

СПОСІБ ПРЯМОГО ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШУНТОВОЇ КОНДЕНСАТОРНОЇ БАТАРЕЇ

© Сівакова О.М., Федів Є.І., 2010

Запропоновано спосіб прямого регулювання реактивної потужності, що генерує шунтова конденсаторна батарея. Отримана регульовальна характеристика, яка показує можливість плавної швидкодіючої зміни реактивної потужності конденсаторної батареї за рахунок зміни моментів часу закривання двооперативних тиристорів.

The method of direct adjusting of reactive-power is offered, which is generated by a shunt condenser battery. Regulation description was received, which shows the possibility of smooth fast change of condenser battery's reactive-power due to the change of moments of closing time for two-operating thyristors.

Постановка проблеми

Основною причиною порушення стійкості роботи електропостачальних систем є дефіцит реактивної потужності в перехідних режимах. Для підвищення запасу стійкості застосовують динамічну компенсацію реактивної потужності у вузлах навантаження – швидкодіюче регульоване джерело реактивної потужності.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Найпоширенішим плавно регульованим джерелом реактивної потужності в промислових установках є статичний тиристорний компенсатор (СТК), побудований за принципом непрямого регулювання. У СТК джерелом реактивної потужності є нерегульована шунтова конденсаторна батарея, а регулятором – шунтовий реактор та зустрічно-паралельно увімкнені тиристири, що керуються затримкою моментів часу вступу їх в роботу (рис. 1, а). Конденсаторна батарея генерує незмінну потужність, а її надлишок споживається тиристорно-регульованим реактором (ТРР) [1].

За прямої системи компенсації необхідне значення реактивної потужності генерується самим джерелом. Відомі системи прямої компенсації з дискретним регулюванням потужності конденсаторних батарей, а також деякі схеми плавного прямого регулювання конденсаторних батарей за допомогою перетворювачів частоти чи перетворювачів зі штучною комутацією тиристорів, які відрізняються складністю та меншою надійністю порівняно з компенсаторами з природною комутацією тиристорів [1–3]. Наприклад, в [3] запропоновано змінювати моменти часу закривання тиристорних ключів за рахунок підзаряджування конденсаторних батарей від окремого джерела імпульсів струму, яке є різновидом резонансного інвертора з відкритим входом. Пряме плавне регулювання конденсаторних батарей можливе також за допомогою випростувально-інверторного агрегату з параметричним забезпеченням стійкості його роботи [4–5].

Задача досліджень

Дослідити можливість прямого плавного вентиляного регулювання потужності конденсаторної батареї за допомогою зустрічно-паралельно увімкнених напівпровідникових елементів.

Виклад основного матеріалу

Пряме плавне регулювання конденсаторної батареї зустрічно-паралельно з'єднаними тиристорами не застосовують через надструми у момент відкривання вентилів, що керуються затримкою моментів часу вступу їх у роботу. Цього явища можна уникнути, якщо вентилі

відкривати за природних моментів часу вступу їх в роботу, а керування тривалості провідного стану вентилів здійснювати зміною моментів часу їх закривання.

