_0 - індуктивний опір ланцюгів відповідно первинних, вторинних обмоток асинхронного двигуна та холостого ходу;

$Q_0, Q_p, Q_{p.n.}$ - реактивні потужності холостого ходу і розсіювання при поточному та номінальному значенні навантаження.

Рисунок 2.1 – Середні статистичні навантаження

На рис. 2.2 (а) літерою S показано ковзання асинхронного двигуна. Для асинхронного двигуна при номінальній напрузі РП Q_0 майже не змінюється, а потужність Q_p зростає пропорційно квадрату коефіцієнта навантаження β (рис.7, б). Навантаження за замовчуванням зазвичай становить $Q_0 \approx Q_p$. Тому при зміні активного навантаження асинхронного двигуна від нуля до номінального на номінальній реактивна потужність R_n двигуна Q збільшується приблизно вдвічі.

а)

б)

Рисунок 2.2 – Реактивна потужність холостого ходу

Коефіцієнт потужності $\text{tg}\phi$ асинхронного двигуна (спожита РП) змінюється у великих межах і залежить від номінальної потужності і швидкості обертання ротора асинхронної машини, коефіцієнта навантаження і, як було сказано вище, напруги підключеної мережі.

На рис.2.3 а і б показані відповідні залежності РП, Q і значення $\text{tg}\phi$ при

глибокій зміні напруги і різних коефіцієнтів навантаження β асинхронного двигуна. На рис.2.3 в і г – залежності величини $\text{tg}\phi$ від напруги U при різних значеннях β для двох асинхронних машин з однаковою частотою обертання ротора, але з різною номінальною активною потужністю. Аналіз показників дозволяє зробити наступні висновки.

У наступних випадках збільшується відносне значення споживаної реактивної потужності:

- при зниженні номінальної потужності асинхронних двигунів;
- при зменшенні його коефіцієнту навантаження, β ;
- при збільшенні напруги живлення.

Надзвичайно різке підвищення $\text{tg}\phi$ спостерігається при збільшенні напруги потужності в малонавантажених двигунах, наприклад, при зростанні напруги на 15% по відношенню до номінального значення для $P_H = 1$ кВт і $\beta = 0,5$ двигунів (рис. 2.3 , в) значення $\text{tg}\phi$ збільшується на 53%, а витрата реактивної потужності досягає 3 квар на 1 кВт активної потужності. Підвищення навантаження асинхронного двигуна з $\beta = 0,5$ до 0,75 знизить коефіцієнт $\text{tg}\phi$ на 28%, згідно з дослідженнями, оптимальне навантаження знаходиться в межах 0,7...0,9.

Рисунок 2.3 – Значення залежностей навантаження асинхронних двигунів

2.2 Трансформатори

Реактивна потужність у силових трифазних трансформаторах витрачається на намагнічування магнітопроводів і для створення поля розсіювання [5, 6]. Трансформатори виконані таким чином, щоб отвір між пластинами магнітної системи був мінімальним, що означає незначні магнітні опори їх магнітної системи R_μ . В результаті виходить набагато менша відносна РП споживання силових трансформаторів у порівнянні з РП, спожитою асинхронними двигунами (за приблизно однакової номінальної потужності). Витрати (споживання) на трансформаторі живлення можна виразити у наступному вигляді.

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{XX} + K_3^2 + \Delta Q_{K3} \quad (2.3)$$

Де ΔQ_{XX} - реактивна потужність холостого ходу (використовується для намагнічування магнітної системи трансформатора);

K_3 - коефіцієнт завантаження по струму;

ΔQ_{K3} - реактивна потужність короткого замикання (витрачається на створення полів розсіювання).

У сучасних силових трансформаторах втрати РП на намагніченість знаходяться в межах 1... 2% $S_{T.H.}$, а для створення полів розсіювання – близько 2% $S_{T.H.}$ (прийнято $K_3 = 0,65...0,7$, а напруга короткого замикання $U_k = 5,5\%$), тобто сумарні витрати ΔQ_T складають від 3 до 4% $S_{T.H.}$. У силових трансформаторах застарілих конструкцій втрати ΔQ_T можуть досягати від 6 до 8% $S_{T.H.}$.

У зв'язку з тим, що число перетворень напруги при передачі електроенергії від електрогенераторів до споживачів становить 3 – 5%, сумарне споживання РП силовими трансформаторами в цілому велике – від 30 до 35 % усієї спожитої РП. В балансі РП, споживаної силовими трансформаторами, значну роль відіграють втрати холостого ходу і складають від 50 до 60% втрат РП навантажених трансформаторів. Звідси випливає, що забезпечення необхідного режиму роботи трансформаторів є необхідним напрямком для зниження витрат як реактивної, так і активної потужності. При невеликих навантаженнях трансформаторів (коефіцієнт завантаження $\leq 0,3$) їх доцільно замінити на менш потужні. При $K_3 > 0,3$ необхідно обґрунтувати заміну розрахунком приведених втрат активної потужності. Аналіз характеристик силових трансформаторів показує, що збільшення їх коефіцієнта завантаження до 0,6 призводить до помітного зниження $\text{tg}\phi$, а при подальшому збільшенні коефіцієнта K_3 коефіцієнт $\text{tg}\phi$ практично не змінюється. З метою зниження втрат РП в трансформаторах рекомендується відключати трансформатори, навантажені менше 40% їх номінальної потужності, в резерв, з передачею навантаження на інші трансформатори.

