

Особливості регулювання реактивної потужності в системах електропостачання цукрових заводів

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

Наведено характеристики методів регулювання реактивної потужності компенсуючих пристроїв. Запропонований підхід до регулювання КУ, що дозволяє суттєво підвищити економічні показники джерел реактивної потужності, що забезпечує зміну в акцентах керування потужностями КУ до забезпечення системної цілеспрямованості вирішення проблеми, що концептуально пов'язана з оптимізацією режиму електроспоживання на цукровому підприємстві. Запропоновано широко використовувати індивідуальну компенсацію реактивної потужності асинхронних двигунів. Показані шляхи виникнення несиметрії струмів і напруг та негативного впливу несиметрії на термін служби трифазних конденсаторів і асинхронних двигунів.

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.

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсация, система электроснабжения.

The ways of increasing operation efficiency of reactive power compensation on the plants are considered. The basic aspects of standardized methods of choice power compensating devices, depending on the voltage and configuration of individual elements. The first cost of an installation of individual capacitors will be greater, however, than that for one unit of the same total kilovolt – amperes located at a central point. The greater saving in operating expense due to individual capacitors must be weighed against their increased first cost. The locking circuit against high voltage is presented. The problems of its engineering implementation are considered.

Keywords: reactive power, compensation, supply system.

Режим роботи всіх джерел реактивної потужності повинен відповідати графіку споживання реактивної потужності [2]. На цукрових заводах вказаний графік відзначається суттєвою стабільністю. Дослідження, проведені працівниками НУХТ, показали, що в період переробки цукрових буряків навантаження протягом доби змінюється в межах 20% від максимального навантаження.

Для характеристики графіка реактивного навантаження вводять коефіцієнт форми графіка

$$K_{\phi} = \frac{Q_{\text{СК}}}{Q_c},$$

де Q_c - середня потужність,

$$Q_c = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T q(t) dt,$$

$Q_{\text{СК}}$ - середньоквадратична потужність:

$$Q_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt},$$

де q – миттєве значення реактивної потужності.

Коефіцієнт форми графіка в період переробки буряків близький до одиниці.

Враховуючи вищевказані фактори проектувальники при реконструкції цукрових заводів в період 1970–1980 років не застосували регулювання реактивної потужності конденсаторних установок (КУ), що призвело до росту втрат активної енергії та до погіршення якості напруги.

Синхронні двигуни (СД) дозволяють як плавно змінювати реактивну потужність, що генерується, зміною струму збудження, так і підтримувати її постійною. Але регулювання СД також не передбачалось.

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.

Кожну з цих складових частин можна записати у вигляді:

$$Z_{KV} = Z_{0KV} + K_{1KV} Q_{KV};$$

Q_{KV} - реактивна потужність, яку генерують КУ,

$$Z_{0KV} = C_B \cdot K_B + C_P \cdot K_P$$

де: C_B, K_B - щорічні відрахування на пристрої вводу, C_P, K_P - те ж, регулювання.

$$K_{1KV} = E_{KV} \cdot K_{KV} \cdot \left(\frac{U_{KV \text{ ном}}}{U}\right)^2 + C_0 \cdot \Delta P_{KV \text{ ПИТ}},$$

де: K_{KV} - питома вартість КУ, E_{KV} - норма щорічних відрахувань від вартості КУ, $U_{KV \text{ ном}}$, U - паспортна напруга КУ та фактична мережі, (при 0,35 кВ - 1; 6...10 кВ - 1,05), $\Delta P_{KV \text{ ПИТ}}$ - питомі втрати активної потужності в КУ (кВт/квар), (для КУ до 1000 В - 0,0045, для КУ напругою 6...10 кВ - 0,0025).

В силових мережах основним споживачем реактивної потужності є асинхронний двигун. Внаслідок великої різнотипності досить важко дати чіткі рекомендації по вибору потужності конденсаторів. Виходячи з оптимальної ефективності використання КУ, нераціонально повністю компенсувати реактивну потужність двигуна на його затискачах. 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 [2, 3]. Наближення джерел реактивної потужності до споживачів сприяє розвантаженню мережі і суттєво знижує втрати електроенергії.

Потужність конденсаторів індивідуальної компенсації необхідно вибирати за умовами недопущення самозбудження двигунів після вимкнення їх з електричної мережі. 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, який би дозволяв комутацію конденсаторів при виникненні самозбудження двигуна в моменти відключення його від мережі. При самозбудженні напруга на затискачах двигуна зростає пропорційно струму конденсатора та швидкості ротора двигуна. Величина напруги може піднятися до 160% $U_{\text{ном}}$ [1].