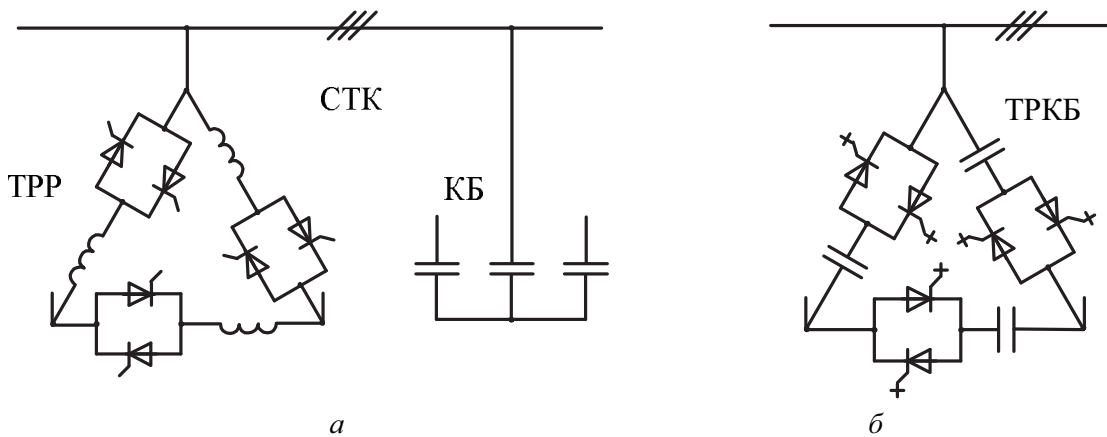


Рис. 1. Принципові схеми регульованих компенсаторів реактивної потужності: а – схема непрямого регулювання КБ (СТК); б – схема прямого тиристорного регулювання КБ

Дослідимо електромагнітні процеси в тиристорно регульованій конденсаторній батареї (ТРКБ), побудованій на закриваючих тиристорах (рис. 1,б). У симетричній схемі з симетрично керованими вентилями струми в кожній фазі не залежать від струмів в інших фазах. Тому властивості та енергетичні характеристики ТРКБ можна отримати для однієї фази, заступна схема якої наведена на рис. 2. Припустимо, що ТРКБ живиться від джерела заданої змінної напруги: $u(t) = U_m \sin(\omega t)$, а напівпровідникові вентилялі – ідеальні.

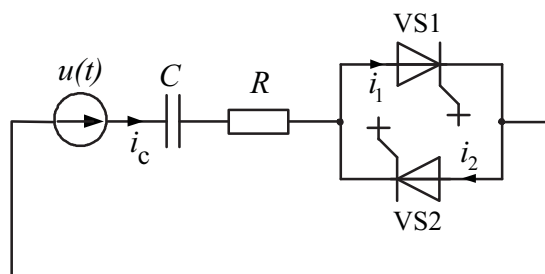


Рис. 2. Заступна схема однієї фази ТРКБ

Розглянемо нормальний усталений режим ТРКБ, напівпровідникові вентилялі якої закриваються керуючим імпульсом в моменти часу α_3 , а відкриваються без затримки додатною анодною напругою в моменти часу α_B . Дослідимо електромагнітні процеси в ТРКБ на інтервалі повторюваності процесів, що дорівнює π рад. За прийнятих припущень для інтервалу $\alpha_B \leq \vartheta \leq \alpha_3$ провідності вентиля електромагнітний стан схеми (рис. 2) можна описати рівнянням

$$\omega CR \frac{du_c}{d\vartheta} + u_c = u(\vartheta), \quad (1)$$

де $\vartheta = \omega t$, u_c – напруга на конденсаторі.

Розв'язком диференціального рівняння (1) є вираз для миттєвої напруги на конденсаторі, справедливий для інтервалу провідності вентиля VS1:

$$u_c(\vartheta) = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\vartheta - \frac{\pi}{2} + \varphi\right) + A \cdot e^{-\frac{\vartheta}{\omega\tau}},$$

де A – стала інтегрування, $\tau = RC$ – стала часу, $Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$ – імпеданс кола, $X_c = \frac{1}{\omega C}$ – реактанс кола, $\varphi = \arctg\left(\frac{X_c}{R}\right)$ – кут зсуву фаз між періодичною складовою струму та напругою джерела живлення.

Сталу інтегрування знаходимо з умови незмінності рівня напруги на конденсаторі від моменту часу закривання одного вентиля до моменту часу відкривання другого вентиля. У результаті отримуємо такий остаточний вираз для напруги на ємності:

$$u_c(\vartheta) = U_m \frac{X_c}{Z} \left[\sin\left(\vartheta - \frac{\pi}{2} + \varphi\right) + \frac{\cos(\alpha_B + \varphi) + \cos(\alpha_3 + \varphi)}{e^{-\frac{\alpha_B}{\omega\tau}} + e^{-\frac{\alpha_3}{\omega\tau}}} \cdot e^{-\frac{\vartheta}{\omega\tau}} \right]. \quad (2)$$