Висновок до розділу 2

Розглянуто основні споживачі реактивної потужності в електроенергетичних системах, серед яких головними є асинхронні двигуни (40%) та силові трансформатори (35%). Надано фізико-технічне пояснення споживання реактивної потужності цими пристроями та факторів, що на неї впливають. Асинхронні двигуни мають високі втрати реактивної потужності через наявність повітряного зазору між ротором і статором. Споживання реактивної потужності зростає при підвищенні напруги живлення, зниженні навантаження та зменшенні номінальної потужності двигуна. Оптимальне навантаження – у межах 0,7...0,9 від номінального. Силові трансформатори споживають реактивну потужність переважно на намагнічування та створення полів розсіювання. Попри менші відносні втрати порівняно з двигунами, їх загальний внесок у споживання реактивної потужності значний через масове застосування. Для зниження втрат РП доцільно виводити з роботи слабо навантажені трансформатори. Загалом, ефективне управління навантаженням і режимами роботи цих пристроїв є ключовим для зменшення витрат реактивної та активної потужності.

3 ДЖЕРЕЛА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА МЕТОДИ ЇЇ РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Джерела реактивної потужності

На рис 3.1 наведено приклад схеми електропостачання виробничого агропідприємства. В цілому РП споживається з електрообладнанням, різними перетворювачами струму як при напрузі до 1000 В (Q_H) і при напрузі вище 1000 В (Q_H).

Рисунок 3.1 – Схема електроживлення агропромислового підприємства

У деяких випадках великі електротермічні установки живляться від напруги 35, 110 і навіть 220 кВ (наприклад, від трьохблокових трансформаторів ГПП або окремих спеціальних). При цьому втрати реактивної потужності такої енергетичної системи мають трансформатори цехів ТП та ГПП. У схемі електропостачання агропромислового підприємства можуть бути задіяні як споживачі електричної енергії, так і джерела у вигляді теплових, сонячних чи вітрових електричних станцій. Джерелами РП такої енергосистеми можуть бути:

- генератори енергосистеми ЕС (Q_C) і ТЦ (Q_{TC});
- синхронні компенсатори СК ($Q_{СК}$);
- високовольтні ВБК (Q_{KB}) та низьковольтні НБК (Q_{KH}) конденсаторні батареї;
- синхронні двигуни СД (Q_{CD});
- компенсуючі перетворювачі (модифікатори компенсації).

Необхідно враховувати РП, який виробляють повітряні лінії з напругою 35 кВ і більше, струмопроводи з напругою 20 кВ і більше, а також кабельні лінії з напругою 6 кВ і більше. Слід зазначити, що синхронні компенсатори і двигуни можуть бути як джерелом реактивної потужності, так і споживачем.

3.2 Синхронні компенсатори

Синхронні компенсатори (СК) встановлюються з метою генерації РП [7]. Це один з підвидів синхронних машин, що працюють без активного навантаження на вал (вали синхронних компенсаторів роблять більш легкими, їх повітряні зазори набагато менше, ніж у промислових синхронних двигунів і генераторів тієї ж електричної потужності). В даний час запускаються СК потужністю від 5 до 160 МВА. Перевагами СК як джерела реактивної потужності є: позитивний регулюючий ефект, який полягає в можливості високошвидкісного, автоматичного плавного з широкими межами регулювання генерованого або споживаного РП і, отже, рівня напруги в точці підключення до системи електрозабезпечення; досить

висока теплова і електродинамічна стійкість обмоток СК при коротких замиканнях; допускають 2...3-разові надструми; можливість відновлення пошкоджених електрозабезпечення шляхом проведення ремонтних робіт. У той же час СК, будучи обертовими машинами, більш складні в експлуатації і мають великі питомі втрати активної потужності (приблизно 100 Вт/квар) при генерації РП. На промислових підприємствах допускається використання СК, якщо потужність КП перевищує 10^3 квар. Зазвичай СК встановлюються на великих регіональних підстанціях енергосистеми. Для зменшення коливань напруги, які викликані різкими змінними реактивними навантаженнями, використовуються швидкодіючі СК. Максимальна швидкість зміни реактивної потужності, що подається в мережу, у переважній більшості компенсуючих пристроїв не перевищує: $130 \cdot 10^3$ квар/с. Застосування СК на промислових підприємствах допускається, як правило, за згодою з енергосистемою, якщо необхідна потужність компенсуючих пристроїв перевищує 10^3 квар [1].

