

Компенсація реактивної потужності в комбінованих системах електропостачання цукрових заводів

І.Є. Изволенський, старший науковий співробітник, Національний університет харчових технологій
В.Є. Шестеренко, кандидат технічних наук, Національний університет харчових технологій

Наведено основні аспекти нормативної методики вибору потужності компенсуючих пристроїв в залежності від напруги мережі та конфігурації окремих елементів її. Показана доцільність використання кожного синхронного двигуна для компенсації реактивної потужності. Якщо коефіцієнт завантаження синхронного двигуна менше одиниці, економічно доцільно використовувати повністю очікувану реактивну потужність двигуна.

Ключові слова: реактивна потужність, компенсація, система електропостачання.

Приведены основные аспекты нормативной методики выбора мощности компенсирующих устройств в зависимости от напряжения сети и конфигурации отдельных ее элементов. Показана целесообразность использования каждого синхронного двигателя для компенсации реактивной мощности. Если коэффициент загрузки синхронного двигателя меньше единицы, экономически целесообразно использовать полностью ожидаемую реактивную мощность двигателя.

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсация, система электроснабжения.

The basic aspects of standardized methods of choice power compensating devices, depending on the voltage and configuration of individual elements of it. The expediency of the use of each synchronous motor for reactive power compensation. If the load factor of a synchronous motor is less than unity, economically expedient to use fully expected reactive power output.

Keywords: reactive power, compensation, supply system.

Практично всі цукрові заводи України мають комбіновану систему електропостачання – отримують електроенергію від власної ТЕЦ і підключені до енергосистеми. У ремонтний період ТЕЦ не працюють і електропостачання здійснюється від загальних електричних мереж. Електростанції цукрових заводів мають обмежені можливості генерування реактивної потужності. На ТЕЦ встановлюють генератори з коефіцієнтом потужності, що дорівнює 0,8. Значна частина генерованої реактивної потужності споживається трансформаторами та ЛЕП. Розподіл споживання реактивної потужності такий: асинхронні двигуни - 70%, трансформатори - 20%, освітлювальні та інші електроприймачі - 10% [1-5].

Оскільки $\cos\varphi$ генераторів ТЕЦ цукрового заводу і основних споживачів (асинхронні двигуни) співпадали і дорівнювали 0,8, тривалий час вважалося, що компенсувати реактивну потужність на цукрових заводах не потрібно.

Але в реальних умовах навантаження двигунів часто не співпадає з номінальною потужністю. Якщо двигун працює з повним навантаженням,

$$\beta = 1, \cos\varphi = \cos\varphi_{\text{НОМ.}} \approx 0.8 \quad (1)$$

У разі зниження завантаження коефіцієнт потужності знижується:

$$\beta = 0.5, \rightarrow \cos\varphi \approx 0.6 \quad \beta = 0.25, \rightarrow \cos\varphi \approx 0.4 \quad (2)$$

Тому реактивної потужності генераторів власної ТЕЦ недостатньо для нормальної роботи підприємства, і на багатьох заводах встановили високовольтні конденсаторні установки, що недоцільно по економічним показникам, адже під час передачі реактивної потужності до споживачів спостерігаються значні втрати активної потужності внаслідок опору провідників r :

$$\Delta P = \frac{Q^2}{U^2} \cdot r \quad \text{або} \quad \Delta P = P^2 \cdot (1 + tg^2\varphi) \quad (3)$$

Збільшується переріз провідників, тому що переріз вибирають за струмом навантаження, а струм залежить від реактивної потужності.

При цьому спостерігається перевитрата провідникового матеріалу. Нераціонально використовується потужність трансформаторів S_T

$$S_T = P \cdot \sqrt{(1 + tg^2 \varphi)} \quad (4)$$

Виникають додаткові втрати напруги [4]

$$\Delta U = \frac{Qx}{10 \cdot U_{ном}^2}, \quad (5)$$

де x - реактивний опір елементів системи електропостачання.

Таким чином, реактивну потужність, що передається до електроприймачів, необхідно знижувати (компенсувати) до економічно обгрунтованого рівня.