Струм в ТРКБ

$$i_c(\vartheta) = \omega C \frac{du_c}{d\vartheta} = \frac{U_m}{Z} \left[\cos\left(\vartheta - \frac{\pi}{2} + \varphi\right) - \frac{1}{\omega\tau} \cdot \frac{\cos(\alpha_B + \varphi) + \cos(\alpha_3 + \varphi)}{e^{-\frac{\alpha_B}{\omega\tau}} + e^{-\frac{\alpha_3}{\omega\tau}}} \cdot e^{-\frac{\vartheta}{\omega\tau}} \right]. \quad (3)$$

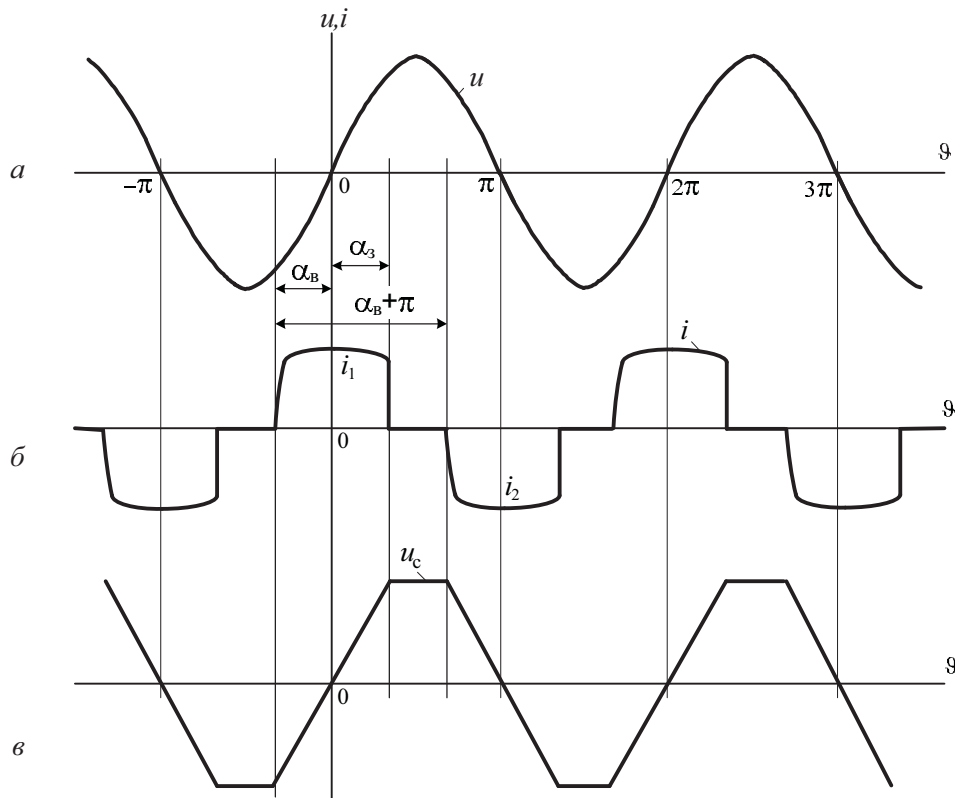


Рис. 3. Часові діаграми струмів та напруг для однієї фази ТРКБ:
а – напруга мережі; б – струми вентилів та конденсаторної батареї;
в – напруга на ємності

Часові діаграми струмів та напруг в одній фазі ТРКБ наведені на рис. 3. У запропонованому способі регулювання конденсаторної батареї тиристор відкривається в момент часу появи на ньому додатної анодної напруги, яка є різницею напруг джерела живлення та напруги на конденсаторі. У силовій перетворювальній техніці такий режим називають штучною комутацією вентилів, оскільки він супроводжується зсувом моменту часу вступу їх в роботу раніше, ніж момент проходження напруги джерела живлення через нульове значення (рис. 3, а). Тобто вентилялі відкриваються в