Синхронні двигуни (СД) виробляють РП одночасно при перетворенні електрики в механічну енергію при виконанні своїх основних завдань. Тому фактичні витрати на виробництво РП з двигунами незначні, так як фінансові витрати на їх установку безпосередньо пов'язані з призначенням двигунів. Як джерела РП, СД мають такі переваги:

- розташовані в самому цеху, тому втрати активної потужності для живлення РП мінімальні;
- забезпечують плавне регулювання РП;
- збільшують межу стабільності навантаження, відрегулювавши напругу в точці підключення до електричної системи.

Характер і величина реактивної потужності СД визначається величиною сили струму збудження в обмотці ротора. На рис.3.2 показані криві залежності струму статора $I_{ст}$ і реактивна потужність $Q_{сд}$ від струму збудження $I_{в}$ при різних значеннях коефіцієнт навантаження β активної потужності СД. Гілки кривої зліва відповідають недостатньому збудженню $Q_{сд}$ – в цьому режимі СД являє собою активно-індуктивне навантаження для мережі. Відгалуження кривої праворуч

відповідають режиму перезбудження – в цьому режимі синхронні двигуни являють собою активно-ємнісне навантаження для мережі, тобто працюють не тільки як двигун, але і як джерело РП.

Рисунок 3.2 – Залежності струму статора і реактивної потужності.

Умови роботи СД характеризуються основними параметрами, наприклад:

- коефіцієнтом навантаження на активну потужність $\beta = P/P_n$;
- коефіцієнтом навантаження для РП $\alpha = Q/Q_N$;
- відносною напругою на затисках $U' = U/U_N$.

У разі номінальної роботи, коли $\beta = 1$ і $U' = 1$, синхронні двигуни протягом тривалого періоду часу може виробляти номінальну реактивну потужність $Q_{\text{сд.н.}}$. У синхронних двигунах втрата активної потужності $\Delta P = f(\alpha, \beta, U')$ відбувається під час генерації РП $Q_{\text{сд.}}$.

Залежності, показані на рис. 3.3, які є достатніми для практичних розрахунків, з достатньою точністю можна замінити кривою другого порядку, рівняння якої, представлено у вигляді суми двох членів:

$$\Delta P = D_1 \frac{Q}{Q_{\text{сд.н.}}} + D_2 \frac{Q^2}{Q_{\text{сд.н.}}^2} \quad (3.1)$$

де D_1 і D_2 – постійні значення величин, які залежать від технічних характеристик СД, кВт.

Рисунок 3.3 – Криві номінальних потужностей

Для групи, що працює паралельно СД, з однаковим навантаженням, однотипних, з тією ж номінальною потужністю $Q_{\text{сд.н.}}$, втрата активної потужності:

$$\Delta P = D_1 \frac{Q}{Q_{\text{сд.н.}}} + D_2 \frac{Q^2}{N Q_{\text{сд.н.}}^2} \quad (3.2)$$

3.3 Статичні конденсатори

Конденсаторне обладнання загального призначення – це спосіб підвищення ефективності системи електропостачання за рахунок зниження споживання реактивної потужності шляхом використання батарей конденсаторів (БК). Для виконання цієї роботи не використовується реактивна потужність, а тільки для підтримки магнітного поля в електричних машинах або електричного поля в трансформаторах. Конденсатори можуть компенсувати реактивну потужність, що виробляється електричними навантаженнями, такими як двигуни, і тим самим зменшувати кількість реактивної потужності, яка повинна бути забезпечена електричною енергією [8, 9]. Реактивна потужність виробляється замість активної. В результаті в системі буде знижуватися загальна потужність реактивного струму, що дозволить підвищити ефективність системи, однак необхідно враховувати, що неконтрольоване підключення конденсаторів може пошкодити обладнання і привести до надмірної компенсації, що може привести до зайвих витрат. Тому необхідно використовувати спеціальні пристрої, такі як автоматичні компенсатори реактивної потужності (АКРП), які можуть автоматично управляти компенсацією потужності реактивних струмів з урахуванням змін в системі електроживлення для правильної компенсації струмів РП.

Статичні конденсатори (батареї конденсаторів БК) широко використовуються на промислових підприємствах як засіб компенсації струмів РП.

Їх основними перевагами є:

- 1) Низьке споживання активної потужності: від 3,5 до 4,5 Вт/квар для БК з напругою до 1000 В, і вище 1000 В – від 2 до 3 Вт/квар.
- 2) Тут немає обертових деталей, а блок БК, який не вимагає фундаменту, має дуже малу масу.
- 3) Простіші і дешевші з меншими трудозатратами на встановлення, ніж будь-який інший КП.
- 4) Здатність до регулювання потужності конденсаторів у батареї.

5) Можливість установки в будь-якій точці мережі в окремих електроприймачах, цехових групах, ГПП, ТП.

6.) Коли один з належним чином захищених конденсаторів вийшов з ладу, це мінімально впливає на роботу батареї в цілому.

