

УДК 621.315.1.024:621.311.6

С.П. Літковець, М.В. Петухов

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## **ГЛОБАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В АСИНХРОННИХ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ КОМПЕНСАТОРАХ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПРИМУСОВОЮ КОМУТАЦІЄЮ**

*Розглянуто визначення умов, за якими можливе глобальне керування енергетичними процесами в асинхронному статичному тиристорному компенсаторі реактивної потужності з примусовою комутацією за критерієм мінімуму питомої споживаної активної потужності.*

*Ключові слова: глобальне керування, статичні компенсатори, примусова комутація, енергоощадні технології, мінімізація.*

*Рассмотрено определение условий, при которых возможно глобальное управление энергетическими процессами в асинхронном статическом тиристорном компенсаторе реактивной мощности с принудительной коммутацией по критерию минимума удельной потребляемой активной мощности.*

*Ключевые слова: глобальное управление, статические компенсаторы, принудительная коммутация, энергосберегающие технологии, минимизация.*

*Definition of terms, which can control global energy processes in asynchronous static thyristor compensators of reactive power with forced commutation by the criterion of minimum of specific consumption of active power is considered.*

*Key words: global control, static compensators, forced commutation, power saving technologies, minimization.*

**Вступ.** Статичні тиристорні компенсатори (СТК) реактивної потужності повинні мати широкий діапазон регулювання реактивної потужності, велику швидкодію, мале споживання активної потужності під час керування реактивною потужністю, декілька каналів регулювання реактивної потужності, а також забезпечувати різні способи керування тиристорами. Одним з перспективних напрямків вирішення цих проблем є застосування СТК з примусовою комутацією. Застосування СТК з примусовою комутацією дозволяє покращити інтегральні показники енергетичного процесу та одержати на навантаженні різні форми напруги.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [1] було запропоновано для деяких стратегій керування тиристорами в якості СТК реактивної потужності використати трифазні регулятори напруги з примусовою комутацією, схеми яких наведені у роботі [2]. Суттєвим недоліком цих схем є синхронна комутація фазних реакторів, оскільки вторинні обмотки живлячого трансформатора одночасно підключаються до навантаження. У цьому випадку квазіусталений режим роботи схеми настає за час більший ніж період живлячої напруги, що призводить до зменшення швидкодії статичного компенсатора. Крім того, у разі живлення СТК з примусовою комутацією синусоїдною напругою питома споживана активна потужність не залежить від кута керування комутуючих тиристорів, що не дозволяє реалізувати енергоощадні технології керування статичним компенсатором. В роботах [3,4] було запропоновано формувати на вторинних обмотках трифазного живлячого

трансформатора напругу прямокутної форми за рахунок насиченої магнітної системи та використати асинхронну комутацію фазних реакторів, коли вторинні обмотки трансформатора підключаються до навантаження незалежно одна від одної. Це дозволило значно покращити енергетичні процеси в СТК з примусовою комутацією та запровадити енергоощадні технології керування реактивною потужністю. Однак, через залежне керування комутуючими тиристорами обмежується функціональність СТК, зменшується кількість можливих способів керування ними та стає неможливим глобальне керування енергетичними процесами в статичних компенсаторах.

**Мета статті.** Метою статті є визначення умов за якими можливе глобальне керування енергетичними процесами в асинхронних статичних тиристорних компенсаторах реактивної потужності з примусовою комутацією у разі незалежного керування комутуючими тиристорами.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Енергетичні процеси в асинхронному СТК реактивної потужності з примусовою комутацією можна охарактеризувати інтегральними показниками. В якості цих показників доцільно використати реактивну потужність як інтегральну міру швидкості зміни напруги живлення у часі:

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \int i du = -\frac{1}{2\pi} \int_0^T i \frac{du}{dt} dt, \quad (1)$$

де  $i$  та  $u$  – миттєві значення струму і напруги, а також споживану активну  $P$  та питому споживану активну потужності  $P_Q$  [3]:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^T u i dt, \quad (2)$$

$$P_Q = \frac{P}{Q}, \quad (3)$$

які довели свою ефективність у подібних задачах.

