

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПРИМУСОВОЮ КОМУТАЦІЄЮ**

Літковець С. П.

Луцький національний технічний університет

*Розглядаються методи оптимізації режимів роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією, які забезпечують мінімум питомої споживаної активної потужності.*

**Постановка проблеми.** Під час розв'язання задач, пов'язаних з компенсацією реактивної потужності в мережах промислових підприємств визначається економічна доцільність використання статичних тиристорних компенсаторів (СТК) реактивної потужності. Для підвищення економічної ефективності використання цих джерел необхідно забезпечити мінімальну величину питомої споживаної активної потужності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Трансформаторну схему регулятора напруги з примусовою комутацією [1] можна використати в якості СТК реактивної потужності. Відомо [2], що у разі живлення цього СТК синусоїдною напругою при асинхронному керуванні реакторами (базовий варіант) питома споживана активна потужність не залежить від кута керування тиристорами, а тому зміною кутів керування тиристорами не вдається зменшити її величину.

**Мета статті** - оптимізація режимів роботи СТК реактивної потужності з примусовою комутацією у разі їх живлення напругами прямокутної форми за критерієм мінімуму величини питомої споживаної активної потужності.

**Основні матеріали дослідження.** Перспективним напрямком по оптимізації режимів роботи СТК з примусовою комутацією є його живлення напругою прямокутної форми за допомогою трансформатора з насиченою магнітною системою.

Проведемо розрахунок інтегральних показників енергетичного процесу для трансформаторної схеми СТК з примусовою комутацією при асинхронному керуванні, коли комутація фазних реакторів здійснюється незалежно один від одного. У разі, коли моменти вмикання та вимикання комутуючих тиристорів відносно точок природної комутації однакові, то процеси у колах фазних реакторів ідентичні. Тому достатньо визначити інтегральні показники енергетичного процесу тільки для однієї із фаз. В якості інтегральних показників енергетичного процесу доцільно використати реактивну потужність як інтегральну міру швидкості зміни напруги живлення у часі [3], а також споживану активну та питому споживану активну потужності [4].

Форми напруг та струмів на реакторах для однієї із фаз в СТК з примусовою комутацією в разі їх живлення напругою прямокутної форми для двох стратегій керування тиристорами наведені на рис. 1, а, б, в.