Недоліки БК:

- 1) Вони дуже вразливі до надмірних напруг.
- 2) Вони можуть підсилити небажані гармоніки, можуть увійти в резонанс струмів, що в деяких випадках може викликати пошкодження БК через перевантаження по струму.
- 3) Окремі конденсатори підлягають ремонту чи відновленню при пошкодженні.
- 4) Необхідність зняття залишкового заряду або розряду після відключення від мережі.

У порівнянні з іншими типами джерел РП, перераховані вище переваги БК гарантували їх широке застосування в системах електрозабезпечення промислових підприємств. Статичні конденсатори можуть бути реалізовані в схемах електроживлення (рис. 3.4):

1) Персональна компенсація РП двигунів, освітлювальних приладів, зварювальних апаратів, електротермічних та інших установок. Перевага: Додайте ПК безпосередньо до ручок клієнта RM. Мінус: велика кількість СВ малої потужності, що призводить до більш високих капітальних вкладень і більшої складності їх використання.

Рисунок 3.4 – Статичні конденсатори у системах електропостачання

2) Групова компенсація РП містить багато одиничних споживачів. Перевага: мала кількість БК. Недолік: РП не компенсується в мережах, що живлять окремих споживачів.

3) Централізована компенсація РП в центрах живлення. Переваги:

зменшення кількості обладнання та зменшення капітальних вкладень; можливість зміни РП, що випускається в залежності від необхідності або величини $\text{tg}\varphi$; можливість регулювання напруги в режимі мінімальних навантажень підприємства. Мінус: Відсутність розрядників від РП, розташованих між БК і замовником.

У трифазній електромережі БК підключається за схемою «трикутник» або схемою «зірка». РП БК з'єднаної за схемою за схемою «трикутник» визначається за формулою:

$$Q = wCU_{\Delta}^2 10^{-3} \quad (3.3)$$

А коли схема з'єднується у "зірку":

$$Q = wCU_{\Phi}^2 10^{-3} \quad (3.4)$$

де w - кутова частота напруги у мережі;

C - сумарна ємність всіх конденсаторів, мкФ;

U_{Δ} , U_{Φ} - лінійні і фазні напруги мережі, кВ.

Висновок до розділу 3

Джерела РП включають генератори, синхронні компенсатори (СК), синхронні двигуни (СД), конденсаторні батареї (БК), а також повітряні, кабельні лінії та спеціальні компенсатори. СК і СД можуть як виробляти, так і споживати РП. Синхронні компенсатори забезпечують швидке та точне регулювання РП, мають високу стійкість до коротких замикань, але відзначаються високими втратами активної потужності та складністю експлуатації. Вони доцільні для використання на великих підстанціях або за згодою з енергосистемою. Синхронні двигуни можуть виконувати роль джерел РП без значного додаткового навантаження, оскільки їх основна функція – механічна робота. Вони забезпечують локальну компенсацію РП з мінімальними втратами. Статичні конденсатори (БК) є

найпоширенішим і економічно вигідним способом компенсації РП. Їхні переваги – низькі втрати, простота монтажу, дешевизна та гнучкість застосування. Недоліки – чутливість до перенапруг і можливість резонансів.

4 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Перед нами поставлена задача проєктування електропостачання споживачів із застосуванням компенсації реактивної потужності. Для вирішення цієї задачі слід звернути увагу на декілька моментів:

- вибір способу підключення елементів статичних компенсаторів РП;
- вибір засобів та схеми компенсації;
- вибір трансформатора КТП;
- економічну ефективність;
- технічну безпеку.

4.1 Вибір способу підключення елементів статичних компенсаторів РП

З формул 3.3 і 3.4 видно, що додавання конденсаторів в схему «трикутник» дозволяє отримати від конденсаторів однакової ємності до 3 разів більше потужності, ніж при підключенні за схемою «зірка». Також слід зазначити, що реальна потужність БК Q_K залежить від відносного рівня напруг U_c у точці підключення БК до системи електроспоживання:

$$Q_K = Q_{KH} \left(\frac{U_c}{U_{KH}} \right)^2 \quad (4.1)$$

де Q_{KH} і U_{KH} – відповідні паспортні дані конденсаторів.

Розрядні резистори постійно підключені паралельно до конденсаторів для безпечної роботи відключених конденсаторів та для зняття залишкової напруги.

Опір резистора не повинен перевищувати розряд конденсатора виходячи з таких умов:

- період повного розряду конденсатора не повинен перевищувати більше ніж 3-5 хв;

- втрати активної потужності в резисторах не повинні перевищувати 1 Вт/квар.

Приблизний опір розрядження визначається виразом:

$$R=15 \cdot 10^6 \cdot \frac{U_{\Phi}}{Q_K} \quad (4.2)$$

де U_{Φ} - фазна напруга мережі, кВ;

Q_K - потужність БК, квар.

Конденсаторні батареї для компенсації РП для КТП складаються з вводу 6, 10 кВ і однієї чи декількох конденсаторних комірок (рис. 4.1). У вхідній секції знаходиться трифазний вимикач із заземленням і приводами, автоматика електромагнітного блокування і вимірювальна апаратура. В конденсаторній секції є три конденсатори типу КЕК2-10, 5-150 з інтегрованими розрядними резисторами.