При незалежному керуванні комутуючими тиристорами їх вмикання та вимикання здійснюється незалежно один від одного у довільні моменти  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  (рис.1). Лише кут вимкнення  $\alpha_B$  є функцією зазначених вище кутів.

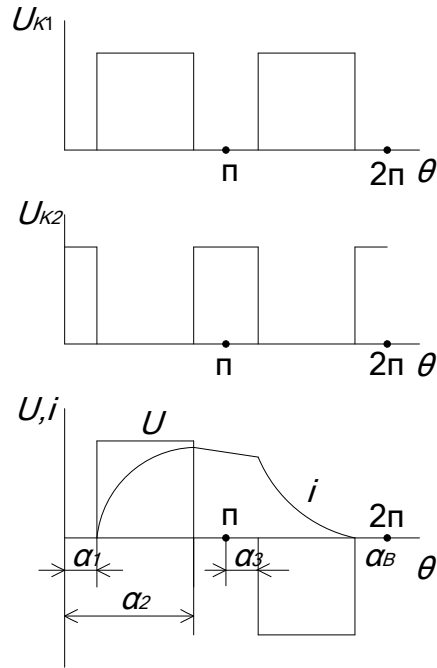


Рис.1. Форми напруг та струмів на навантаженні в СТК з примусовою комутацією при незалежному керуванні комутуючими тиристорами

Із рис.1 випливає, що на ділянках від  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$  та  $\pi + \alpha_3$  до  $\alpha_B$  вторинна обмотка трансформатора підключається до фазного реактора, а на ділянці від  $\alpha_2$  до  $\pi + \alpha_3$  фазний реактор замикається на коротко, що забезпечує неперервність струму через нього. Заступні схеми, які характеризують цей алгоритм наведені на рис.2,а,б.

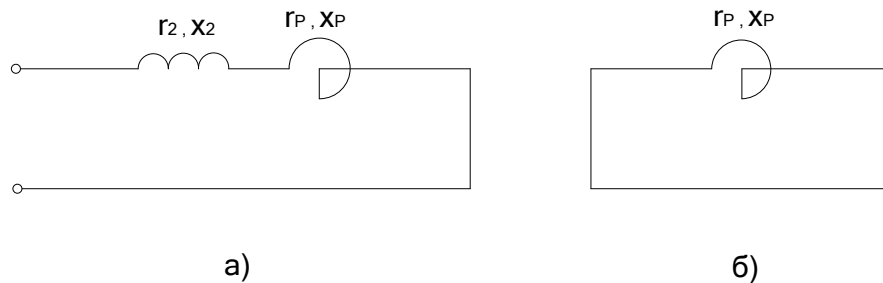


Рис.2. Заступні схеми для різних ділянок роботи асинхронного СТК з примусовою комутацією

Відповідно до рис.1 та рис.2 можна виділити три ділянки, на яких закон зміни струму через фазний реактор буде різним. Ці струми можна визначити на підставі узагальненого рівняння електричної рівноваги кола:

$$x_{|2-n|} \frac{di_n(\theta)}{dt} + r_{|2-n|} i_n(\theta) = (2-n)U_m, \quad (4)$$

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.

При незалежному керуванні комутуючими тиристорами на ділянці  $\alpha_1 \leq \theta \leq \alpha_2$  до сумарного активно-індуктивного опору вторинної обмотки трансформатора і фазного реактора прикладена напруга  $U_m$ . На ділянці  $\alpha_2 \leq \theta \leq \pi + \alpha_3$  напруга відсутня. На ділянці  $\pi + \alpha_3 \leq \theta \leq \theta_B$  до сумарного активно-індуктивного опору вторинної обмотки трансформатора і фазного реактора прикладена напруга  $-U_m$ . З врахуванням рівняння (4) та початкових умов струми на відповідних ділянках матимуть вигляд:

$$i_1(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} \left[ 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \theta)} \right], \quad (5)$$

$$i_2(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} \left( 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \theta)}, \quad (6)$$

$$i_3(\theta) = -\frac{I_m}{\rho_1} + \frac{I_m}{\rho_1} \left[ 1 + \left( 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} \right] e^{\rho_1(\pi + \alpha_3 - \theta)}, \quad (7)$$