Недоліком індивідуальної компенсації вважається висока її вартість. Конденсатори потужністю 1...5 квар в два-три рази дорожчі, ніж конденсатори на 25...50 квар. Тому в цехах з великою кількістю малопотужних двигунів індивідуальна компенсація не завжди ефективна. В таких випадках застосовується централізована компенсація з установкою конденсаторів біля трансформаторної підстанції цеху [1, 4].

При наявності на підприємстві кількох конденсаторних установок застосовується багатоступеневе регулювання сумарної реактивної потужності шляхом різночасового вмикання чи вимикання окремих батарей згідно з графіком навантаження.

У сучасних схемах застосовують способи розподілення компенсуючих пристроїв по вузлах мережі: пропорційно реактивним навантаженням вузлів, за мінімумом зведених витрат, за мінімумом втрат енергії [2,3]. У зв'язку з високим ступенем компенсації реактивної потужності на підприємствах, що проектується, й застосуванням багатосекційних конденсаторних установок, які монтується звичайно на ТП, два останніх способи не забезпечують великих переваг, хоча трудовитрати на розрахунки по них на порядок вищі. Спосіб регулювання потужності конденсаторних батарей за напругою виправданий тільки у вузлах, де спостерігається дефіцит реактивної потужності. У зв'язку з тим, що намічається тенденція повної компенсації реактивної потужності у вузлах її споживання, прогресивнішим слід вважати спосіб регулювання за реактивним струмом.

Регулювання по реактивній потужності є ідеальним методом з багатьох точок зору. Регулятор вмикається у вузлі живлення мережі. Конденсаторна установка може бути багатосекційною, а регулювання вестись з достатньою точністю згідно графіка реактивного навантаження.

При зниженні реактивної потужності, що передається по мережі та через трансформатори, втрати активної потужності зменшуються на величину до 0,12 кВт/квар [1, 2, 3, 4] і залежать від віддаленості до джерела живлення. При компенсації необхідно враховувати такі загальні вимоги: на відміну від

активної реактивну потужність можна генерувати в будь-якій точці мережі; наближення джерел реактивної потужності до споживачів сприяє розвантаженню мережі. Найменші питомі втрати мають конденсаторні батареї. Найбільші - синхронні двигуни невеликої потужності. Застосування КУ напругою 6...10 кВ призводить до завантаження мережі підприємства реактивною потужністю та до збільшення втрат енергії [3, 4].

Нерегульованими КУ є шунтові конденсаторні батареї (БК), що складаються з певної кількості конденсаторів заданої потужності, установлених в місцях підімкнення низькокосинусного 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: низькі питомі втрати електроенергії; допускається більша вільність при виборі потужності й місця установки КУ. Залежно від конкретних умов із техніко-економічних міркувань потужність КУ можна варіювати в широких межах. КУ можуть приєднуватися майже в будь-якій точці мережі, що дозволяє розміщувати їх безпосередньо в місцях споживання реактивної потужності, наприклад в цехових підстанціях [2, 3, 4].

Недоліком таких установок 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.

Ступінчасто-регульована КУ являє собою конденсаторну установку, що складається з певної кількості конденсаторів, підімкнених до загальних шин через контактори чи напівпровідникові ключі (зустрічно-паралельно ввімкнені тиристри) [1, 3, 4]. Багаторічний аналіз режимів роботи систем електропостачання цукрових заводів, виконаний фахівцями НУХТ, показав, що діапазон регулювання КУ на ТП, які відключаються в ремонтний період, не перевищує 25-30% розрахункової потужності КУ. Завдяки цим дослідженням можна суттєво знизити вартість КУ, комплектуючи конденсаторну установку з нерегульованої частини та регульованої. Нерегульована частина комутується автоматичним вимикачем і відключається в періоди виконання ремонтних робіт.

Сумарна потужність нерегульованих джерел реактивної потужності не повинна перевищувати споживану потужність у години мінімуму.

Ступінчасто-регульовані конденсаторні установки виготовляються з різним числом регульованих секцій. Такі установки ступінчастого регулювання дозволяють підтримувати в певних межах задане значення того параметра, на який настроєний вимірювальний орган блока керування. Це є їхньою додатковою перевагою порівняно з нерегульованими шунтовими конденсаторними батареями. Недоліком таких пристроїв є неможливість точного регулювання параметра, бо потужність батареї змінюється дискретно, збільшуючись або зменшуючись відразу на значення потужності однієї секції.

