

Синхронний двигун – ефективне джерело реактивної потужності

В.Є. Шестеренко, професор, кафедра енергопостачання та енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій

І.Є. Ізволенький, старший науковий співробітник, кафедра енергопостачання та енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій

Проблемою компенсації реактивної потужності в останні роки стало те, що власників цукрових заводів мало цікавить майбутній економічний ефект за рахунок зниження втрат електроенергії в системі електропостачання підприємства. Вартість конденсаторів суттєво зросла і період окупності їх розтягнувся на роки.

Але підприємці можуть мати швидкий прибуток, якщо продавати електроенергію в період переробки буряків і не платити енергопостачальній організації за реактивну енергію в ремонтний період.

Коефіцієнт потужності характеризує повноту використання активної потужності. Низьке його значення говорить про слабе використання потужності генератора ТЕЦ.

При синусоїдальній напрузі:

$$\cos\varphi = \frac{U_1 I_1 \cos\varphi_1}{U_1 I_D} = \frac{I_1}{I_D} \cos\varphi_1 = \mu \cos\varphi_1 \quad (1)$$

де φ_1 - кут зсуву між напругою і складовою основної частоти струму; μ - коефіцієнт несинусоїдності струму.

Компенсація реактивної потужності (КРП) при змінній формі кривих струму і напруги зустрічає труднощі. Так як для КРП використовуються пристрої, які практично не мають втрат, мінімізація уявної потужності мала б вести до оптимального коефіцієнта потужності. Наприклад, якщо ємність приєднати паралельно навантаженню, загальний вираз для уявної потужності буде мати вигляд:

$$S = \left(\sum_1^v U_v^2 + \sum^m U_m^2 \right) \cdot \left\{ \sum_1^v (I_v^2 + U_v^2 v^2 \omega^2 C^2 + 2U_v I_v v \omega C \sin\varphi_v) + \sum^m U_m^2 m^2 \omega^2 C + \sum^p I_p^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

Якщо взяти похідну від (1.2.6.2) по C і прирівняти її до нуля, то

$$C_{opt} = - \frac{\frac{1}{\omega} \sum_1^v U_v v I_v \sin\varphi_v}{\sum_1^v U_v^2 v^2 + \sum^m U_m^2 m^2} \quad (3)$$

При наявності на підприємстві кількох конденсаторних установок застосовується багатоступеневе регулювання сумарної реактивної потужності шляхом різночасового вмикання чи вимикання окремих батарей згідно з графіком навантаження. Сумарна потужність нерегульованих джерел не повинна перевищувати споживану потужність у години мінімуму навантаження, бо реактивна потужність не повинна передаватися з мережі підприємства у мережу енергосистеми.

Протягом доби потужність, що генерується, повинна не менш як на 80-90% збігатися з графіком споживаної реактивної потужності. Завжди необхідно забезпечувати вимкнення нерегульованих компенсуючих пристроїв у вихідні дні та неробочі години. Вимкнення може здійснюватися вручну чи автома-

тично. Число секцій конденсаторних батарей слід вибирати залежно від характеру графіка реактивної потужності. 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.

Ступінчато-регульована конденсаторна установка складається з певної кількості конденсаторів, підімкнених до загальних шин через контактори чи напівпровідникові ключі. Недоліком таких пристроїв є неможливість точного регулювання параметра, бо потужність батареї змінюється дискретно, збільшуючись або зменшуючись відразу на значення потужності однієї секції.

Автоматичні системи регулювання потужності конденсаторної установки (КУ) будують по розімкнутій або замкнутій схемам. При розімкнутій схемі здійснюється автоматичне керування, при замкнутій - автоматичне регулювання. Автоматичне управління можливе тільки для односекційної КУ, автоматичне регулювання - у разі багатосекційної КУ, потужність якої багаторазово змінюється в часі відповідно до вимоги режиму розподільчої мережі.