При компенсації необхідно враховувати такі загальні вимоги [1-5]:

- 1) на відміну від активної реактивну потужність можна генерувати в будь-якій точці мережі;
- 2) наближення джерел реактивної потужності до споживачів сприяє розвантаженню мережі;
- 3) баланс реактивної потужності має бути витриманий для всіх вузлів системи електропостачання.

Критерієм раціонального вирішення задачі компенсації реактивної потужності є мінімум приведених витрат. Вони складаються з витрат на компенсуючі, регулюючі та супутні пристрої, з витрат на регулювання реактивної потужності та передачу її по елементах мережі. Ці витрати включають складові, що не залежать від величини реактивної потужності, так і ті що залежать від неї в першому або другому ступені.

На цукрових заводах для компенсації реактивної потужності застосовують конденсатори та синхронні двигуни [1-5]. Невелика маса, відсутність частин, що обертаються, незначні втрати енергії, простота обслуговування, безпечність і надійність в експлуатації дозволяють використовувати конденсатори для компенсації реактивної потужності на всіх ступенях системи електропостачання. Розміщуючи конденсатори у мережі промислового підприємства, необхідно враховувати, що існують індивідуальна, групова та централізована компенсація реактивної потужності [1-5].

При індивідуальній компенсації конденсаторна установка підключається до затискачів електроприймача без комутаційних апаратів. Цей вид компенсації слід застосовувати тільки у відносно великих електроприймачів з великим числом річних робочих годин. Індивідуальна компенсація дозволяє розвантажити від реактивних струмів усю мережу виробничого підприємства. Проте цей спосіб потребує значних капітальних вкладень. Крім того, час роботи компенсуючих пристроїв залежить від тривалості вмикання електроприймача, бо з вимкненням з мережі його вимикається і конденсаторна батарея. У разі групової компенсації конденсаторна установка (КУ) підключається до шинопроводів або до шин розподільних пунктів мережі 0,38 кВ. Цей спосіб дозволяє збільшити час використання конденсаторів. Проте частково мережі напругою 0,38 кВ стають завантаженими реактивною потужністю.

При централізованій компенсації конденсаторна установка підключається:

- 1) до шин 0,4 кВ ТП; 2) до шин 6...10 кВ РП; 3) до шин 6...10 кВ ГПП.

У першому випадку від реактивної потужності розвантажується вся високовольтна мережа й трансформатори ТП; у другому - тільки частина високовольтної мережі й трансформатори ГПП; у третьому - тільки трансформатори ГПП і мережі енергосистеми.

Як правило, люмінесцентні світильники обладнані конденсаторами, і освітлювальні мережі окремої компенсації не потребують.

У силових мережах основним споживачем реактивної потужності є асинхронний двигун. Внаслідок великої різноманітності досить важко дати чіткі рекомендації по вибору потужності конденсаторів для компенсації реактивної потужності двигунів.

В [4, 5] приведені рекомендації по вибору конденсаторів в залежності від потужності двигуна. Потужність конденсаторів вибрана за умовами недопущення самозбудження двигунів після вимкнення їх з електричної мережі. При самозбудженні напруга на затискачах двигуна зростає пропорційно струму конденсатора та швидкості ротора двигуна. Величина напруги може піднятися до 160% $U_{ном}$ і вище. Якщо двигун повторно вмикається в період самозбудження, розвивається потужний перехідний процес, оскільки фаза напруги самозбудження рідко співпадає з фазою напруги електричної мережі. На обмотки та вал двигуна діють електродинамічні сили, які в декілька разів вищі за ті, що зустрічаються при нормальній роботі. Особливо це стосується двигунів з інерційним навантаженням. Тому рекомендується всі двигуни з індивідуальною компенсацією перевірити на процес самозбудження, підключаючи вольтметр на затискачах двигуна [4].

