

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПРОЦЕСУ СТАТИЧНОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЮ

YE. SHTOGRIN, YU. HRYSIUK, V. DENISOVEC

MODELING OF POWER PROCESS OF THE STATIC THYRISTOR COMPENSATOR OF THE REACTIVE POWER WITH ISOLATED NEUTRAL

Анотація. Визначено показники енергетичного процесу статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності за умови живлення його синусоїдальною напругою. Дослідження енергетичного процесу проведено для трьох характерних режимів комутації тиристорів. Представлено відповідну діаграму роботи тиристорів компенсатора. Враховано вплив симетричного та несиметричного керування тиристорами. В процесі дослідження використані інтегральні методи розрахунку. Отримано вирази для визначення реактивної потужності, активної потужності та питомого значення активної потужності у відносних одиницях. Побудовано відповідні графіки. Проведено аналіз графіків. Встановлено, як кут керування тиристорами впливає на показники енергетичного процесу. Створено передумови для подальших досліджень у даній області.

Ключові слова: реактивна потужність, компенсатор, показники енергетичного процесу, кут керування.

Аннотация. Определены показатели энергетического процесса статического тиристорного компенсатора реактивной мощности при условии питания его синусоидальным напряжением. Исследование энергетического процесса проведено для трех характерных режимов коммутации тиристоров. Представлена соответствующая диаграмма работы тиристоров компенсатора. Учтено влияние симметричного и несимметричного управления тиристорами. В процессе исследования использованы интегральные методы расчета. Получены выражения для определения реактивной мощности, активной мощности и удельного значения активной мощности в относительных единицах. Построены соответствующие графики. Проведен анализ графиков. Установлено как угол управления тиристорами влияет на показатели энергетического процесса. Созданы предпосылки для последующих исследований в данной области.

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсатор, показатели энергетического процесса, угол управления.

Annotation. The indexes of power process of static thyristor compensator of reactive power are certain on condition of feed of him by sinusoidal tension. Research of power process is conducted for three characteristic modes of commutation of thyristors. The proper diagram of work of thyristors of compensate is presented. Influencing of symmetric and asymmetrical management of thyristors is taken into account. In the process of research the integral methods of calculation are used. Expressions are got for determination of reactive power, active power and specific value of active power in relative units. The proper graphic arts are built. The analysis of the graphs is conducted. It is set as a corner of management of thyristors influences on the indexes of power process. Pre-conditions are created for subsequent researches in this area.

Key words: reactive power, compensate, indexes of power process, management corner.

Вступ

Світовий досвід застосування статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності (СТК) для оптимізації режимів електричних мереж, а також для підвищення якості електричної енергії свідчить про їх значну ефективність. Звичайно для отримання максимальної ефективності кожен випадок встановлення СТК вимагає досконалого обґрунтування з різних точок зору, зокрема й економічної.

Бажаними характеристиками СТК є швидкодія, достатній регульовальний діапазон, мінімальне споживання активної потужності а також можливість забезпечення багаторежимного функціонування.

Найбільш актуальним завданням є мінімізація споживання активної потужності СТК у разі

генерування реактивної.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередні дослідження проводились для СТК із глухозаземленою нейтраллю і викладені в роботі [1]. Інтегральні показники енергетичного процесу визначались для режимів живлення СТК синусоїдною напругою та полігональними напругами. Результати досліджень продемонстрували очевидні переваги функціонування СТК, що живиться прямокутною або пилкоподібною напругою. За таких умов значно зменшується споживання активної потужності та досягається багаторежимність під час достатньо широкого діапазону регулювання реактивної потужності.

Метою публікації є створення математичної моделі СТК з ізольованою нейтраллю, визначення показників енергетичного процесу та їх ґрунтовний аналіз. Результати, як базову модель, передбачається застосовувати в дослідженнях режимів роботи СТК із ізольованою нейтраллю у разі, коли напруга живлення має полігональну форму.

Основні матеріали та дослідження. В СТК з ізольованою нейтраллю робота всіх фаз взаємозв'язана і для протікання струму через фазний реактор необхідне одночасне відкриття тиристорів у двох або трьох фазах.

Розглянемо роботу СТК з ізольованою нейтраллю, коли навантаження активно-індуктивне. Фазну напругу мережі можна записати у вигляді:

$$u_a = U_m \sin \theta; u_b = U_m \sin(\theta - 2\pi/3); u_c = U_m \sin(\theta + 2\pi/3),$$

де $U_m = \sqrt{2}U_\phi; \theta = \omega t$.