Для управління за розімкнутою схемою односекційної установки автоматичний регулятор не потрібний, тому що можна використовувати реле управління, що реагують на будь-який параметр режиму електричної мережі. При регулюванні по замкнутій схемі, застосовують спеціальні автоматичні регулятори. При регулюванні по замкнутій схемі, застосовуючи спеціальні автоматичні регулятори, слід використовувати один параметр або комбінацію параметрів, які істотно змінюються зі зміною потужності КУ. Регулятор NOVAR, забезпечуючи автоматичне регулювання сімома або чотирнадцятьма секціями КУ або дев'ятьма окремими КУ однієї напруги, можна використовувати для створення систем регулювання реактивної потужності в розподільних мережах промислових підприємств. Узгодження декількох регуляторів, працюючих в одній розподільній мережі, досягається за рахунок використання систем керування. Однак реалізація таких систем з розосередженою установкою значного числа регуляторів у вузлах розподільної мережі та узгодження алгоритмів їх роботи є досить складним завданням. Більш перспективним є побудова систем з централізованим комплексним регулюванням джерел реактивної потужності. Таке регулювання, здійснюване на базі АСДУ енергосистем, вимагає складної мікропроцесорної техніки, значної кількості датчиків і каналів зв'язку.

Регульовані КУ підключають до шин розподільних пристроїв через комутуючий апарат. В мережах напругою до 1000 В це може бути контактор або автоматичний вимикач, а в мережах напругою вище 1000 В - вимикач. Проте умови роботи цих апаратів при експлуатації регульованих КУ відрізняються від умов роботи комутуючих апаратів іншого електрообладнання через перехідні процеси, що виникають в моменти комутації конденсаторних батарей. При перехідних процесах з'являються короткочасні імпульси струму, що перевершують номінальний струм КУ, тому необхідно застосовувати пристрої, що обмежують ці перехідні процеси.

Для оптимального розміщення конденсаторних установок в радіальній мережі необхідно мінімізувати функцію

$$f = \sum_{i=1}^n r_i [(Q_{KYi} - Q_i)^2 + \delta_{Q_i}^2], \quad (4)$$

де $\delta_{Q_i} = \sqrt{D(Q_i)}$ - середньоквадратичне відхилення значення навантаження.

В існуючих способах індивідуальної компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів конденсаторна установка підключається до затискачів електроприймача без комутаційних апаратів. У випадку відключення двигуна від мережі живлення досить часто виникають умови для самозбудження. При самозбудженні напруга на затискачах двигуна зростає пропорційно струму конденсатора та швидкості ротора двигуна. Величина напруги може піднятися до 160% $U_{ном}$. 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, і двигун може вийти з ладу.

В запропонованому способі підключення конденсаторів індивідуальної компенсації реактивної потужності асинхронного двигуна конденсаторну установку підключають до затискачів двигуна через вакуумний автоматичний вимикач, що обладнаний електромагнітом дистанційного відключення, пара-

лельно затискачам двигуна підключають електронний датчик максимальної напруги, сигнал керування з датчика подають на систему відключення автоматичного 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.

Реалізація запропонованого способу пояснюється кресленням (рис. 1), на якому зображено блок-схему підключення конденсаторної установки для компенсації реактивної потужності двигуна.

Асинхронний двигун М підключено до мережі через контактор КМ. Конденсаторна установка КУ може складатися з одного конденсатора чи з батареї конденсаторів, з'єднаних паралельно або послідовно в залежності від напруги і потужності двигуна М. Установка КУ підключена до затискачів двигуна М через вакуумний автоматичний вимикач SF. До затискачів двигуна М підключають електронний безінерційний датчик напруги KV. Робоче положення автоматичного вимикача SF – постійно включений. Комутацію двигуна М і установки КУ здійснюють контактором КМ. У випадку самозбудження двигуна М і підвищенні напруги на ньому спрацьовує датчик KV і посилає сигнал на відключення вакуумного автоматичного вимикача SF. Конденсаторну установку КУ відключають при аварійному підвищенні напруги безпосередньо на двигуні, що дозволить миттєво призупинити перехідні процеси, які можуть викликати вихід з ладу ізоляції двигуна.

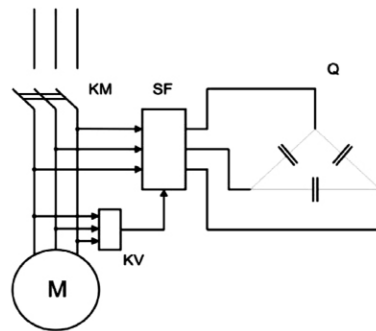


Рис.1. Схема підключення конденсаторів для індивідуальної компенсації реактивної потужності асинхронного двигуна

Схема підключення асинхронних двигунів по запропонованому способу забезпечує суттєве підвищення надійності роботи двигунів і конденсаторних установок індивідуальної компенсації, оскільки вакуумний автоматичний вимикач здійснює надійний захист в робочих режимах конденсаторів від перевантажень струмами вищих гармонік.