Збільшити потужність конденсаторної установки індивідуальної компенсації реактивної потужності двигуна можна шляхом підключення конденсаторів до затискачів двигуна через автоматичний вимикач, що обладнаний електромагнітом дистанційного відключення, паралельно затискачам двигуна підключають реле максимальної напруги, сигнал керування з реле подають на електромагніт автоматич-

ного вимикача і відключають конденсаторну установку при підвищенні напруги безпосередньо на двигуні, як при нормальній роботі двигуна, так і під час перехідних процесів в моменти відключення двигуна від мережі [5]. Цей спосіб дозволяє повністю компенсувати реактивну потужність двигуна, що дозволить знизити втрати електроенергії в мережі. При виникненні самозбудження двигуна конденсатор миттєво відключається.

У разі групової та централізованої компенсації потужність (КУ) вибирають, виходячи із втрат активної потужності в системі електропостачання [4]

Втрати внаслідок перетоків реактивної потужності в трансформаторі та ЛЕП

$$\Delta P = \frac{C_0}{U^2} \cdot [M(Q_L^2) \cdot r_L + M(Q_T^2) \cdot r_T] \quad (6)$$

де $M(Q_L^2), M(Q_T^2)$ - математичне очікування Q в трансформаторі та ЛЕП.

Для вибору компенсуючих пристроїв досить мінімізувати функцію (6)

$$f = \sum_{i=1}^n r_i [M^2(Q_i) + D(Q_i)], \quad (7)$$

де: $M(Q_i)$ - математичне очікування Q на i - й ділянці мережі,

$D(Q_i)$ - дисперсія значення цієї потужності.

У відповідності з цією методикою для діючого заводу при реконструкції системи електропостачання

$$Q_{KV} = Q_M - Q_{ГЕН}, \quad (8)$$

де: Q_M - максимальне значення споживаної реактивної потужності по добовому ступінчатому графіку заводу, $Q_{ГЕН}$ - реактивна потужність генераторів ТЕЦ. Але найскладніше для проектувальника вибрати компенсуючі пристрої при наявності двох напруг. Це характерно для цукрових заводів:

$$Q_{KV} = Q_{HK} + Q_{BK}, \quad (9)$$

де: Q_{HK} - потужність КУ напругою до 1000 В, Q_{BK} - те ж, напругою 6...10 кВ.

У свою чергу: $Q_{HK} = Q_{HK1} + Q_{HK2}, \quad (10)$

де: Q_{HK1} - сумарна потужність КУ виходячи з оптимальної кількості трансформаторів ТП та допустимого їх завантаження β ,

Q_{HK2} - потужність КУ виходячи з оптимального значення втрат у трансформаторах та мережі напругою 6...10 кВ, що живить ці трансформатори.

Визначають максимальну реактивну потужність, яку доцільно передати через трансформатори ТП у мережу напругою до 1000 В.

$$Q_T = \sqrt{(N_{TE} \cdot \beta_T \cdot S_T)^2 - P_P^2}, \quad (11)$$

де: N_{TE} - число трансформаторів в групі (цех, корпус), β_T - очікуваний коефіцієнт завантаження трансформаторів, S_T - номінальна потужність трансформатора в групі, кВ·А, P_P - розрахункова активна потужність електроприймачів напругою до 1000 В.

Сумарна потужність КУ для даної групи трансформаторів:

$$Q_{HK1} = Q_P - Q_T, \quad (12)$$

де Q_P - розрахункова реактивна потужність електроприймачів напругою до 1000 В.

На другому етапі визначається додаткова сумарна потужність КУ для даної групи трансформаторів ТП:

$$Q_{HK2} = Q_P - Q_{HK1} - \gamma \cdot N_{TE} \cdot S_T; \quad (13)$$

де γ - розрахунковий коефіцієнт, що залежить від схеми живлення і визначається за формулою.

Для однієї підстанції:

$$\gamma = \frac{49,5}{100 + \frac{r \cdot l \cdot S_T}{F}}; \quad (14)$$

де: l - довжина лінії живлення (при радіальній схемі) або відстань до першого трансформатора (в магістральній схемі), км, F - переріз провідників ЛЕП, мм², r - коефіцієнт що залежить від напруги живлення: $r=8(27)$ в радіальних схемах на 6 та 10 кВ, $r=15(5)$ відповідно для магістральних мереж.