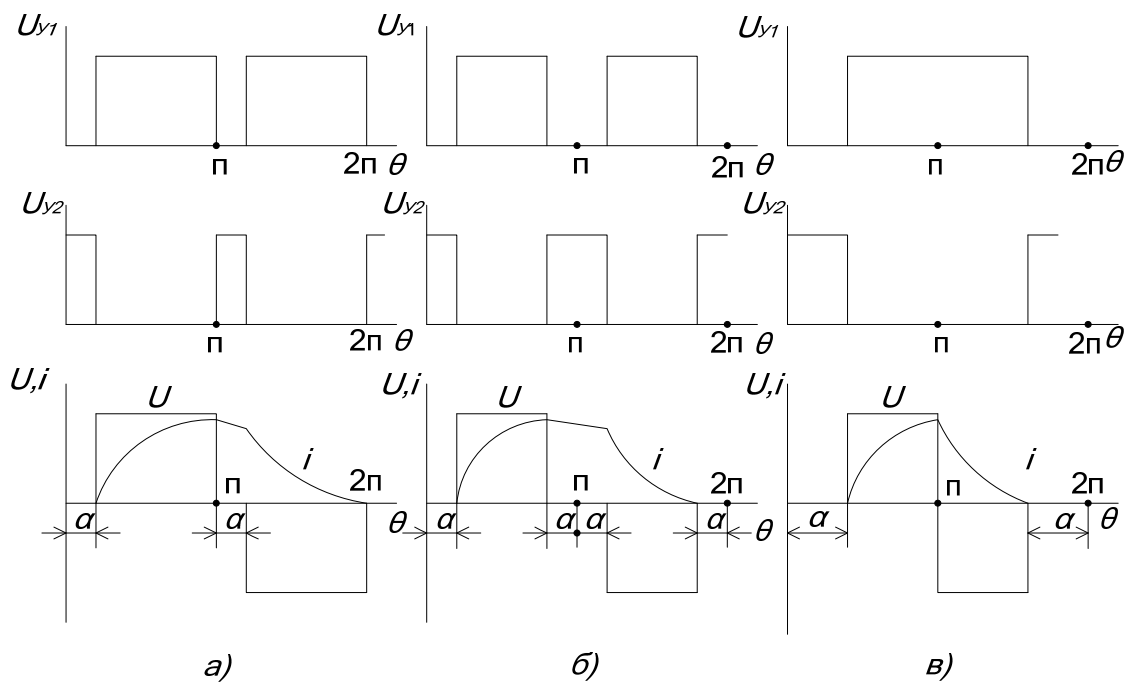


Рисунок 1 – Форми напруг та струмів на навантаженні в СТК з примусовою комутацією: а – регулювання зі зсувом за основною гармонікою; б, в – регулювання без зсуву за основною гармонікою

Для розглянутих стратегій керування тиристорами можна виділити три ділянки, на яких закон зміни струму через фазний реактор буде різним. Узагальнене рівняння електричної рівноваги кола буде мати вигляд:

$$x_{|2-n|} \frac{di_n(\theta)}{dt} + r_{|2-n|} i_n(\theta) = (2-n)U_m, \quad (1)$$

де  $n = 1, 2, 3$  – номер ділянки;

$U_m$  – амплітудне значення напруги;

$\theta = \omega t$  – час у відносних одиницях;

$\omega$  – колова частота;

$r_1 = r_2 + r_p$ ,  $x_1 = x_2 + x_p$ ,  $r_0 = r_p$ ,  $x_0 = x_p$ ;

$r_2$  та  $x_2$  – відповідно, активний та реактивний опори вторинної обмотки трансформатора;

$r_p$  та  $x_p$  – відповідно, активний та реактивний опори фазного реактора.

Із цього рівняння випливає, що на першій та третій ділянках, коли вторинні обмотки трансформатора підключаються до фазних реакторів, активно-індуктивний опір кожної із фаз є сумою активно-індуктивних опорів вторинної обмотки трансформатора та фазних реакторів. На другій ділянці, коли вторинні обмотки трансформатора відключаються від фазних реакторів, активно-індуктивний опір кожної із фаз визначається тільки активно-індуктивними опорами фазних реакторів.

При регулюванні зі зсувом за основною гармонікою (рис. 1,а) на першій ділянці  $\alpha \leq \theta \leq \pi$  до сумарного активно-індуктивного опору вторинної обмотки трансформатора і фазного реактора прикладена напруга  $U_m$ . На другій ділянці  $\pi \leq \theta \leq \pi + \alpha$  напруга відсутня. На третій ділянці  $\pi + \alpha \leq \theta \leq \theta_0$  до сумарного активно-індуктивного опору вторинної обмотки трансформатора і фазного реактора прикладена напруга  $-U_m$ . З врахуванням початкових умов струми на відповідних ділянках будуть мати вигляд:

$$i_1(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} [1 - e^{\rho_1(\alpha - \theta)}], \quad (2)$$

$$i_2(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} [1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}] e^{\rho_1(\pi - \theta)}, \quad (3)$$

$$i_3(\theta) = -\frac{I_m}{\rho_1} + \frac{I_m}{\rho_1} [1 + (1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}) e^{-\rho_1 \alpha}] e^{\rho_1(\pi + \alpha - \theta)}, \quad (4)$$

де  $\rho_1 = \frac{r_1}{x_1}$ ,  $\rho_0 = \frac{r_0}{x_0}$ ,  $I_m = \frac{U_m}{x_1}$  – амплітудне значення струму.