В конденсаторних батареях застосовують конденсатори з діелектриком з конденсаторного паперу та з синтетичної плівки. Ці конденсатори зазвичай призначаються для підвищення коефіцієнта потужності електроустановок змінного струму частотою 50 Гц. Конденсатори з'єднують трикутником або зіркою в групи, секції та цілі установки. З'єднання трикутником дозволяє отримати від конденсаторів однієї і тієї ж ємності в 3 рази більшу потужність, ніж з'єднання зіркою.

Джерелом вищих гармонік є керований інвертор перетворювача частоти. Основна причина несинусоїдальності струму перетворювачів – комутація вентилів без розриву струмів, що призводять до періодичних міжфазних КЗ в мережі живлення. Комутаційні КЗ відрізняються від аварійних тільки короткочасністю, тобто вони тривають, доки струм фази, що виходить з роботи, не спаде до нуля. В кривій напруги з'являються комутаційні спотворення, форма, величина та кількість яких залежить від схеми випрямлення, кількості фаз випрямлення, потужності перетворювача, параметрів мережі живлення, кута регулювання перетворювача. Вказані спотворення мають періодичний характер, що дозволяє застосувати гармонічний аналіз.

Гармонійний склад кривої струму інвертора визначається так само, як для реверсивного перетворювача з симетричним або комбінованим керуванням. При симетричному управлінні амплітуда v -ї гармоніки

$$I_{vm} = -\frac{8I_d}{\pi V^2 \gamma} \operatorname{Sin} v \frac{\pi}{3} \operatorname{Sin} v \frac{\gamma}{2} \operatorname{Sin} v \frac{\pi}{2}; \quad (5)$$

при комбінованому

$$I_{vm} = \frac{8I_d}{\pi v^2 \gamma} \operatorname{Sin} v \frac{\pi}{2} \operatorname{Sin} v \frac{\gamma}{2} \operatorname{Sin} v \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right), \quad (6)$$

де β - кут керування.

Скомпенсований вентильний електропривод може бути реалізований при послідовному або паралельному включенні перетворювачів, що працюють з рівними за значенням, але протилежними за знаком кутами управління. Крива струму мережі виявляється несинусоїдальною. При живленні двох перетворювачів через трансформатори з однаковими групами сполук амплітудне значення v -ї гармоніки має вигляд:

$$I'_{vm} = 2I_{vm} \operatorname{Cos} v \alpha, \quad (7)$$

де I_{vm} - амплітудне значення v -ї гармоніки базового перетворювача, комутованого по трифазній нульовій схемі.

У відносних одиницях (по відношенню до амплітуди першої гармоніки) при $\alpha = 0$

$$I'_{vm*} = \frac{1}{v} \operatorname{Cos} \alpha \operatorname{Cos} (v \cdot \operatorname{arcCos} U_{d*}) \quad (8)$$

де U_{d*} - відносне значення випрямленої напруги (в порівнянні з номінальним значенням).

При зсуві фаз між вторинними напругами випрямлячів амплітудне значення v -ї гармоніки у відносних одиницях визначається за формулою:

$$I'_{vm*} = \frac{\operatorname{Sin} \frac{v\pi}{3}}{v \cdot \operatorname{Sin} \frac{\pi}{3}} \operatorname{Cos} \alpha \cdot \operatorname{Sin} \left(\frac{v\pi}{2} - v \cdot \operatorname{arcCos} U_{d*} \right) \quad (9)$$

Привід на базі асинхронного двигуна з використанням частотного регулювання частоти обертання є одним з найбільш перспективних типів регульованого електроприводу. Регулювання частоти обертання в цьому випадку здійснюється за допомогою тиристорних перетворювачів частоти, які можуть бути виконані у вигляді автономних інверторів, які здійснюють перетворення постійного струму в змінний, і перетворювачів з безпосереднім зв'язком (циклоінверторів), що перетворюють змінний струм однієї частоти в струм іншої частоти за допомогою перемикання зустрічно-паралельно з'єднаних силових вентилів. При використанні перетворювачів частоти такого типу частоту і форму кривої напруги на навантаженні можна регулювати, змінюючи кут управління вентилів у кожному черговому напівперіод живлячої напруги.

