

УДК 621.316

OPTIMIZATION OF THE COMPENSATION SYSTEM OF THE REACTIVE POWER OF THE SUGAR PLANT

V. Shesterenko, I. Izvolenskiy

National University of Food Technologies

Key words:

*Alternating voltage
Harmonics
Power supply system
Reactive power
Compensation*

Article history:

Received 15.09.2017
Received in revised form
03.10.2017
Accepted 24.10.2017

Corresponding author:

V. Shesterenko

E-mail:

shest.iren.co@ukr.net

ABSTRACT

Ways of increasing the effectiveness of reactive power compensation are examined in the article. The basic aspects of standardized methods power compensating devices choice, depending on the voltage and configuration of its individual elements are stated. The need to apply the power of higher harmonics filters with the non-sinusoidal ratio that is more than 8% is proved, which is typical for plants with thyristor converters. They are calculated from the calculated values of the non-sinusoidal ratio that is based on the composition and level of harmonics. Calculation of the filters should begin with the least harmonic filter. There is a need to check the admissibility of filter load with the electric current of corresponding harmonics. The total reactive power that is generated by the filters should be chosen from the condition of balance of reactive power.

DOI: 10.24263/2225-2924-2017-23-5-2-11

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

В.Є. Шестеренко, І.Є. Ізволєнський

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто шляхи підвищення ефективності компенсації реактивної потужності. Наведено основні аспекти нормативної методики вибору потужності компенсуючих пристроїв залежно від напруги мережі та конфігурації її окремих елементів. Підтверджено необхідність застосовувати силові фільтри вищих гармонік при коефіцієнті несинусоїдності більше 8%, що характерно для заводів з тиристорними перетворювачами. Останні розраховують за обчисленим значенням коефіцієнта несинусоїдності виходячи зі складу та рівня гармонік. Розрахунок фільтрів треба розпочинати з фільтра найменшої гармоніки. Необхідно перевірити допустимість завантаження фільтрів струмом відповідних гармонік. Сумарну реактивну потужність, що генерують фільтри, слід вибирати з умови балансу реактивної потужності.

Ключові слова: змінна напруга, вищі гармоніки, система електропостачання, реактивна потужність, компенсація.

Постановка проблеми. Критерієм раціонального вирішення задачі компенсації реактивної потужності є мінімум приведених витрат. Вони складаються з витрат на компенсуючі, регулюючі та супутні пристрої, а також з витрат на регулювання реактивної потужності та передачу її по елементах мережі.

Електростанції мають обмежені можливості генерування реактивної потужності. Таким чином, реактивну потужність, що передається до електроприймачів, необхідно знижувати (компенсувати) до економічно обґрунтованого рівня. 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; баланс реактивної потужності має бути втриманий для всіх вузлів системи електропостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературних джерелах розглядаються засоби оптимізації реактивної потужності на підприємствах [2; 3] та деякі шляхи подолання негативних явищ, спричинених надлишком реактивної потужності [5; 9; 10], надаються певні рекомендації щодо оптимізації режимів роботи джерел реактивної потужності [11—13].

У цій площині є цікавим розгляд впливу вищих гармонійних складових на пристрої систем компенсації.

Мета дослідження: визначення джерел вищих гармонік у системах електропостачання та їх впливу на роботу обладнання, надання рекомендацій щодо боротьби із шкідливими проявами впливу гармонійних складових.

Викладення основних результатів дослідження. Заходи щодо зниження реактивної потужності, що передається споживачам, можна поділити на дві групи: заходи, що не потребують додаткових капітальних вкладень і спрямовані на раціоналізацію режимів роботи електрообладнання у напрямку зменшення реактивних навантажень; заходи з додатковими капітальними вкладеннями, які полягають у встановленні спеціальних джерел реактивної потужності. Першочерговою при проектуванні є перша група заходів. Але її недостатні можливості вимагають застосування спеціальних пристроїв для компенсації. На промислових підприємствах використовують для компенсації реактивних навантажень конденсатори і синхронні двигуни. Найбільшого поширення дістали конденсатори. Невелика маса, відсутність частин, що обертаються, незначні втрати енергії, простота обслуговування, безпечність і надійність в експлуатації дають змогу використовувати конденсатори для компенсації реактивної потужності на всіх ступенях системи електропостачання.