Енергопостачальна організація задає режим роботи компенсуючих пристроїв цукрового заводу в ремонтний період. І на них треба передбачати автоматичне регулювання з діапазоном регулювання 100%.

Недоліки конструкції трифазних конденсаторів можуть призвести до несиметрії струмів і напруг. Це відбувається при виході з ладу окремих секцій конденсатора і перегорянні вбудованих в корпус конденсатора запобіжників [1]. Але частіше причиною несиметрії напруг може бути неповнофазний режим роботи мережі, нерівність фазних параметрів лінії, неоднаковість фазних навантажень, неякісний ремонт асинхронних двигунів, коли кількість витків у фазних обмотках може бути різною, виткові замикання в обмотках статора.

Для характеристики несиметрії напруг вводять коефіцієнт зворотної по-слідовності напруги - величина, що дорівнює відношенню напруги зворотної послідовності до напруги основної частоти,

$$K_{2U} = 100 \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}}$$

де $U_{2(1)}$ - діюче значення напруги зворотної послідовності, В.

Нормально допустиме значення коефіцієнта - 2%, гранично допустиме значення - 4% [1, 2, 3, 4].

Другий коефіцієнт, що характеризує несиметрію - коефіцієнт нульової послідовності - величина, що дорівнює відношенню напруги нульової послідовності до міжфазної напруги основної частоти мережі:

$$K_{0U} = 100 \frac{U_{0(1)} \sqrt{3}}{U_{1(1)}},$$

де $U_{0(1)}$ - діюче значення нульової послідовності, В, $U_{1(1)}$ - діюче значення міжфазної напруги основної частоти, В.

Нормальне значення коефіцієнта - 2%, гранично допустиме - 4% [1, 2, 3, 4].

Коефіцієнт зворотної послідовності напруг у розглядуваній точці електричної мережі цукрового заводу [1]

$$k_{2U} = (1 + \delta U) \cdot \frac{(a^2 S_{AB}^* + S_{BC}^* + a S_{CA}^*)}{(S_k^* + S_{2C}^* + S_{AB}^* + S_{BC}^* + S_{CA}^*)}$$

де $\delta U = \frac{(U_1 - U_{НОМ})}{U_{НОМ}}$ - відхилення напруги прямої послідовності від номінального фазного значення,

$a = e^{j120}$, $a^2 = e^{-j120}$ - фазові оператори; S_{AB}^* , S_{BC}^* , S_{CA}^* - спряжені комплекси сумарних потужностей однофазних навантажень; $S_{2C}^* = 3U_{НОМ}^2 \cdot Y_{2C} \cdot e^{j\varphi_{2C}}$ - спряжений комплекс потужності зворотної послідовності симетричного навантаження; S_k^* - спряжений комплекс потужності короткого замикання; Y_{2C} , φ_{2C} - модуль і аргумент еквівалентної провідності зворотної послідовності.

При визначенні коефіцієнта зворотної послідовності напруги можна користуватися спрощеною формулою

$$k_{2U} = (1 + \delta U) \cdot \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{j\psi_U}}{S_k}$$

де допоміжні розрахункові величини

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} (P_{AB} - P_{CA}) - \frac{1}{2} (Q_{AB} + Q_{CA}) + Q_{BC}$$

$$\beta = -\frac{1}{2} (P_{AB} - P_{CA}) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (Q_{AB} + Q_{CA}) + P_{BC}$$

P_{AB} , P_{CA} , Q_{AB} , Q_{CA} , Q_{BC} - сумарні активні та реактивні потужності відповідних однофазних навантажень;

ψ_U - аргумент вектора напруги зворотної послідовності.