Рисунок 4.1 – Електрична схема БК централізованої компенсації РП

До складу електричної схеми запропонованої БК входять автоматичні вимикачі ВВ/ЕС-40,5 зовнішньої установки фідеру Q , трансформатори струму $TA2$ типу ТПЛ, розрядні резистори R , конденсатори косинусні КЕК2-10, 5-150, плавкі вставки F .

4.2 Вибір засобів та схеми компенсації

Статичні компенсуючі пристрої (СКП) є ефективним засобом компенсації реактивної потужності. Головною їх перевагою є швидкість спрацьовування і, відповідно, здатність пригнічувати перепади напруги. В даний час на основі управління реакторами і конденсаторами створено безліч типів систем АСУ ТП, часто з використанням електронних керованих вимикачів. Пристрої для прямої

або непрямой компенсації знайшли широке застосування в зарубіжній і вітчизняній практиці (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Порівняння синхронних компенсаторів з СКП прямої і непрямой компенсації

Параметри порівняння	Спеціальний синхронний компенсатор	Пряма компенсація СКП	Непряма компенсація СКП
Час налаштування, с	більше 0,06	менше 0,02	менше 0,01
Тип регулювання	Плавний	Дискретний	Плавний
Робота на симетричне навантаження	Відсутнє пофазне управління	Пофазне управління	Пофазне управління
Улаштування	Бетонна відливка	Фундамент не потрібен	Фундамент не потрібен
Втрата активної потужності, %	2,5 ... 4	0,5 ... 1	1 ... 2
Спотворення напруги	Ні	Ні	Ні

Система управління прямою компенсацією виконує ступінчасте регулювання РП шляхом включення і відключення БК при зміні РП електроприймачів. Для підвищення швидкості спрацювання в якості перемикачів можуть бути використані твердотільні тиристорні реле [10]. Для поліпшення перехідних процесів при включенні тиристори відкриваються в той момент, коли напруга мережі і конденсатора рівні як за величиною, так і за полярністю. Швидкість роботи систем прямої компенсації СКП в основному визначається умовами комутації при зміні РП і становить близько 0,02 с. Однією з головних переваг систем прямої компенсації СКП є те, що вони не генерують в мережу більш високих гармонік, а до недоліків можна віднести складність ланцюга живлення, схеми управління і значну вартість.

Автоматична система управління (АСУ) непрямой компенсації виконує поетапне регулювання РП шляхом включення і відключення БК в момент зміни РП

електроприймачів (рисунок 4.2, а). В якості перемикачів для підтримки швидкості використовуються тиристорні комутатори. Для поліпшення перехідних каскадів при підключенні розблокування тиристорів проводиться при рівності напруги мережі і конденсаторів як за величиною, так і по полярності. Швидкодія СКП прямої компенсації в основному визначається умовами комутації при зміні РП і становить приблизно 0,02 с. Одною з основних переваг СКП прямої компенсації є те, що вони не викликають високих гармонік в мережі, а до недоліків слід віднести складність схеми живлення, схеми управління і значну вартість.

Непряма компенсація складається з двох частин: плавно регульованого індуктивного елемента (реактора) і нерегульованого БК або силового резонансного фільтру (СРФ) (рисунок 4.2, б). Принцип непрямої компенсації полягає в управлінні реактором, який споживає РП при відсутності реактивного навантаження від споживачів, а зниження його потужності здійснюється за умови появи РП від електроприймачів, при цьому зберігається стабільність реактивної потужності, що виробляється з мережі. Сила струму в реакторі регулюється по-різному. Наприклад, деякі іноземні фірми використовують керований реактор. Однак його показник становить 0,06. Тому регулювання РП використовується за рахунок зміни протилежного паралельного кута провідності тиристорів. Така схема забезпечує плавне регулювання РП з часом затримки 0,01 с, але є джерелом високих гармонік.

Рисунок 4.2 – Способи під'єднання конденсаторів

Джерелами РП на виробничому майданчику агропромислового підприємства є встановлені конденсаторні батареї в електромережі, асинхронні двигуни, кабельні та повітряні лінії з напругою 6 кВ і 10 кВ.

При виборі засобу компенсації РП необхідно враховувати наступне:

а) вихідна потужність БК батареї конденсаторів пропорційна квадрату напруги в зажимах:

$$Q_{БК} = \left(\frac{U}{U_{БК}}\right)^2 Q_{н.БК} \quad (4.3)$$

де $U, U_{БК}$ – це відносні номінальні напруги мережі і конденсаторів в точці їх підключення;

$Q_{БК}$ – номінальна потужність БК;

б) Сумарна величина РП усіх синхронних двигунів підприємства, яка може бути сформована за рахунок всієї сумарної потужності, що проєктується в схемах електропостачання:

$$Q_{сд} = \alpha_n Q_n = \frac{a_n \cdot P_n \cdot tg\phi_n}{\eta} \quad (4.4)$$

