

УДК 621.314

Ю. В. Грицюк, асп.;

М. В. Петухов, к. т. н., доц.;

Б. С. Рогальський, д. т. н., проф.;

М. П. Свиридов, к. т. н., доц.

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ЇХ ЖИВЛЕННІ НАПРУГАМИ ПОЛІГОНАЛЬНОЇ ФОРМИ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ПИТОМОЇ СПОЖИВАНОЇ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Розглянуто режими роботи трифазного статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності із заземленою нейтраллю за умови живлення його напругами полігональних форм. Запропоновано підхід, який передбачає застосування для формування цих напруг фільтрокомпенсуючого пристрою, що зазвичай використовується для компенсації вищих гармонік. За критерій оптимізації режимів використано мінімум питомої споживаної активної потужності. Доведено економічну ефективність функціонування статичного тиристорного компенсатора з його живленням напругами прямокутної та пилкоподібної форми у порівнянні з базовим варіантом (живлення напругою синусоїдної форми).

Вступ

В процесі розв'язання задачі компенсації реактивної потужності в мережах промислових підприємств визначається економічна доцільність застосування наявних її джерел (синхронних двигунів, генераторів, батарей конденсаторів, статичних тиристорних компенсаторів). Основні методологічні положення проведення таких розрахунків викладені в роботі [1].

Одним із чинників, які впливають на економічну доцільність застосування тих чи інших засобів компенсації є споживана ними активна потужність (енергія) для генерації реактивної потужності (енергії). Очевидно, що для підвищення економічної ефективності застосування джерел реактивної потужності потрібно забезпечити мінімальну величину питомої споживаної активної потужності.

Постановка задачі

В системах електропостачання промислових підприємств як джерела живлення потужних технологічних установок можуть використовуватися статичні тиристорні компенсатори (СТК) [1], які за певних умов є досить ефективними джерелами реактивної потужності, а також засобом регулювання напруги та зменшення загальних електричних втрат. До переваг СТК, як багатофункціональних та багаторежимних пристроїв, слід віднести відсутність додаткових капіталовкладень, а також можливість плавного регулювання необхідних параметрів.

В роботі [2] розглядалися режими роботи трифазного статичного компенсатора реактивної потужності із заземленою нейтраллю на базі тиристорно-регульованих реакторів та некомутованих батарей конденсаторів. З метою зниження рівня вищих гармонік у мережі до СТК під'єднаний фільтрокомпенсуючий пристрій (ФКП). На відміну від традиційного підходу, коли ФКП застосовується для компенсації вищих гармонік з найбільшою амплітудою з метою забезпечення напруги живлення близької до синусоїдної, пропонується інший підхід, при якому ФКП використовується для формування напруг живлення полігональної форми.

Розглянемо вплив напруг живлення полігональних форм на інтегральні показники процесу СТК із заземленою нейтраллю, схема якого показана на рис. 1, при симетричному та несиметричному керуванні тиристорами бітиристорних ключів (БК) компенсатора. При ному керуванні, за умови збільшення кута керування α , струми через перший та другий ри БК зменшуються. При несиметричному керуванні – струм через перший тиристор БК зменшується, а через другий збільшується. За умови ідентичності параметрів фазних реакторів струм че-

рез БК та навантаження не залежить від струму інших фаз, тому інтегральні показники енергетичного процесу СТК можна визначити, розглядаючи процеси тільки в одній із фаз.