Величина реактивної і споживаної активної потужності у відносних одиницях:

$$Q^*(\alpha) = \frac{2Q}{U_m I_m} =$$

$$= \frac{1}{\pi \rho_1} [1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)} + e^{-\rho_1 \alpha} - e^{((\rho_1 - \rho_0)\alpha - \rho_1 \pi)}], \quad (5)$$

$$P^*(\alpha) = \frac{2P}{U_m I_m} = \frac{1}{\pi \rho_1} \left[ \pi - \alpha + \frac{1}{\rho_1} e^{\rho_1(\alpha - \pi)} + \frac{1}{\rho_1} \ln(1 + (1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}) e^{-\rho_1 \alpha}) - \frac{1}{\rho_1} (1 + (1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}) e^{-\rho_1 \alpha}) \right], \quad (6)$$

де  $i_1^*(\theta) = \frac{i_1(\theta)}{I_m}$ ,  $i_2^*(\theta) = \frac{i_2(\theta)}{I_m}$ ,  $u^*(\theta) = \frac{u(\theta)}{U_m}$  – відповідно, струми та напруга у відносних одиницях.

Для двох варіантів регулювання реактивної потужності без зсуву за основною гармонікою на першій ділянці буде протікати той самий струм, що й при регулюванні зі зсувом за основною гармонікою. Для першого варіанту (рис.1,б) на другій та третій ділянці протікають такі струми:

$$i_2(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} [1 - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)}] e^{\rho_1(\pi - \alpha - \theta)}, \quad (7)$$

$$i_3(\theta) = -\frac{I_m}{\rho_1} + \frac{I_m}{\rho_1} [1 + (1 - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)}) e^{-2\rho_1 \alpha}] e^{\rho_1(\pi + \alpha - \theta)}. \quad (8)$$

Величини реактивної і споживаної активної потужності в цьому випадку будуть складати:

$$Q^*(\alpha) = \frac{1}{\pi \rho_1} [1 - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)} + e^{-2\rho_1 \alpha} - e^{(2(\rho_1 - \rho_0)\alpha - \rho_1 \pi)}], \quad (9)$$

$$P^*(\alpha) = \frac{1}{\pi \rho_1} \left[ \pi - 2\alpha + \frac{1}{\rho_1} e^{\rho_1(2\alpha - \pi)} + \frac{1}{\rho_1} \ln(1 + (1 - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)}) e^{-2\rho_1 \alpha}) - \frac{1}{\rho_1} (1 + (1 - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)}) e^{-2\rho_1 \alpha}) \right]. \quad (10)$$

Для іншого варіанту (рис. 1, в) на другій ділянці протікає струм рівний:

$$i_2(\theta) = -\frac{I_m}{\rho_1} + \frac{I_m}{\rho_1} [2 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}] e^{\rho_1(\pi - \theta)}. \quad (11)$$

Величина реактивної і споживаної активної потужності у відносних одиницях:

$$Q^*(\alpha) = \frac{2}{\pi \rho_1} [1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}], \quad (12)$$

$$P^*(\alpha) = \frac{1}{\pi \rho_1} \left[ \pi - \alpha + \frac{1}{\rho_1} \ln(2 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}) - \frac{2}{\rho_1} (1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}) \right]. \quad (13)$$

Для конфігурації СТК з примусовою комутацією: трансформатор ТРДН-25000/110-76У1 з  $r_2 = 0,0185 \text{ Ом}$  та  $x_2 = 0,4052 \text{ Ом}$ , реактор РКOC-3900/10-У1 з  $r_p = 0,055 \text{ Ом}$  та  $x_p = 31,3 \text{ Ом}$  на рис. 2, а, б, в наведені інтегральні показники енергетичного процесу для двох стратегій керування реактивною потужністю.