Перетворювачі частоти з ланкою постійного струму в якості джерел гармонік аналогічні вентильним перетворювачам змінного струму в постійній.

Основними формами впливу вищих гармонік на системи електропостачання є: а) збільшення струмів і напруг гармонік внаслідок паралельного і послідовного резонансів; б) зниження ефективності процесів генерації, передачі і використання електроенергії; в) старіння ізоляції електрообладнання та скорочення внаслідок цього терміну його служби; г) помилкова робота устаткування.

У синхронних двигунів вищі гармоніки призводять до погіршення економічних характеристик. Але вплив їх не такий жорсткий, як на конденсатори. На цукрових заводах із значним рівнем несинусоїдності напруги можна використовувати синхронні двигуни без економічних обмежень.

Синхронні двигуни (СД) застосовуються для приводу механізмів з тривалим режимом роботи - насосів, вентиляторів і т. ін. Заводи вітчизняної електропромисловості випускають СД з номінальним випереджальним коефіцієнтом потужності, що дорівнює 0.9 і можуть бути використані як джерела реактивної потужності (ДРП).

Кожний синхронний двигун може бути джерелом реактивної потужності,

$$\alpha_M = \sin \varphi_{ном} + (1 - K_3) \cdot \left(\frac{\sin \varphi_{ном}}{48 \cdot \sin \varphi_{ном} - 32} + 0,4 \right), \quad (10)$$

де K_3 - коефіцієнт завантаження СД активною потужністю.

В існуючих дизельних електростанціях (ДЕС), що використовуються як резервне джерело живлення, електрогенератор з'єднаний жорстко з дизельним двигуном. В нормальних умовах дизельний двигун не працює, і електрогенератор не використовується також. При порушенні електропостачання дизельний двигун запускається (автоматично чи з допомогою обслуговуючого персоналу) і електрогенератор живить електроенергією споживачі протягом часу аварії. Після відновлення електропостачання по основній схемі ДЕС відключається і обладнання її не використовується.

В запропонованому способі на валу електрогенератора монтують додатковий маховик, підключають електрогенератор до дизельного двигуна через електромагнітну муфту і використовують електрогенератор як джерело реактивної потужності в періоди безаварійної роботи системи електропостачання.

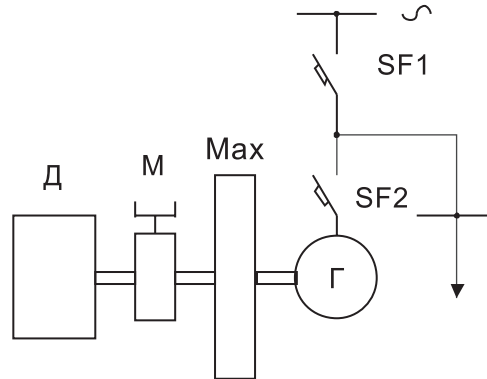


Рис. 2. Оптимальна схема використання резервної дизельної електростанції

Технічна суть запропонованого способу пояснюється кресленням (рис. 1), на якому зображено блок-схему ДЕС. На схемі Д – дизельний двигун, М – електромагнітна муфта, Мах – маховик, Г – електрогенератор, SF1 і SF2 – комутаційні пристрої для автоматичного підключення ДЕС.

В нормальному режимі генератор Г ДЕС відключений від дизельного двигуна Д з допомогою електромагнітної муфти М, контакти SF1 і SF2 замкнені і генератор використовується як синхронний компенсатор для компенсації реактивної потужності та регулювання напруги. В аварійному режимі муфта М приєднує генератор Г з маховиком Мах до дизельного двигуна Д, за рахунок енергії маховика Мах дизельний двигун Д запускається, контакти SF1 розмикаються і весь комплекс працює як ДЕС.

Застосування електромагнітної муфти дозволяє суттєво підвищити економічні показники ДЕС, оскільки електрогенератор можна застосовувати для компенсації реактивної потужності протягом всього року. При цьому маховик запасє значну кількість механічної енергії, яку можна використати для пуску дизельного двигуна. Схема ДЕС спрощується, і відпадає необхідність застосовувати акумуляторну батарею для пуску двигуна. Поєднання цих двох елементів в одній схемі дозволяє суттєво підвищити економічність ДЕС.

Використання СД як ДРП дозволяє зменшити кількість інших компенсуючих пристроїв. При техніко-економічному порівнянні СД з іншими ДРП необхідно визначення втрат активної потужності.