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

Прирівнюючи струм  $i_3(\theta)$  до нуля, одержимо кут вимкнення:

$$\theta_B = \pi + \alpha_3 + \frac{1}{\rho_1} \ln \left[ 1 + \left( 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} \right]. \quad (8)$$

Величина реактивної та споживаної активної потужності у відносних одиницях з врахуванням виразів (1), (2), (5) – (8) будуть дорівнювати відповідно:

$$\begin{aligned} Q_*(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) &= \frac{2Q}{U_m I_m} = -\frac{1}{\pi} \left[ -\frac{1}{\rho_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} i_{*1}(\theta) \delta(\theta - \alpha_2) d\theta - \frac{1}{\rho_1} \int_{\pi + \alpha_3}^{\theta_B} i_{*3}(\theta) \delta(\theta - \pi - \alpha_3) d\theta \right] = \\ &= \frac{1}{\rho_1 \pi} \left[ 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} + \left( 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} \right], \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_*(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) &= \frac{2P}{U_m I_m} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{\rho_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} i_{*1}(\theta) u_*(\theta) d\theta + \frac{1}{\rho_1} \int_{\pi + \alpha_3}^{\theta_B} i_{*3}(\theta) u_*(\theta) d\theta \right\} = \\ &= \frac{1}{\rho_1 \pi} \left\{ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[ 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \theta)} \right] d\theta - \int_{\pi + \alpha_3}^{\theta_B} \left[ -1 + \left( 1 + \left( 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} \right) e^{\rho_1(\pi + \alpha_3 - \theta)} \right] d\theta \right\} = \\ &= \frac{1}{\rho_1 \pi} \left[ \alpha_2 - \alpha_1 + \frac{1}{\rho_1} e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} - \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_1} \ln \left( 1 + \left( 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\rho_1} \left( 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} \right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} \right], \quad (10) \end{aligned}$$

де  $i_{*1}(\theta) = \frac{i_1(\theta)}{I_m}$ ,  $i_{*3}(\theta) = \frac{i_3(\theta)}{I_m}$ ,  $u_*(\theta) = \frac{u(\theta)}{U_m}$  – відповідно, струми та напруга у відносних одиницях;  $\delta(\theta - \alpha_2)$ ,  $\delta(\theta - \pi - \alpha_3)$  - зміщені дельта-функції Дірака.

Із виразів (9) та (10) випливає, що інтегральні показники енергетичного процесу  $Q_*$  й  $P_*$  є функціями від скалярної множини кутів керування  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Тому, за допомогою цих

показників можна оцінити ефективність енергетичних процесів асинхронних СТК з примусовою комутацією для будь-яких способів їх керування. Наприклад, виходячи з нерівності:

$$P_Q = \frac{P_*(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)}{Q_*(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)} \leq \rho_1, \quad (11)$$

можна знайти скалярну множину кутів керування  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , яка мінімізує величину питомої активної споживаної потужності (3) під час керування реактивною потужністю асинхронного СТК з примусовою комутацією і, тим самим, дозволяє реалізувати енергоощадні технології керування. Підставляючи у вираз (11) формули (9) та (10), одержимо трансцендентну нерівність:

$$\begin{aligned} \rho_1(\alpha_2 - \alpha_1) - (1 + \rho_1^2) \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right) + \ln \left(1 + \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)}\right) - \\ - (1 + \rho_1^2) \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} \leq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Для конфігурації СТК з примусовою комутацією, яка наведена в роботі [4], питомі опори  $\rho_0$  та  $\rho_1$  відповідно дорівнюють:  $\rho_0 = 1,757 \cdot 10^{-3}$ ,  $\rho_1 = 2,318 \cdot 10^{-3}$ . В найгіршому випадку, коли  $\alpha_1 - \alpha_2 = -\pi$  та  $\alpha_2 - \alpha_3 = \pi$ , маємо  $1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)} = 1 - e^{-2,318 \cdot 10^{-3} \cdot \pi} = 7,2557607 \cdot 10^{-3}$ ,  $e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} = e^{1,757 \cdot 10^{-3} \cdot 0} = 1$ . Оскільки  $\left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} = 7,2557607 \cdot 10^{-3} \ll 1$ , то логарифмічну функцію в (12) можна наблизити з похибкою  $1,75171 \cdot 10^{-3}\%$  таким чином:

$$\ln \left(1 + \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)}\right) \approx \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} - \frac{1}{2} \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right)^2 e^{2\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)}.$$

З врахуванням цього наближення вираз (12) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \rho_1(\alpha_2 - \alpha_1) - (1 + \rho_1^2) \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right) - \rho_1^2 \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right) e^{\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} - \\ - \frac{1}{2} \left(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}\right)^2 e^{2\rho_2(\alpha_2 - \pi - \alpha_3)} \leq 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Розв'язуючи нерівність (13) відносно кута  $\alpha_3$ , одержимо:

$$\alpha_3 \leq \alpha_2 - \pi - \frac{1}{\rho_2} \ln \left( \sqrt{\left[ \frac{\rho_1^2}{1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}} \right]^2 - \frac{2(1 + \rho_1^2)}{1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}} + \frac{2\rho_1(\alpha_2 - \alpha_1)}{(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)})^2}} - \frac{\rho_1^2}{1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}} \right). \quad (14)$$

В реальних умовах керування кут  $\alpha_3$  знаходиться у межах від 0 до  $\pi$ , тобто є позитивною величиною. Тому необхідно так керувати кутами  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ , щоб аргумент логарифмічної функції в формулі (14) був менший за одиницю:

$$-\frac{\rho_1^2}{1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}} + \sqrt{\left[ \frac{\rho_1^2}{1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}} \right]^2 - \frac{2(1 + \rho_1^2)}{1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)}} + \frac{2\rho_1(\alpha_2 - \alpha_1)}{(1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \alpha_2)})^2}} < 1. \quad (15)$$

В тривимірному просторі координат  $\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$  співвідношення (14) визначає певну граничну поверхню, нижче якої знаходиться скалярна множина кутів керування комутуючими тиристорами, що забезпечує мінімізацію величини питомої споживаної активної потужності й, тим самим, дозволяє реалізувати енергоощадні технології керування асинхронним СТК з примусовою комутацією. Водночас у разі глобального керування енергетичними процесами, коли змінюються всі кути керування комутуючими тиристорами, можна вирішувати певні локальні завдання, наприклад, забезпечити виконання нерівності (15).

### **Висновки**

Під час аналізу інтегральних показників енергетичних процесів в асинхронному СТК реактивної потужності з примусовою комутацією у разі незалежного керування комутуючими тиристорами визначені умови за якими можливе глобальне керування енергетичними процесами за критерієм мінімуму величини питомої споживаної активної потужності. Ці умови визначають скалярну множину кутів керування комутуючими тиристорами, яка дозволяє реалізувати енергоощадні технології керування асинхронного СТК з примусовою комутацією. Крім того, під час глобального керування енергетичними процесами можна вирішувати інші локальні завдання.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. 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.
2. Руденко В.С. Преобразовательная техника / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – К.: Вища школа, 1978. – 422 с.
3. Петухов М.В. Енергоощадні технології керування режимами роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією / М.В.Петухов, С.П.Літковець // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 (14) - с. 72-76.
4. Літковець С.П. Оптимізація режимів роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності з примусовою комутацією / С.П. Літковець // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 117 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2011. – с. 158-160.