де Q_n, P_n – номінальні реактивна і активна потужності синхронного двигуна;

$tg\phi_n, \eta$ – коефіцієнти реактивної потужності і ККД (коефіцієнт корисної дії), що відповідають номінальним даним двигуна;

α_n – найбільше допустиме перевантаження синхронного двигуна по РП, яке залежить від типу двигуна, відносної напруги і коефіцієнта навантаження в його зажимах β , визначається його активною потужністю (додаток А);

в) РП, що генерується кабельними та повітряними лініями:

$$Q_{lin} = (U)^2 \cdot Q_0 \cdot l \quad (4.5)$$

де U – відносна напруга мережі по відношенню до U -номінального;
 Q_0 – питома РП, яка генерується 1 км кабельної мережі (додаток Б);
 L – довжина лінії.

Потужність БК, що встановлюється при наявності синхронних двигунів та протяжних кабельних ліній мережі до 1000 В і у мережах 6/10 кВ, визначається за такими формулами:

$$Q_{БК.Н.} = Q_{КУ.Н.} - Q_{СД.Н.} \quad (4.6)$$

$$Q_{БК.В.} = Q_{КУ.В.} - 0.7Q_{СД.В.} - Q_{lin}$$

де $Q_{БК.Н.}$, $Q_{КУ.Н.}$, $Q_{СД.Н.}$ – потужність в компенсаторних приладах та конденсаторах, що встановлюються на лініях напругою до 1000 В;

$Q_{КУ.В.}$, $Q_{СД.В.}$ – потужність в компенсаторних приладах та конденсаторах, що встановлюються на лініях напругою до 6/10 1000 кВ.

Як засіб компенсації РП, приймаємо встановлення БК для споживачів. Проектна схема електрозабезпечення виробничого майданчика для агропромислового підприємства зображена на рис 4.3.

Рисунок 4.3 – Схема електрозабезпечення виробничого майданчика

4.3 Вибір трансформатора КТП та компенсуючих пристроїв

Вихідні дані по агропромислового підприємству:

- сушарка типу СК-3-600/7000 50 кВт $\cos(\varphi)=0,88$
- інспекційні конвеєри АД 20 кВт $\cos(\varphi)=0,76$
- конвеєри готової продукції АД 20 кВт $\cos(\varphi)=0,76$
- кількість робочих днів на 2025 рік з урахуванням сезонності експлуатації 87
- режим роботи цілодобовий

- мінімальна завантаженість 80%.

Розрахункова потужність трансформатора КТП наведена у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахункова потужність трансформатора КТП

№	Дільниця	Потужність, Р, кВт	cos(φ)	Повна потужність, кВА
1.	Сушарка типу СК-3-600/7000	50	0,88	56
2.	Інспекційні конвеєри	20	0,76	24.8
3.	Конвеєри готової продукції	20	0,76	24.8
	Разом, кВА			105,6

Для забезпечення безперебійної роботи та можливості технологічного розширення виробництва приймаємо коефіцієнт збільшення запасу потужності 0.25. Таким чином $105,6 \cdot 1,25 = 132$ кВА.

За отриманими даними підбираємо КТП з трансформатором потужністю не менше 132 кВА. Серед вітчизняних виробників нашу увагу привернула щоглова КТП ТОВ «СЛАВГОР ЕНЕРГО УКРАЇНА» (рис. 4.4) [11].

Рисунок 4.4 – КТПМ - 160 КВА /6;10/ 0,4 щоглова трансформаторна підстанція
Основні технічні характеристики наведені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні технічні характеристики

№	Показник	Значення
1.	Країна виробник	Україна
2.	Вид улаштування	Відкрите повітря
3.	Конструкція трансформаторної підстанції	Щоглова
4.	Кількість трансформаторів	1
5.	Потужність трансформатора	160 кВА
6.	Номінальна напруга на стороні вищої напруги	10 кВ
7.	Номінальна напруга на стороні нижчої напруги	0.4 кВ
8.	Спосіб приєднання станції до мережі	Тупикова
9.	Тип монтажу підстанції	Опорна
10.	Термін служби	30 років
11.	Кількість фаз	3
12.	Частота струму	50 Гц

13.	Ступінь захисту ІР	54
-----	--------------------	----

За даним табл. 4.2 визначаємо середнє значення $\cos(\varphi)_c$ по підприємству:

$$\cos(\varphi)_c = \frac{90}{132} = 0,85 \quad (4.7)$$

Для забезпечення максимальної ефективності роботи компенсаційних конденсаторних установок нам слід підвищити $\cos(\varphi)_c$ до значення 0,98.

Потужність компенсуючої установки Q_y визначається наступною формулою:

$$Q_y = \Sigma P \cdot k \quad (4.8)$$

де ΣP – сумарна потужність підприємства

k – коефіцієнт перерахунку отриманий з таблиці додатку Б ($k=0,44$)

За нашими даними $Q_y = 132 \cdot 0,44 = 58,08$ квар

Компенсуючі пристрої для забезпечення максимальної ефективності роботи системи електроспоживання агропромислового підприємства можна встановити двома способами: групова – одна установка на групу навантажень; централізована – в електрощитовій або розподільчій підстанції для всього об'єкта [12].