Синхронні двигуни промислових підприємств, обладнані пристроями автоматичного регулювання збудження, дозволяють автоматично й плавно регулювати реактивну потужність зміною режиму збудження.

У режимі перезбудження двигуна втрати напруги у мережі

$$\Delta U = \frac{Pr + (Q - Q_{CD})x}{U} \quad (11)$$

де P і Q - відповідно активна та реактивна потужність навантаження; Q_{CD} - реактивна потужність синхронного двигуна; r , x - відповідно активний та реактивний опір мережі.

У режимі недозбудження синхронного двигуна

$$\Delta U = \frac{Pr + (Q + Q_{CD}) \cdot x}{U} \quad (12)$$

Висновки

1. 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%.

2. Застосування конденсаторів індивідуальної компенсації дозволяє знизити вартість системи компенсації при одночасному підвищенні ефективності її.

3. ТЕЦ цукрового заводу може видавати додаткову електроенергію, якщо звільнити генератор від частини реактивної потужності.

4. Споживання реактивної потужності протягом доби нерівномірне. Режим роботи всіх джерел реактивної потужності повинен відповідати графіку споживання реактивної потужності. Потужність КРП необхідно змінювати в залежності від графіка споживання реактивної потужності.

5. Наявність в мережах конденсаторів, які використовуються для компенсації реактивної потужності, може призвести до місцевих резонансів, які в свою чергу, можуть викликати надмірне збільшення струму в конденсаторах і вихід їх з ладу.

6. У синхронних двигунів вищі гармоніки призводять до погіршення економічних характеристик. Але вплив їх не такий жорсткий, як на конденсатори. На цукрових заводах із значним рівнем несинусоїдності напруги можна використовувати синхронні двигуни без економічних обмежень.

7. Синхронні двигуни промислових підприємств, обладнані пристроями автоматичного регулювання збудження, дозволяють автоматично й плавно регулювати реактивну потужність зміною режиму збудження. ■

Список використаних джерел

1. В.Є. Шестеренко Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. - Він-ниця: Нова Книга, 2011. – 656 с.

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

3. Шестеренко В.Є. Оптимізація систем електроспоживання промислових підприємств. – Київ : ЧП «Глана», 2001. – 214 с.

4. V. Shesterenko, I. Sidoruk Research of the features of reactive power compensation in the combined system of food industry// Ukrainian Journal of Food Science, Volume 1, Issue 1, 2013, p 89- 95.

5. V. Shesterenko, I. Izvolensky, O. Mashchenko, O. Shesterenko. Optimization of power supply system at food production enterprises.// Ukrainian Journal of Food Science, Volume 2, Issue 1, 2014, p 97-105.

6. Julia Klymenko, Sergii Baluta (2013), Application of neural network regulator in cascade systems of regulation// Ukrainian Food Journal, 2(1), pp. 111-115.

7. V. Shesterenko, O. Mashchenko O. Shesterenko. Problem of increasing the power factor in industrial enterprises// Ukrainian food journal, Volume 4, Issue 1, 2015, p.134-144.

8. V. Shesterenko, V. Sofilkanych. Local control of alternating current, received from solar panels power supply // Ukrainian Journal of Food Science, Volume 3, Issue 1, 2015, p 113- 122.

9. S. Baljuta, V. Shesterenko, O. Mashchenko. Control sources of reactive power as effective method of increased efficiency in power supply systems for food production/ Journal of FOOD and PACKAGING Science, Technique and Technologies, Year 4, №7, 2015, Plovdiv, BULGARIA, p 30-35.

10. Шестеренко В.Є., Изволеньський І.Є. Компенсація реактивної потужності як ефективний засіб зниження втрат електроенергії.// Наукові праці НУХТ, Том 21, №5, 2015, С. 169-178.

11. Балюта С.М., Изволеньський І.Є., Шестеренко В.Є. Оптиміальний режим роботи джерел реактивної потужності підприємства //Наукові праці НУХТ. – 2013. - № 51, С. 84-90.

12. Шестеренко В.Є., Шестеренко О.В. Електропостачання промислових підприємств. – Київ: 2013. – 424 с.

13. В.Є. Шестеренко, І.Є. Изволеньський. Підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в системах електропостачання.// Наукові праці НУХТ, Том 23, №2, 2017, С. 140-146.