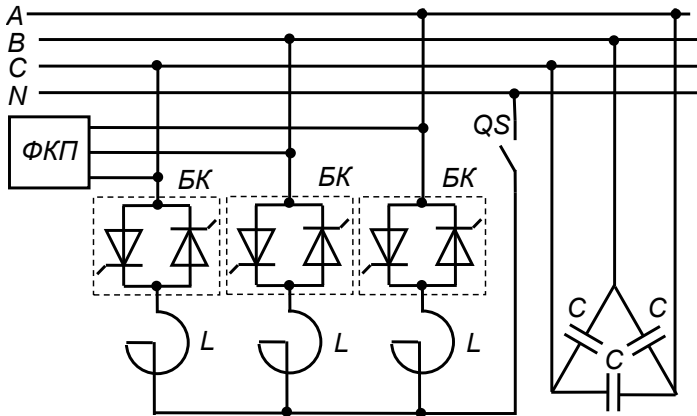


Рис. 1. Структурна електрична схема СТК

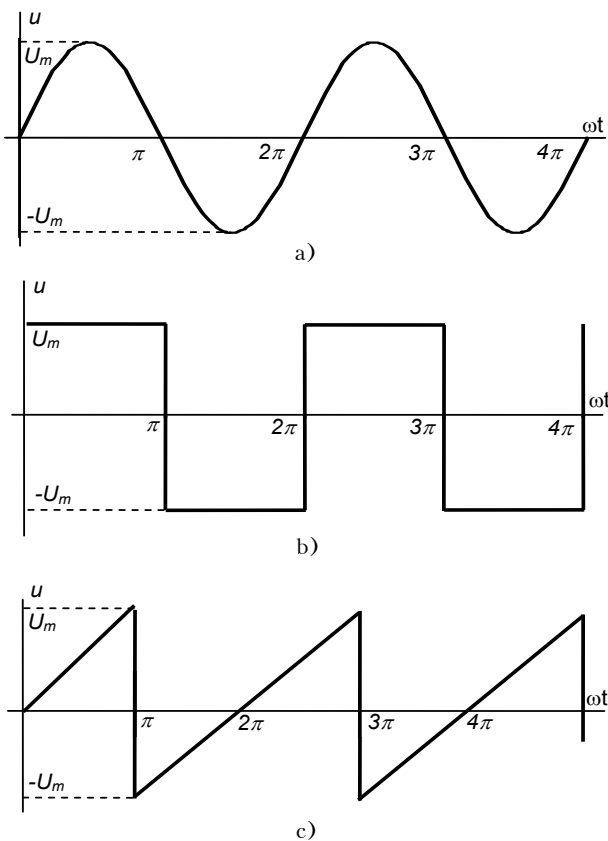


Рис. 2. Форми напруги живлення СТК: а) синусоїдна; б) прямокутна; в) пілкоподібна

Оскільки одним із завдань досліджень є визначення споживаної активної потужності при генерації реактивної потужності, то при розрахунках враховується активний опір фазного реактора, незважаючи на те, що він значно менший його реактивного опору, а також розраховується активна потужність, що споживається тиристорами БК. Крім того, для визначення економічної ефективності застосування СТК з різними напругами живлення полігональної форми доцільно провести порівняльний аналіз значень їх питомих споживаних активних потужностей по відношенню до базового варіанта. Під базовим варіантом слід розуміти варіант, коли СТК живиться синусоїдною напругою.

Результати досліджень

При визначенні показників енергетичного процесу СТК застосовуватимуться інтегральні методи їх визначення, оскільки вони дозволяють знайти значення цих показників без розкладання кривих струму $i(t)$ та напруги $u(t)$ у ряд Фур'є. З огляду на це, величина реактивної потужності, яку генерує СТК, може бути визначена через інтеграл Рімана [3]

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

величина споживаної активної потужності у фазному реакторі — за відомим виразом

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

величина споживаної активної потужності в одному тиристорі за умови, що основним джерелом нагрівання є втрати у стані прямої провідності — за формулою [4]

$$P_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^T i_T u_T dt = U_0 I_{Tav} + R_d I_T^2, \quad (3)$$

де U_0 , R_d — відповідно порогова напруга та диференційний опір прямої ділянки вольт-амперної характеристики тиристора; I_{Tav} , I_T — відповідно середнє та діюче значення струму через тиристор;

величина питомої споживаної активної потужності при генеруванні реактивної — за виразом

$$P_Q = \frac{P + P_T}{Q}. \quad (4)$$

Загальне рівняння електричної рівноваги кола, до складу якого входять БК та фазний реактор, у випадку, коли один із тиристорів БК відкритий, має вигляд

$$X \frac{di(\theta)}{d\theta} + Ri(\theta) = u(\theta), \quad (5)$$

де $X = \omega L$ — реактивний опір фазного реактора; $\theta = \omega t$, ω — циклічна частота напруги живлення.

Коли один із тиристорів БК відкритий, то через нього та фазний реактор починає протікати струм, який можна знайти з урахуванням рівняння (5) методом Лагранжа

$$i(\theta) = e^{-\rho\theta} \left(\int u(\theta) e^{\rho\theta} d\theta + A \right), \quad (6)$$

де $\rho = \frac{R}{X}$; A — стала інтегрування, яка визначається моментом відкриття тиристора, тобто початковими умовами.

Тиристор автоматично закривається, коли струм через нього перетинає нульову позначку. Момент переходу струму через нуль визначає величину, яка називається кутом вимкнення тиристора.

Для реальних потужних реакторів, які застосовуються в СТК, величина $\rho \ll 1$, тому вирази для струмів за формулою (6) можна суттєво спростити, що дозволяє отримати аналітичні залежності для інтегральних показників енергетичного процесу в СТК (1)...(4).

Проведемо розрахунок інтегральних показників енергетичного процесу в СТК для базового варіанту, коли форма напруги живлення синусоїдна (рис. 2а), та для полігональних форм напруги живлення: прямокутної (рис. 2б) і пилкоподібної (рис. 2с). Нехай у СТК застосовуються реактори типу РКOC-3900/10-У1 з такими паспортними даними: номінальна реактивна потужність $Q_n = 3,9$ МВАр, номінальна напруга $U_n = 10$ кВ; номінальний струм $I_n = 385$ А, номінальна індуктивність $L_n = 99,7$ мГн, реактивний опір $X = 314 \cdot 99,7 \cdot 10^{-3} = 31,3$ Ом, середні втрати активної потужності у номінальному режимі $\Delta P_{av} = 8154,5$ Вт, активний опір реактора $R = \frac{\Delta P_{av}}{I_n^2} = \frac{8154,5}{385^2} = 0,055$ Ом, $\rho = \frac{0,055}{31,3} = 1,757 \cdot 10^{-3}$; тиристори типу Т253-500 з такими паспортними даними: амплітудне значення напруги живлення $U_m = 6$ кВ; порогова напруга $U_0 = 1,4$ В, диференційний опір $R_d = 0,9 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Коли форма напруги живлення синусоїдна (базовий варіант) $u(\theta) = U_m \sin(\theta)$, а керування тиристорами симетричне, то при подачі в момент $\theta = \alpha$ імпульсу керування на перший тиристор БК через нього та фазний реактор у відповідності з (6) буде протікати струм