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. Системам компенсації реактивної потужності підприємств притаманна ієрархічна структура та висока складність.

Напівпровідниковий перетворювач — це джерело вищих гармонік.

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 дає змогу застосувати гармонічний аналіз.

Порядок вищих гармонік визначається за формулою:

$$v = mk \pm 1,$$

де m — число фаз випрямлення; $k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ — послідовний ряд натуральних чисел.

Крім цих гармонік, виявлені «анормальні» гармоніки, парні та непарні. Поява таких гармонік пояснюється порушенням симетрії моментів відкривання окремих вентилів перетворювача внаслідок неякісного фазування їх по всіх каналах, а також унаслідок живлення пристроїв фазного управління несинусоїдальною, несиметричною та з коливаннями амплітуди напругою.

Для керованих випрямлячів зовнішня характеристика залежить від кута регулювання.

Вираз для періодичної функції струму перетворювача можна подати у такому вигляді:

$$I_v = \sqrt{(A_v)^2 + (B_v)^2},$$

де I — амплітуда струму гармоніки; A, B — коефіцієнти ряду Фур'є.

Таким чином, загальний вираз для коефіцієнтів ряду Фур'є вищих гармонік матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{2\sqrt{3} U_M}{v \pi X_a} \sin \frac{v \pi}{3} \left[\frac{1}{v+1} \sin(v+1) \frac{\gamma}{2} \cdot \right. \\ &\quad \cdot \sin(v+1) \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) - \frac{1}{v-1} \sin(v-1) \frac{\gamma}{2} \cdot \\ &\quad \left. \cdot \sin(v-1) \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right]; \\ B_v &= \frac{2\sqrt{3} U_M}{v \pi X_a} \sin \frac{v \pi}{3} \left[-\frac{1}{v+1} \sin(v+1) \frac{\gamma}{2} \cdot \right. \\ &\quad \cdot \sin(v+1) \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) + \frac{1}{v-1} \sin(v-1) \frac{\gamma}{2} \cdot \\ &\quad \left. \cdot \sin(v-1) \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right]. \end{aligned}$$

де U_M — амплітуда кривої напруги мережі живлення; X_a — індуктивний опір контура комутації.

Значення струмів вищих гармонік залежить від навантаження перетворювачів енергії, індуктивності електричної мережі в точці приєднання перетворювача, кута керування та кута комутації.

Початкові фази вищих гармонік визначають за формулою:

$$\phi_v = \arctg \left(\frac{B_v}{A_v} \right).$$

Якщо вважати, що комутація проходить по прямій, а форма струму близька до низки трапецій, то

$$I_v = \frac{I_1}{v} \left| \frac{\sin \frac{v\gamma}{2}}{\frac{v\gamma}{2}} \right|,$$

де I_1 — діюче значення першої гармоніки струму.

Для орієнтовних розрахунків можна користуватися виразом:

$$I_v = \frac{I_1}{v}.$$

Точність розрахунку різко зменшується із збільшенням кута комутації.

Фаза гармонік приблизно дорівнює:

$$\phi_v = \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) v.$$

Проведені дослідження показали, що в амплітудних спектрах струмів перетворювачів наявні як канонічні гармоніки (5, 7, 11, 13, 17, 19), так і неканонічні або аномальні гармоніки (2, 3, 4, 6, 8, 9). Основною причиною виникнення аномальних гармонік є асиметрія імпульсів керування. Амплітуди аномальних гармонік, як правило, незначні.