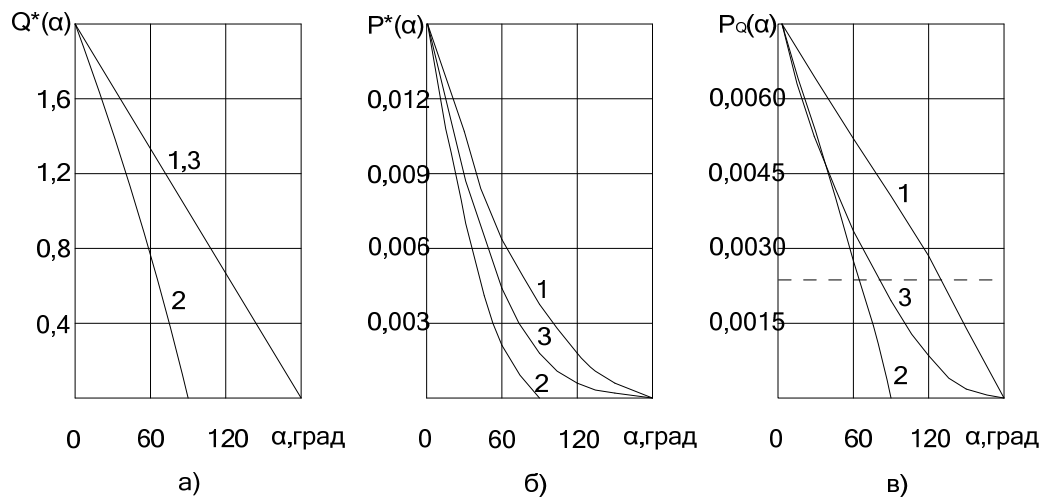


Рисунок 2 – Інтегральні показники енергетичного процесу для СТК з примусовою комутацією: 1 – зі зсувом за основною гармонікою; 2,3 – без зсуву за основною гармонікою

**Висновки.** Величина реактивної потужності СТК при його живленні напругою прямокутної форми незалежно від способу регулювання практично лінійно залежить від кута керування тиристорами  $\alpha$  (рис. 2, а). Це дозволяє спростити систему керування тиристорами СТК.

При збільшенні кута керування тиристорами  $\alpha$  величина питомої споживаної активної потужності  $P_Q(\alpha)$  зменшується (рис. 2, в). При певних значеннях кута  $\alpha$  в залежності від стратегії керування ця величина стає меншою однойменної величини базового варіанта  $P_{Q_{баз}}(\alpha) = 2,318 \cdot 10^{-3}$ , яка на рис. 2, в показана пунктирною лінією. В цих умовах СТК з примусовою комутацією при його живленні напругою прямокутної форми витрачає на генерування реактивної потужності менше питомої споживаної активної потужності в порівнянні з базовим варіантом, що підвищує економічну ефективність використання СТК як джерела реактивної потужності і дозволяє реалізувати енергозберігаючі технології керування його режимами роботи. Найбільш вагомим результатом може дати використання регулювання СТК без зсуву за основною гармонікою за другим варіантом (крива 3 на рис. 2, в), оскільки воно має найбільший діапазон зміни кута керування тиристорами  $\alpha$ .

#### Список використаних джерел

1. Руденко В. С. Преобразовательная техника / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чижено. – К.: Вища школа, 1978. – 422 с.
2. Петухов М. В. Інтегральні показники енергетичного процесу статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією / М. В. Петухов, С. П. Літковець // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: матеріали III-ї міжнародної науково-технічної конференції. – Луцьк, 2010. – С. 151-153.

3. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

4. Грицюк Ю. В. Оптимізація режимів роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх живленні напругами полігональної форми за критерієм мінімуму питомої споживаної активної потужності / Ю. В. Грицюк, М. В. Петухов, Б. С. Рогальський [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №2. – С. 46-55.

#### Аннотация

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИЕЙ

Литковец С. П.

*Рассматриваются методы оптимизации режимов работы статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности с принудительной коммутацией, которые обеспечивают минимум удельной потребляемой активной мощности.*

#### Abstract

### OPTIMIZE OF OPERATION MODE OF STATIC THYRISTOR COMPENSATORS OF REACTIVE POWER WITH THE FORCED COMMUTATION

S. Litkovets

*The article deals with methods of optimizing of operation mode of static thyristor compensators of reactive power with the forced commutation that provide minimum of specific consumed active power.*