області від'ємних значень кута α_B з випередженням відносно природного моменту вступу їх в роботу (рис. 3, б). Отже, значення кута відкриття тиристора VS1 можна отримати з умови $u_C(\alpha_B) = u(\alpha_B)$, яка набуває такого вигляду:

$$\left[\sin \alpha_B + \sin \varphi \cdot \cos(\alpha_B + \varphi) \right] \cdot e^{-\frac{\alpha_3}{\omega\tau}} + \left[\sin \alpha_B - \sin \varphi \cdot \cos(\alpha_3 + \varphi) \right] \cdot e^{-\frac{\alpha_B}{\omega\tau}} = 0. \quad (4)$$

У результаті чисельного розв'язку рівняння (4) для ряду значень сталої часу τ отримані залежності моменту часу α_B відкриття та тривалості $\lambda = \alpha_3 - \alpha_B$ провідного стану вентилів ТРКБ (рис. 4). Як показали розрахунки, зі зменшенням значення τ та припущення $\varphi \approx 90$ ел.град. можна вважати, що $|\alpha_B| \approx |\alpha_3|$, і за формою струм вентиля практично симетричний відносно осі ординат (рис. 3, б). Оскільки ТРКБ є практично ємнісним навантаженням, то зі зменшенням кута закривання вентилів α_3 зменшується амплітуда струму в конденсаторній батареї за практично незмінного фазового зсуву. Діапазон регулювання ТРКБ за кутом становить: від значення $\alpha_3 = 90$ ел. град. – вентиля регулятора повністю відкриті ($\lambda = \pi$ рад.), до значення $\alpha_3 = 0$ – вентиля регулятора повністю закриті ($\lambda = 0$).

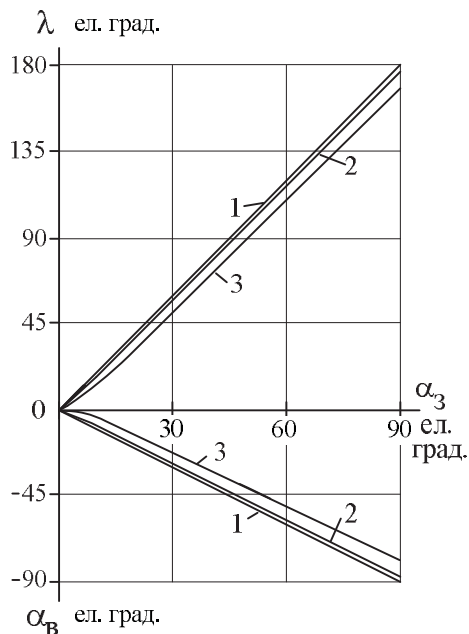


Рис. 4. Залежності кутів відкриття та тривалості провідного стану вентилів ТРКБ від кута їх закривання:

$$1 - \tau = 10^{-5} \text{ с}, 2 - \tau = 10^{-4}, 3 - \tau = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

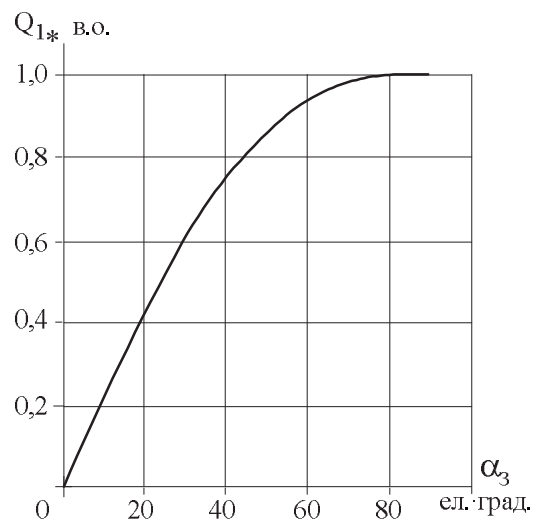


Рис. 5. Залежність реактивної потужності зсуву, яка генерується ТРКБ, від кута закривання вентилів ($\tau = 10^{-4}$ с)

Основною відмінністю запропонованого способу регулювання шунтової конденсаторної батареї за допомогою зустрічно-паралельно увімкнених закриваючих тиристорів є те, що вентиля ТРКБ вступають у роботу в моменти часу їх природного відкриття, тобто за рівності напруги джерела живлення та залишкової напруги на конденсаторі після дотермінового закривання вентиля керуючим імпульсом. У той час, як за використання традиційних відкриваючих тиристорів, вступ вентилів СТК в роботу супроводжується перехідним процесом під дією різниці напруги джерела живлення в момент часу подачі керуючого відкриваючого імпульсу та залишкової напруги на конденсаторі після його природного закривання.