При розрахунковому значенні $Q_{HK} < 200$ квар, для трансформатора ТП потужністю 1000 кВ·А необхідно встановити КУ з мінімальною потужністю 200 квар. Це може бути стандартна КУ типу УКМ

0,4 - 225 - 37,5. Для трансформаторів ТП потужністю 630 кВ·А рекомендована мінімальна потужність КУ 110 квар, тобто стандартна КУ типу УКМ 0,4 - 112,5-37,5 [1, 2, 3]. Споживання реактивної потужності протягом доби нерівномірне. Режим роботи всіх джерел реактивної потужності повинен відповідати графіку споживання реактивної потужності. Потужність КУ необхідно змінювати в залежності від графіка споживання реактивної потужності. Застосування конденсаторів індивідуальної компенсації дозволяє відмовитися від складних та дорогих пристроїв регулювання потужності конденсаторних установок, якими необхідно комплектувати установки централізованої компенсації на трансформаторних підстанціях. Критерієм оптимальності при оперативному керуванні компенсацією є мінімум втрат електроенергії [1, 2, 4].

На цукрових заводах можна широко використовувати нерегульовані КУ [1, 2, 4], якими є конденсаторні батареї (БК), що складаються з певної кількості конденсаторів заданої потужності, установлених в місцях підімкнення низькосинусного сталого навантаження, де непотрібне регулювання реактивної потужності.

Вартість установки такої батареї повністю враховується при визначенні розрахункових затрат, основну частку яких складають відрахування від капітальних вкладень. Батареї конденсаторів мають такі переваги: а) низькі питомі втрати електроенергії; б) допускається більша вільність при виборі потужності й місця установки БК. Залежно від конкретних умов із техніко-економічних міркувань потужність БК можна варіювати в широких межах. БК можуть приєднуватися майже в будь-якій точці мережі, що дозволяє розміщувати їх безпосередньо в місцях споживання реактивної потужності, наприклад в цехових підстанціях; в) можливість поступового збільшення їхньої потужності приєднанням нових секцій по мірі зростання споживання реактивної потужності в мережі.

Недоліком таких батарей є те, що вони не регулюються за величиною реактивної потужності, яка генерується, і їх можна використовувати тільки для компенсації базисної частини добового графіка споживання реактивної потужності. У інших випадках слід застосовувати КУ з автоматичним регулюванням потужності.

На цукрових заводах широко використовують синхронні двигуни. Кожний синхронний двигун (СД) може бути регульованим джерелом реактивної потужності, номінальне значення якої [1, 2, 3].

Якщо коефіцієнт завантаження СД менше одиниці $K_3 < 1$, економічно доцільно використовувати повністю очікувану реактивну потужність СД

$$Q_{CD} = \alpha_M \cdot S_{CD\text{ ном}} \tag{15}$$

де α_M - коефіцієнт допустимого перевантаження СД, який залежить від його завантаження активною потужністю.

Коефіцієнт α_M може визначатися за формулою:

$$\alpha_M = \sin \varphi_{ном} + (1 - K_3) \cdot \left(\frac{\sin \varphi_{ном}}{48 \cdot \sin \varphi_{ном} - 32} + 0,4 \right) \tag{16}$$

де K_3 - коефіцієнт завантаження СД активною потужністю.

Після розрахунку допустимого значення реактивної потужності СД необхідно розрахувати економічно доцільне навантаження двигуна реактивною потужністю

$$Q_{Cде} = \frac{3_{BK} \cdot Q_{CD\text{ ном}} - D_1 \cdot C_0}{2 \cdot D_2 \cdot C_0}, \tag{17}$$

де D_1, D_2 - параметри СД (приймаються за каталожними та довідковими даними), C_0 - вартість втрат енергії, 3_{BK} - питома вартість високовольтних КУ [4].