Варто розглянути обидва варіанти. Групова установка конденсаторів на сторону 0,4 кВ, потужністю 58 квар. конденсаторна установка УКРМ 0.4-70 [13].

Рисунок 4.5 – Комплектна конденсаторна установка АКУ, УКРМ 58 0.4

Централізована – на підстанції на стороні 10 кВ Автоматична високовольтна конденсаторна установка УКРМ 10.5-500 кВар Ступені (50+150+300) [14]:

Рисунок 4.6 – Високовольтна конденсаторна установка на 6 кВ або 10 кВ

Висновок до розділу 4

У розділі розглянуто проектування електропостачання агропромислового підприємства з урахуванням компенсації реактивної потужності. Проаналізовано способи підключення статичних компенсаторів реактивної потужності, обґрунтовано вибір схеми компенсації (пряма і непряма), а також здійснено техніко-економічний аналіз типів обладнання. Окрема увага приділена вибору трансформатора КТП та конденсаторних батарей. На основі розрахунків обрано щоглову КТП потужністю 160 кВА та запропоновано встановлення компенсаційної установки потужністю 58 квар для підвищення $\cos(\varphi)$ з 0,85 до 0,98. Розглянуто два варіанти встановлення – централізоване та групове.

5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ТЕХНІЧНА БЕЗПЕКА

5.1 Економічна ефективність

Після підбору компенсаторних пристроїв слід провести економічний аналіз серед запропонованих варіантів [15].

Слід зазначити, що вартість монтажу обох варіантів компенсаторів має несуттєві відмінності, тому розглядатися не буде.

Позитивний економічний ефект спостерігається уже від самого застосування компенсації РП. У Полтаві для підприємств вартість електроенергії може бути сталою або змінюватися відповідно до ринкових умов та сезонних коливань. Для малого й середнього бізнесу діє фіксована ціна у розмірі 5,67 грн/кВт*год (без урахування ПДВ, а також вартості розподілу й передачі) на період з 1 січня до 31 березня 2025 року [16]. Інші підприємства сплачують за електроенергію за цінами, що формуються на ринку — зокрема, відповідно до часу споживання та правил ринку «на добу наперед» або балансуючого сегменту.

Згідно завдання — кількість робочих днів P_d на 2025 рік з урахуванням сезонності експлуатації 87, режим роботи цілодобовий $\tau=24$, тариф електроенергії $T = 5,67$ грн/кВт*год, E_e економія електричної енергії 15,6 кВт/год.

Отже, річний економічний ефект E від впровадження компенсації РП становить:

$$E = E_e \cdot \tau \cdot P_d \cdot T = 15,6 \cdot 24 \cdot 87 \cdot 5,67 = 184\,687,78 \text{ грн} \quad (5.1)$$

З урахуванням того, що вартість УКРМ 0.4-70/5-10 становить 40 416 грн термін окупності компенсації РП становить $40\,416/184\,687,78 \approx 0,23$ року, тобто окупність з урахуванням сезонності роботи агропромислового підприємства становить приблизно 1 рік.

Високовольтні конденсаторні установки на 6 кВ або 10 кВ коштують 1323648 грн. Термін окупності таких компенсаторів становить $1323648/184\,687,78 \approx 7,2$

роки.

Враховуючи економічну доцільність, слід вибрати монтаж УКРМ 0.4-70/5-10.

5.2 Технічна безпека

У виробничому приміщенні цеху використовуються матеріали, які не підтримують горіння. Цех відноситься до категорії Д згідно з класифікацією пожежної та вибухопожежної небезпеки, що характерна для процесів, де задіяні негорючі речовини.

У випадку займання працівники зобов'язані [17]:

- при необхідності припинити роботу обладнання згідно з технічною інструкцією;
- невідкладно вжити заходів для усунення джерела вогню;
- ліквідовувати осередок загоряння за допомогою відповідного вогнегасника;
- у разі виникнення пожежі в електромережі – від'єднати її від джерела живлення;
- ізоляційні матеріали електропроводки дозволено гасити лише вуглекислотним вогнегасником або використовувати пісок.

У приміщенні повинно бути передбачено наявність наступних первинних засобів пожежогасіння:

- два порошкових вогнегасника ОП-5 та два вуглекислотних ОУ-5;
- контейнер з піском об'ємом один кубічний метр, укомплектований лопатами;
- комплект пожежного інструменту на щиті: по дві одиниці лопат, ломів, гаків, кірок та відер.

Гасіння пожежі здійснюватимуть місцеві пожежні бригади.

До будівлі цеху забезпечено доступ для спеціалізованої техніки завдяки облаштованим під'їзним дорогам (рис. 4.3).

Вимоги з охорони праці під час електромонтажу [18-20].