Форма і величина напруг у фазах навантаження залежать від кута керування тиристорами α та кута зсуву фаз навантаження $\varphi = \arctg(1/\rho)$, де $\rho = r/\omega L = r/x$ та є ідентичними для всіх фаз. Тому можна досліджувати вид напруги для однієї із фаз навантаження.

В процесі аналізу всі можливі варіанти комутації фази А можна розбити на три характерних режими залежно від співвідношення α та φ (рис. 1).

Коли $\alpha < \varphi$, через фазний реактор протікає неперервний синусоїдний струм, оскільки під час цього кожна пара тиристорів незалежно комутує фазну напругу. В цьому випадку тривалість протікання струму через кожен тиристор $\lambda = \pi$ і фазна напруга $u'_a = u_a$.

Коли $\alpha < \varphi < \alpha_{zp} = \arctg \frac{2}{\sqrt{3}} \left(e^{-\frac{\pi}{3 \operatorname{tg} \varphi}} - \frac{1}{2} \right) + \varphi$, де α_{zp} – граничний кут відкриття тиристорів, що

розділяє можливі режими, то за півперіод крива фазної напруги u_a має шість ділянок. В цьому випадку на трьох ділянках $u'_a = u_a$, оскільки відкриті тиристири всіх фаз; на двох ділянках $u'_a = 0,5u_{ab}$ або $0,5u_{ac}$, так як відкриті тиристири в двох фазах; на одній із ділянок $u'_a = 0$, оскільки закриті тиристири всіх фаз.

Коли $\alpha_{zp} < \alpha < 150^\circ$, немає інтервалів одночасної роботи тиристорів всіх трьох фаз. У цьому разі на двох ділянках $u'_a = 0,5u_{ab}$ або $0,5u_{ac}$, а на двох інших $u'_a = 0$.

Для визначення закону зміни струму в другому режимі на всіх інтервалах необхідно скласти і розв'язати диференціальні рівняння:

для відкритих тиристорів всіх трьох фаз :

$$u'_a = U_m \sin \theta = x \frac{di}{d\theta} + ri; \quad (1)$$

для відкритих тиристорів у фазах А і В :

$$u'_a = \frac{u_{ab}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin(\theta + \frac{\pi}{6}) = x \frac{di}{d\theta} + ri; \quad (2)$$

для відкритих тиристорів у фазах А і С :

$$u'_a = \frac{u_{ac}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin(\theta - \frac{\pi}{6}) = x \frac{di}{d\theta} + ri; \quad (3)$$

для закритих тиристорів у фазі А :