При коефіцієнті несинусоїдності меншому від 5% рекомендується застосовувати для компенсації батареї конденсаторів у комплекті із захисним реактором або фільтром. Потужність БК визначається з умов балансу реактивної потужності.

Напруга БК визначається за формулою:

$$U_{БК} = \frac{v_{\min}^2 U_{\text{НОМ}}}{(v_{\min}^2 - 1)},$$

де $U_{\text{НОМ}}$ — номінальна напруга мережі, в якій установлюється конденсатор, що захищається реактором; v_{\min} — мінімальний порядковий номер гармоніки.

У разі застосування БК з послідовно ввімкненим захисним реактором 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 визначається за формулою:

$$x_p \geq \frac{1,1 \cdot U_{\text{БК.НОМ}}}{(v^2 Q_{\text{БК.НОМ}})},$$

де $Q_{\text{БК.НОМ}}$ — реактивна сумарна потужність БК.

При коефіцієнті несинусоїдності 5% і більше рекомендується застосовувати силові фільтри вищих гармонік (далі — просто фільтри). Останні розраховують за обчисленим значенням $k_{\text{НС}}$, виходячи зі складу та рівня гармонік. Розрахунок фільтрів треба розпочинати з фільтра найменшої гармоніки.

Необхідно перевірити допустимість завантаження фільтрів струмом відповідних гармонік.

Сумарну реактивну потужність, що генерують фільтри, слід вибирати з умови балансу реактивної потужності.

Фільтри створюють короткозамкнутий шлях з малим опором для окремих вищих гармонік. Добротність визначає точність настроювання фільтра:

$$Q = \frac{x}{r},$$

де x — індуктивний (ємнісний) опір фільтра; r — активний опір фільтра.

Ступінь невідповідності настроювання фільтра характеризується коефіцієнтом δ , що враховує зміни частоти, відхилення ємності та індуктивності фільтра внаслідок старіння деталей фільтра та коливань температури, а також промислові допуски при виготовленні фільтра:

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_{\text{НОМ}})}{\omega_{\text{НОМ}}},$$

де $\omega_{\text{НОМ}}$ — частота настроювання.

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_{\text{НОМ}}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_{\text{НОМ}}} + \frac{\Delta C}{C_{\text{НОМ}}} \right).$$

Потужність фільтра визначається його реактивною потужністю на основній частоті і дорівнює неактивній потужності конденсаторів. Вибір фільтра здійснюється за критерієм, основанийому на гармоніках напруги.

Фільтр однієї частоти — це послідовне коло rLC , настроєне на частоту однієї гармоніки. Повний опір такого фільтра

$$z_{\phi} = r + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

на резонансній частоті $f_{\text{ЮМ}}$ зменшується до величини активного опору.

Кутова частота настроювання фільтра:

$$\omega = \omega_{\text{НОМ}} (1 + \delta),$$

де $\omega_{\text{НОМ}}$ — кутова частота настроювання фільтра.

Резонансний опір конденсатора чи котушки індуктивності визначається за формулами:

$$Q = \frac{x_o}{r};$$

$$x_o = \omega_{\text{НОМ}} L = \frac{1}{\omega_{\text{НОМ}} C} = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad C = \frac{1}{\omega_{\text{НОМ}} x_o} = \frac{1}{\omega_{\text{НОМ}} r Q}; \quad L = \frac{x_o}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{r Q}{\omega_{\text{НОМ}}}.$$

Повний опір фільтра:

$$z_{\phi} = r \left[1 + j Q \delta \left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right].$$

Або ж $z_{\phi} \approx r (1 + j 2 \delta Q) = x_o \left(\frac{1}{Q} + j 2 \delta \right).$

Розкривши значення x_o , одержимо

$$z_{\phi} \approx r \sqrt{(1 + 4 \delta^2 Q^2)}.$$

Розглянемо відповідні провідності фільтрів:

$$Y_{\phi} \approx \frac{1}{r (1 + j 2 \delta Q)} = G_{\phi} + j B_{\phi};$$

$$G_{\phi} = \frac{Q}{x_o (1 + 4 \delta^2 Q^2)}; \quad B_{\phi} = \frac{2 \delta Q^2}{x_o (1 + 4 \delta^2 Q^2)}.$$

Щоб зменшити рівень спотворення напруги, необхідно збільшити сумарну провідність кола — система живлення та фільтр.