На цукрових заводах застосовують тиристорні перетворювачі, які можна вважати потужними джерелами вищих гармонік. Наявність вищих гармонік призводить до зростання втрат активної потужності в конденсаторах. При цьому втрати в діелектриці [4],

де: $U_{*v} = \frac{U_v}{U_{ном}}$ - відносне значення гармонічної складової напруги,

$\Delta P_{ном} = U_{ном}^2 \omega C_{ном} \text{tg} \delta_{ном}$ - номінальні втрати в конденсаторі від основної гармоніки.

У діапазоні частот 50...1000 Гц можна прийняти $\text{tg} \delta$ незмінним, в діапазоні 1000...3000 Гц значення його збільшується в 1,5 рази

$$\Delta P' = \Delta P_{ном} \left(\sum_{v=2}^{20} U_{*v}^2 v + 1,5 \sum_{v=21}^{60} U_{*v}^2 v \right). \tag{18}$$

Додаткові втрати в ізоляції від корпусу

$$\Delta P'' = 2\pi f_{ном} C_{ном} U_{ном}^2 \operatorname{tg} \delta_{изол.} \sum_{v=1}^N \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \nu \quad (19)$$

Додаткові втрати в обкладках конденсаторів

$$\Delta P'' = I_v^2 r_e \nu = \left(2\pi f_{ном} C_{ном} U_{ном}^2 \right)^2 r_e K_r \nu^2 \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2, \quad (20)$$

де: K_r - коефіцієнт що враховує поверхневий ефект, r_e - опір, Ом.

При коефіцієнті несинусоїдності $k_{НС}$ до 5-8%, рекомендується застосовувати для компенсації батареї конденсаторів у комплекті із захисним реактором [2, 3]. Потужність батареї конденсаторів (БК) визначається з умов балансу реактивної потужності. Напряга БК

$$U_{БК} = \frac{\nu_{мін}^2 U_{ном}}{(\nu_{мін}^2 - 1)} \quad (21)$$

де $U_{ном}$ - номінальна напруга мережі, в якій установлюється конденсатор, що захищається реактором; $\nu_{мін}$ - мінімальний порядковий номер гармоніки.

Необхідно забезпечити індуктивний характер кола для гармоніки з найменшою частотою з гармонік, що генеруються сумарним нелінійним навантаженням. Індуктивний опір захисного реактора на частоті 50 Гц

$$x_p \geq \frac{1,1 \cdot U_{БК.ном}}{(\nu^2 Q_{БК.ном})} \quad (22)$$

де $Q_{БК.ном}$ - реактивна сумарна потужність БК за даними заводу-виготовлювача.

Висновки

1. Запропонована методика вибору потужності КУ не вимагає суттєвих трудовитрат, дає конкретні результати, точність розрахунку практично не залежить від рівня інфляції.

2. Вартість втрат електричної енергії зростає значно швидше, ніж питома вартість конденсаторів, що дозволяє забезпечити всі асинхронні двигуни конденсаторами індивідуальної компенсації і суттєво знизити втрати в електричних мережах цукрових підприємств.

3. Застосування конденсаторів індивідуальної компенсації дозволяє відмовитися від складних та дорогих пристроїв регулювання потужності конденсаторних установок.

Проведені дослідження на діючих цукрових заводах показали необхідність застосування засобів зниження рівня вищих гармонік. У цьому напрямі автори направляють основні зусилля в подальшій роботі.

Список використаних джерел

1. *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів*. Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики України від 25.10.2006.
2. *Правила користування електричною енергією*. Затверджено постановою НКРЕ 31.07.2005 № 910. Зареєстровано в міністерстві юстиції України 18.11.2005 № 1399/11679.
3. *Балюта С.М., Изволенький І.Є., Шестеренко В.Є.* Оптимальний режим роботи джерел реактивної потужності підприємства //Наукові праці НУХТ. – 2012. - №45. – с. 61...66.
4. *В.Є. Шестеренко.* Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник. - Вінниця: Нова Книга, 2011. – 656 с.
5. *Патент України № 34943, H02J 3/12.* – Спосіб підключення конденсаторів індивідуальної компенсації реактивної потужності асинхронного двигуна – / Шестеренко В.Є., Сірий О.М., Балюта С.М. - Опубл. 26.08.2008. Бюл. №16.