$$u'_a = 0. \quad (4)$$

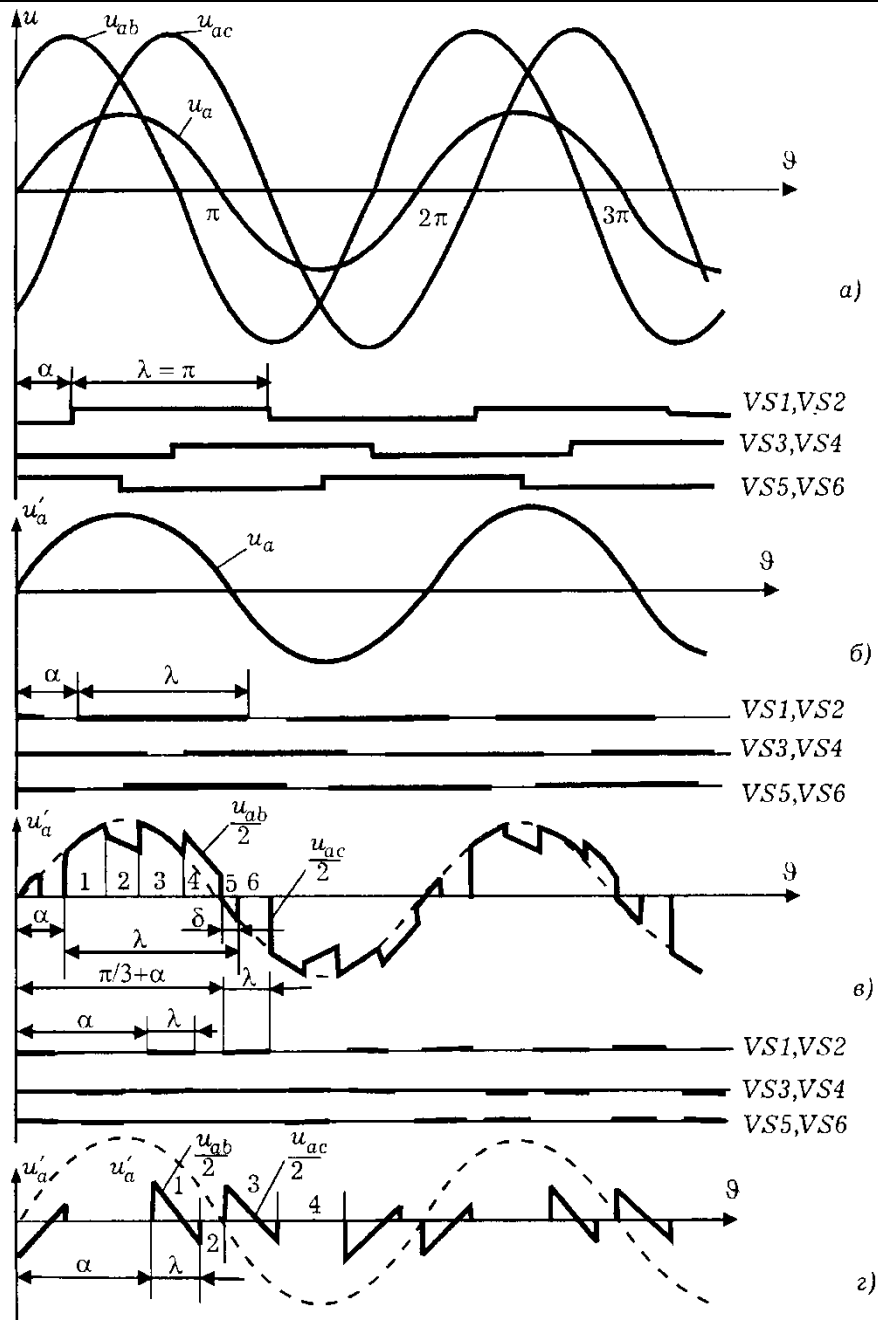


Рис. 1. Діаграми роботи тиристорів СТК з ізольованою нейтраллю та форма напруги у разі активно-індуктивного навантаження

Розв’язок цих рівнянь можна записати для будь-якої ділянки в загальному вигляді:

$$i_n = \frac{K_n I_n}{\sqrt{1 + \rho^2}} \sin(\theta - \varphi + \beta) + A e^{-\rho(\theta - \alpha_n)} \tag{5}$$

де n - номер ділянки;

A - стала інтегрування;

$K_n = 1$ або $K_n = \sqrt{3} / 2$;

β - кут, який дорівнює $+\pi / 6$; $-\pi / 6$; α_n - початкове значення θ на n -й ділянці.

Сталу інтегрування можна знайти із виразу (5), враховуючи, що початкове значення струму на n -й ділянці дорівнює кінцевому значенню струму на $(n - 1)$ -й ділянці, тобто $i_{nn} = i_{(n-1)k}$

$$A = i_{(n-1)k} - \frac{K_n I_m}{\sqrt{1+\rho^2}} \sin(\alpha_n - \varphi + \beta). \quad (6)$$

Для визначення закону зміни струму в третьому режимі на всіх інтервалах необхідно скласти та розв'язати диференційні рівняння (1), (2) та (3).

Для симетричного режиму роботи в діапазоні кутів керування тиристорами $\varphi \leq \alpha \leq \alpha_{cp}$ величина споживаної реактивної потужності у відносних одиницях дорівнює:

$$Q_{*сим} = \frac{1}{\pi\sqrt{1+\rho^2}} \sin \varphi \left[\frac{1}{2}(\pi - 3\alpha + 3\varphi) - \frac{3}{4} \sin(2\alpha - 2\varphi) \right], \quad (7)$$

Величина споживаної активної потужності в СТК

$$P_{*сим} = \frac{1}{\pi\sqrt{1+\rho^2}} \cos \varphi \left[\frac{1}{2}(\pi - 3\alpha + 3\varphi) - \frac{3}{4} \sin(2\alpha - 2\varphi) \right]. \quad (8)$$

У діапазоні кутів керування тиристорами $\alpha_{cp} \leq \alpha \leq 5\pi/6$ інтегральні показники енергетичного процесу в СТК, відповідно, дорівнюють

$$Q_{*сим} = \frac{1}{\pi\sqrt{1+\rho^2}} \sin \varphi \left[\frac{1}{2}(\pi - 3\alpha + 3\varphi) - \frac{3}{4} \sin(2\alpha - 2\varphi + \frac{\pi}{3}) \right], \quad (9)$$

$$P_{*сим} = \frac{1}{\pi\sqrt{1+\rho^2}} \cos \varphi \left[\frac{1}{2}(\pi - 3\alpha + 3\varphi) - \frac{3}{4} \sin(2\alpha - 2\varphi + \frac{\pi}{3}) \right], \quad (10)$$