Промисловість випускає фільтри з автоматичним настроюванням.

Напруга гармоніки:

$$U_v = \frac{I_v}{Y_v} = I_v \sqrt{\left\{ \left[G_{cv} + \frac{1}{r (1 + 4 \delta^2 Q^2)} \right]^2 + \left[B_{cv} - \frac{2 \delta Q}{r (1 + 4 \delta^2 Q^2)} \right]^2 \right\}}$$

Конденсатори можуть мати нижчу питому вартість, оскільки зменшуються вимоги до температурного коефіцієнта ємності. Добротність фільтра вища, і втрати енергії зменшуються.

Фільтр однієї частоти являє собою послідовне RLC-коло, налаштоване на частоту однієї гармоніки (зазвичай характеристичної гармоніки малого порядку).

Для оцінки максимального значення U_v необхідно встановити граничні значення величин, істинні значення яких точно невідомі: частотне відхилення δ і повна провідність мережі Y_{cv} . Оскільки зі зростанням δ напруга гармоніки збільшується, то для аналізу роботи фільтра має використовуватися найбільше очікуване значення відхилення частоти δ_m . До того ж необхідно врахувати найгірші характеристики системи — найменшу повну провідність.

На підставі цих граничних значень розробник може визначити Q і потужність фільтра ($B \cdot A$) на основній частоті.

Проте фільтри не завжди проектуються для забезпечення мінімуму напруги відповідної частоти. Зазвичай, максимальне значення Q вибирається з урахуванням використання фільтра для зниження втрат.

При розрахунку фільтра необхідно враховувати можливість виходу з ладу однієї або декількох фільтрових гілок. При цьому гілки фільтра, які залишились, можуть виявитися перевантаженими, тому що змушені пропускати всі струми гармонік, що генеруються перетворювачем.

Методику розрахунку фільтрів вищих гармонік рекомендується застосувати насамперед на цукрових заводах, оскільки велика потужність перетворювачів на цих заводах призводить до небажаного виходу з ладу електроприймачів.

Висновки

1. Напівпровідникові перетворювачі струму та частоти стали потужними генераторами вищих гармонік у системах електропостачання.

2. Вищі гармоніки негативно діють на всі види електрообладнання, навіть на значній відстані від місця генерації гармонік. Енергосистеми знімають з себе відповідальність за причини виникнення гармонік.

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

4. Вищі гармоніки негативно впливають на конденсатори. Рекомендується застосовувати для компенсації батареї конденсаторів у комплекті із захисним реактором при коефіцієнті несинусоїдності до 5%.

5. При коефіцієнті несинусоїдності 5% і більше рекомендується застосовувати силові фільтри вищих гармонік.

Література

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

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

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

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

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

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

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

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

9. Baljuta S., Shesterenko V., Mashchenko O. 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, pp. 30—35.

10. Шестеренко В.Є. Компенсація реактивної потужності як ефективний засіб зниження втрат електроенергії / В.Є. Шестеренко, І.Є. Изволенський // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2015. — Том 21, № 5. — С. 169—178.

11. Балюта С.М. Оптимальний режим роботи джерел реактивної потужності підприємства / С.М. Балюта, І.Є. Изволенський, В.Є. Шестеренко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2013. — № 51. — С.84—90.

12. Шестеренко В.Є. Електропостачання промислових підприємств / В.Є. Шестеренко, О.В. Шестеренко. — Київ : 2013. — 424 С.

13. Шестеренко В.Є. Підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в системах електропостачання / В.Є. Шестеренко, І.Є. Изволенський // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2017. —Том 23, № 2. — С. 140—146.