Сили струмів прямої та зворотної послідовності визначаються з таких виразів:

$$I_1 = \frac{\sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}}{(3 \cdot U_{НОМ}) \cdot e^{j \arctg(Q_{\Sigma} / P_{\Sigma})}}$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{(3 \cdot U_{НОМ}) \cdot e^{j\psi_i}}$$

$P_{\Sigma} = P_{AB} + P_{CA} + P_{BC}$; $Q_{\Sigma} = Q_{AB} + Q_{CA} + Q_{BC}$ - відповідно активна та реактивна потужність несиметричного навантаження;

Для струмів зворотної послідовності опір двигуна в K_n разів менший, ніж для прямої. Тому при $K_{2U} = 2\%$ струм зворотної послідовності в обмотках асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором складатиме 14% струму прямої послідовності, що може призвести до перегріву двигуна. При несиметрії напруги в електричних машинах виникають магнітні поля, що обертаються в зворотному напрямі. Виникає тормозний електромагнітний момент, а також додаткове намагнічування активних частин машин, за рахунок струмів подвійної частоти. При роботі двигуна з $P_{НОМ}$ і $K_2 = 4\%$ термін служби ізоляції скорочується в два рази і двигун «горить» [1, 4].

У генераторі ТЕЦ виникають значні вібрації в результаті додаткових обертаючих моментів і тангенціальних зусиль, що пульсують з подвійною частотою мережі. При значній несиметрії можуть руйнуватися зварні з'єднання, руйнується фундамент. Додаткові втрати в генераторі призводять до локальних перегрівів обмотки збудження, що зумовлює зниження струму збудження, зменшує реактивну потужність. Створюється необхідність зниження активної потужності генератора.

Несиметрія зумовлює скорочення терміну служби трансформатора. При $K_{\theta} = 0.1$ термін служби скорочується на 16%.

Несиметрія зумовлює скорочення терміну служби трифазних конденсаторів внаслідок перегрівання однієї з фаз.

Несиметрія негативно впливає на роботу нагрівачів, зменшує їх продуктивність, збільшує питомі витрати енергії. У деяких випадках може призвести до росту бракованої продукції, оскільки можуть

з'явитися зони перегрівання і зони з низькими температурами, внаслідок нерівномірності розподілення енергії по об'єму печі.

Зниження несиметрії здійснюється шляхом зниження опору мережі струмам оберненої та нульової послідовності й зниження значень цих струмів. Опір струмам нульової послідовності можна знизити, застосувавши трансформатори 6...10/0,4 кВ зі схемою з'єднання обмоток трикутник - зірка з нулем, зірка - зигзаг. Зниження систематичної несиметрії здійснюють перерозподілом навантажень за фазами.

У мережах 6...10 кВ струм зворотної послідовності можна знизити, увімкнувши конденсаторні батареї так, щоб створюваний ними струм зворотної послідовності дорівнював би струму зворотної послідовності мережі й був би спрямований назустріч.

Спеціальні симетруючі пристрої слід застосовувати при однофазному навантаженні та

$$S_1 \geq \frac{S_k}{50}$$

де S_k - потужність короткого замикання у мережі.

Для вибору засобів КРП при коефіцієнті зворотної послідовності напруг понад 2% рекомендується застосовувати симетруючі або фільтро-симетруючі пристрої [1, 4].

Висновки

1. 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 промислових підприємств напругою до 1кВ.

2. Застосування конденсаторів індивідуальної компенсації дозволяє відмовитися від складних та дорогих пристроїв регулювання потужності конденсаторних установок, якими необхідно комплектувати установки централізованої компенсації на трансформаторних підстанціях.

3. Енергопостачальна організація задає режим роботи компенсуючих пристроїв цукрового заводу в ремонтний період. І в цей період необхідно передбачати автоматичне регулювання потужності конденсаторних установок з діапазоном 100%.

4. Аналіз режимів роботи систем електропостачання цукрових заводів, виконаний фахівцями НУХТ, показав, що діапазон регулювання КУ на ТП, які відключаються в ремонтний період, не перевищує 25-30% розрахункової потужності КУ. Завдяки цим дослідженням можна суттєво знизити вартість КУ, комплектуючи конденсаторну установку з нерегульованої частини та регульованої.

5. Недоліки конструкції трифазних конденсаторів можуть призвести до несиметрії струмів і напруг. При несиметрії напруг термін служби ізоляції асинхронного двигуна скорочується і двигун «горить».

Список використаних джерел

1. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підруч. // – Вінниця: Нова Книга, 2011. – 656 с.

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., Ізволенький І.Є., Шестеренко В.Є. Оптимальний режим роботи джерел реактивної потужності підприємства // Наукові праці НУХТ. – 2012. - №45. – с. 61...66.

4. Shesterenko V., Sidorchuk I, Reactive power compensation in the combined system of sugar refinery electricity // Ukrainian food journal, Volume 2, Issue 1, 2013, p.116-122.

Рецензент: О.Г. Мазуренко, д.т.н., проф.