Для несиметричного режиму роботи СТК інтегральні показники енергетичного процесу можна визначити за формулою

$$X_{*несим} = 0,5(X_{*сим} + X_{*сим}^{сим}), \quad (11)$$

де $X_{*сим}$ - відповідний інтегральний показник енергетичного процесу при симетричному режимі СТК;

$X_{*сим}^{сим}$ - значення $X_{*сим}$, що симетричне відносно осі, яка проходить через позначку α_{cp} .

На основі виразів (7)...(11) були проведені розрахунки та побудовані графіки $Q_*(\alpha)$ (рис. 2), $P_*(\alpha)$ й $P_Q(\alpha)$ (рис. 3) для симетричного та несиметричного режимів роботи СТК.

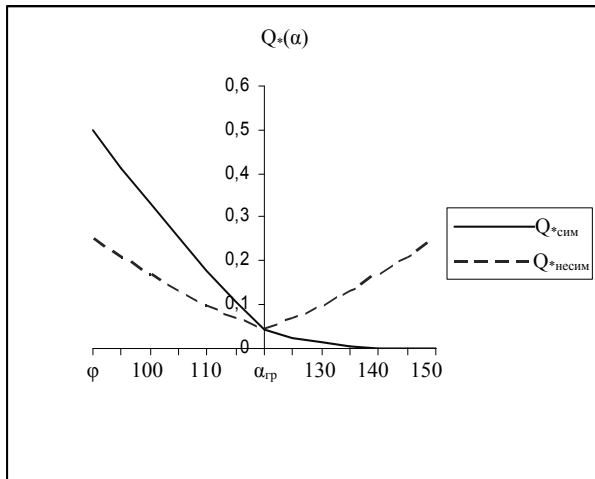


Рис. 2. Графік зміни реактивної потужності статичного тиристорного компенсатора

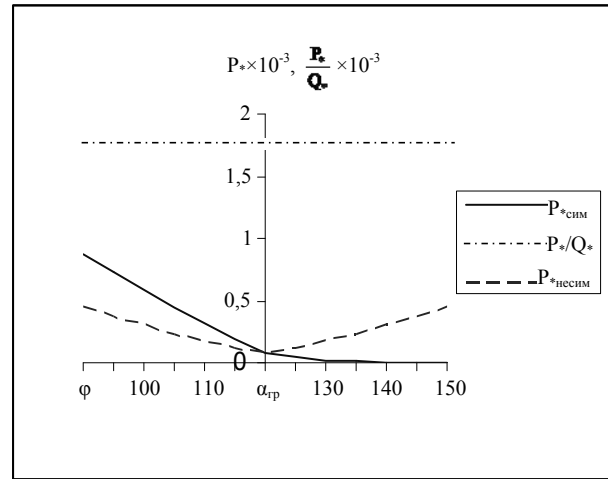


Рис. 3. Графік зміни споживаної активної потужності та питомої споживаної активної потужності СТК

Аналіз кривих на рисунках 1 та 2 показує, що

1. СТК з ізольованою нейтраллю залежно від α може додатково працювати ще у двох режимах: перший режим, коли $\varphi \leq \alpha \leq \alpha_{cp}$, другий режим, коли $\alpha_{cp} \leq \alpha \leq 150^\circ$, що підвищує його режимну гнучкість.

2. У разі симетричного режиму в діапазоні $\varphi \leq \alpha \leq \alpha_{zp}$ реактивна потужність практично лінійно залежить від кута α , що дозволяє спростити систему керування тиристорами СТК. В діапазоні $\alpha_{zp} \leq \alpha \leq 150^\circ$ реактивна потужність змінюється у незначних межах. У разі несиметричного режиму крива реактивної потужності симетрична відносно осі, яка проходить через позначку α_{tr} , а діапазон регулювання реактивної потужності у два рази менший.
3. Для СТК з ізольованою нейтраллю питома споживана активна потужність не залежить від кута α . Для підвищення економічної ефективності застосування СТК необхідно забезпечити мінімальну величину питомої споживаної активної потужності в процесі регулювання кута α . СТК з ізольованою нейтраллю у разі його живлення синусоїдною напругою не може цього забезпечити. Тому доцільно формувати на затискачах СТК полігональні форми напруги живлення.

Література

1. 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, М.П.Свиридов. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №2.