Для отримання регульовальної характеристики ТРКБ виділимо основну гармоніку струму i_c . Коефіцієнти розкладу виразу (3) в ряд Фур'є для першої гармоніки:

$$A_1 = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_B}^{\alpha_3} i_c(\vartheta) \cos \vartheta d\vartheta = \frac{U_m}{\pi \cdot Z} \left\{ (\alpha_3 - \alpha_B) \sin \varphi - \frac{\cos(2\alpha_3 + \varphi) - \cos(2\alpha_B + \varphi)}{2} - \frac{2D}{1 + (\omega\tau)^2} \left[(\omega\tau \sin \alpha_3 - \cos \alpha_3) e^{-\frac{\alpha_3}{\omega\tau}} - (\omega\tau \sin \alpha_B - \cos \alpha_B) e^{-\frac{\alpha_B}{\omega\tau}} \right] \right\},$$

$$B_1 = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_B}^{\alpha_3} i_c(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta = \frac{U_m}{\pi \cdot Z} \left\{ (\alpha_3 - \alpha_B) \cos \varphi - \frac{\sin(2\alpha_3 + \varphi) - \sin(2\alpha_B + \varphi)}{2} + \frac{2D}{1 + (\omega\tau)^2} \left[(\sin \alpha_3 + \omega\tau \cos \alpha_3) e^{-\frac{\alpha_3}{\omega\tau}} - (\sin \alpha_B + \omega\tau \cos \alpha_B) e^{-\frac{\alpha_B}{\omega\tau}} \right] \right\},$$

$$\text{де } D = \left[\frac{\cos(\alpha_B + \varphi) + \cos(\alpha_3 + \varphi)}{e^{-\frac{\alpha_B}{\omega\tau}} + e^{-\frac{\alpha_3}{\omega\tau}}} \right].$$

Реактивна потужність зсуву, яка генерується ТРКБ

$$Q_1 = \frac{U_m I_{1m}}{2} \sin \varphi_1,$$

де $I_{1m} = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}$ – амплітуда, а $\varphi_1 = \arctg \left(\frac{B_1}{A_1} \right)$ – фаза основної гармоніки струму.

На рис. 5 наведена регульовальна характеристика ТРКБ – залежність відносних значень реактивної потужності зсуву від кута керування напівпровідниковими вентилями. За базову прийнята реактивна потужність конденсаторної батареї без пристрою регулювання (тиристорного блока):

$$Q_0 = \frac{U_m^2}{2Z} \sin \varphi.$$

Змінюючи кут регулювання ТРКБ в діапазоні $\alpha_3 = 0 \div 90$ ел. град., генеровану реактивну потужність можна плавно змінювати від значення $Q = 0$ до номінальної потужності ($Q = 100 \%$).

Висновки

1. Запропоновано новий спосіб прямого тиристорного регулювання шунтової конденсаторної батареї для потреб динамічної компенсації реактивної потужності електропостачальних систем. 2. Отримана регульовальна характеристика конденсаторної батареї, реактивна потужність зсуву якої залежить від кутів закривання зустрічно-паралельно з'єднаних двоопераційних тиристорів.

1. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 248 с. 2. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах / Пер. тематического сб. рабочей группы Исследовательского Комитета № 38 СИГРЭ / Под ред. И.И. Карташева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 174 с. 3. Статические компенсаторы реактивной мощности прямого регулирования и их режимы / Под ред. А.Ф. Дьякова и Л.А. Никонца. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 172 с. 4. А. с. 14800015. Способ регулирования статического источника реактивной мощности / Л.А. Никонец, Е.И. Федив. – 1989. – Открытия. Изобрет. № 18.