1. Отвори в бетонних конструкціях необхідно пробивати, використовуючи захисні окуляри зі склом, яке не б'ється.
2. Свердління в стінах, монтаж силових кабелів з перетином понад 4 мм² та натягування проводів у горизонтальному положенні потрібно виконувати лише зі спеціальних вишок. Застосування драбин чи випадкових предметів для цього заборонено.
3. Забороняється прикріплювати троси до корзин або майданчиків у процесі їх монтажу або під час натягування відтяжок.
4. При роботі з приставної драбини на висоті необхідно використовувати страхувальний пояс. Точку фіксації карабіна визначає відповідальна особа під час інструктажу.
5. Під час підйому монтажних елементів (кабелів, шин, ізоляторів, металевих деталей) потрібно застосовувати відтяжки, які запобігають їх розгойдуванню.
6. Протягування кабелів або дротів через стіни та перекриття повинне проводитися під контролем інших працівників, щоб уникнути затягування рук у трубу.
7. Щоб запобігти пораненням під час затягування проводів у труби, їхні кінці необхідно зачистити від задирок та гострих країв.
8. Елементи освітлення, що працюють від змінного струму понад 42 В або постійного понад 110 В, мають бути надійно ізольовані від кріплення до стін або стелі.
9. Комутаційні пристрої мають бути підключені до фазного проводу, а не до нульового.
10. Монтаж світильників дозволяється виконувати лише удвох або одному працівнику із застосуванням допоміжних засобів.
11. На час монтажу з усіх щитів освітлення й силових установок повинні бути зняті запобіжники чи виключені автоматичні вимикачі та вивішена відповідна табличка.

12. При розмотуванні проводів, кабелів чи тросів обов'язкове використання захисних рукавиць.
13. Усі металеві елементи кабельних електромереж мають бути заземлені.
14. Шинопроводи монтують лише після встановлення кріпильних конструкцій.
15. Для перевірки опору ізоляції проводів або кабелів омметром допускаються лише особи з групою допуску з електробезпеки не нижче третьої.

Висновок до розділу 5

Розглянуто економічну ефективність впровадження компенсації реактивної потужності (РП) на підприємстві. Порівняно два варіанти обладнання, і встановлено, що найбільш доцільним є вибір УКРМ 0.4-70/5-10 з терміном окупності приблизно 1 рік, на відміну від високовольтних установок з окупністю понад 7 років. Проаналізовано вимоги технічної безпеки, пожежної безпеки та охорони праці під час електромонтажу. Описано категорію приміщення, наявні засоби пожежогасіння та детальні інструкції з безпечного виконання монтажних робіт, з акцентом на використання засобів індивідуального захисту, заземлення та дотримання технічних правил.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За результатами теоретичних досліджень встановлено, що реактивна потужність не виконує корисної роботи, але є необхідною для функціонування електричних машин.

2. Використання компенсуючих пристроїв (КП) (зокрема, конденсаторних батарей) дозволяє зменшити струми в мережі, знизити втрати енергії та напруги, підвищити економічність і надійність роботи електропостачання промислових та аграрних підприємств.

3. Перекомпенсація є небажаною, оскільки може призвести до додаткових втрат.

4. Розглянуто основні споживачі реактивної потужності в електроенергетичних системах, серед яких головними є асинхронні двигуни (40%) та силові трансформатори (35%).

5. Надано фізико-технічне пояснення споживання реактивної потужності асинхронними двигунами та трансформаторами. Споживання реактивної потужності зростає при підвищенні напруги живлення, зниженні навантаження та зменшенні номінальної потужності двигуна. Оптимальне навантаження – у межах 0,7...0,9 від номінального. Силові трансформатори споживають реактивну потужність переважно на намагнічування та створення полів розсіювання.

6. Синхронні компенсатори забезпечують швидке та точне регулювання РП, мають високу стійкість до коротких замикань, але відзначаються високими втратами активної потужності та складністю експлуатації. Вони доцільні для використання на великих підстанціях або за згодою з енергосистемою.

7. Статичні конденсатори (БК) є найпоширенішим і економічно вигідним способом компенсації РП. Їхні переваги – низькі втрати, простота монтажу, дешевизна та гнучкість застосування. Недоліки – чутливість до перенапруг і можливість резонансів.

8. Проаналізовано способи підключення статичних компенсаторів реактивної потужності, обґрунтовано вибір схеми компенсації (пряма і непряма).

9. Розраховано параметри конденсаторних батарей для переробного підприємства агропромислового комплексу. Запропоновано електричну схему під'єднання компенсаційних пристроїв.

10. Розглянуто економічну ефективність впровадження компенсації реактивної потужності (РП) на підприємстві. Порівняно два варіанти обладнання, і встановлено, що найбільш доцільним є вибір УКРМ 0.4-70/5-10 з терміном окупності приблизно 1 рік, на відміну від високовольтних установок з окупністю понад 7 років.

11. Проаналізовано вимоги технічної безпеки, пожежної безпеки та охорони праці під час електромонтажу.

Я на практиці використав отримані знання та розуміння значення та місця регулювання реактивної потужності.