$$i_1(\theta) = \frac{U_m}{X\sqrt{1+\rho^2}} (-\sin(\alpha - \varphi) + \sin(\theta - \varphi)), \quad (7)$$

де $\varphi = \arctg \frac{1}{\rho}$.

Привівнюючи праву частину (7) до нуля, отримаємо кут вимкнення першого тиристора БК

$$\alpha_{sv1} = \pi + 2\varphi - \alpha. \quad (8)$$

Підчас дії від'ємної півхвилі напруги живлення при подачі в момент $\theta = \pi + \alpha$ імпульсу керування відкривається другий тиристор БК. В момент проходження струму другого тиристора через нуль цей тиристор закривається. Процеси, які протікають в колі другого тиристора, ідентичні процесам в колі першого тиристора БК через симетрію напруги живлення. Отже, немає потреби у визначенні струму через другий тиристор та кута його вимкнення. У цьому випадку достатньо знайти інтегральні показники енергетичного процесу в СТК за формулами (1)...(3) для струму $i_1(\theta)$ та результат подвоїти. З урахуванням цих міркувань для симетричного режиму роботи тиристорів БК отримаємо у відносних одиницях величину реактивної потужності, яку генерує СТК

$$Q_{*sym} = \frac{XQ_{sym}}{U_m^2} = -\frac{1}{\pi\sqrt{1+\rho^2}} \int_{\alpha}^{\pi+2\varphi-\alpha} (-\sin(\alpha-\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) \cos\theta d\theta =$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{1+\rho^2}} \sin\varphi (\pi+2\varphi-2\alpha - \sin(2(\alpha-\varphi)));$$
(9)

величину споживаної активної потужності у фазному реакторі

$$P_{*sym} = \frac{XP_{sym}}{U_m^2} = \frac{1}{\pi\sqrt{1+\rho^2}} \int_{\alpha}^{\pi+2\varphi-\alpha} (-\sin(\alpha-\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) \sin\theta d\theta =$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{1+\rho^2}} \cos\varphi (\pi+2\varphi-2\alpha - \sin(2(\alpha-\varphi)));$$
(10)

та величину активної потужності, що споживається тиристорами БК

$$P_{T*sym} = \frac{XP_{Tsym}}{U_m^2} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\gamma_0}{\sqrt{1+\rho^2}} \int_{\alpha}^{\pi+2\varphi-\alpha} (-\sin(\alpha-\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) d\theta + \frac{\rho_d}{1+\rho^2} \times \right.$$

$$\times \int_{\alpha}^{\pi+2\varphi-\alpha} (-\sin(\alpha-\varphi) + \sin(\theta-\varphi))^2 d\theta \left. \right) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\gamma_0}{\sqrt{1+\rho^2}} (2\cos(\alpha-\varphi) - \right.$$

$$- (\pi+2\varphi-2\alpha)\sin(\alpha-\varphi)) + \frac{\rho_d}{1+\rho^2} ((\pi+2\varphi-2\alpha)\sin^2(\alpha-\varphi) -$$

$$\left. - \frac{3}{2}\sin(2(\alpha-\varphi)) + \frac{1}{2}(\pi+2\varphi-2\alpha)) \right),$$
(11)

де $\gamma_0 = \frac{U_0}{U_m} = \frac{1,4}{6 \cdot 10^3} = 0,000233333$; $\rho_d = \frac{R_d}{X} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{31,3} = 0,00002875$.

При несиметричному режимі роботи тиристорів БК перший тиристор працює так само, як при симетричному режимі, тобто через тиристор і фазний реактор протікає струм (7), а вимкнення цього тиристора відбувається за умови (8). Для забезпечення несиметричного режиму роботи під час дії від'ємної півхвилі напруги живлення другий тиристор БК має бути відкритий в момент $\theta = \frac{5\pi}{2} - \alpha$. Такий вибір кута ввімкнення зумовлений з одного боку тим, що для кута керування $\alpha = \frac{\pi}{2}$, коли через перший тиристор БК протікає максимальний струм – другий тиристор не може

бути відкритий, оскільки в момент подачі керуючого імпульсу $\theta = \frac{5\pi}{2} - \frac{\pi}{2} = 2\pi$ напруга живлення проходить через нуль, а з іншого боку тим, що при куті керування $\alpha = \pi$ перший тиристор БК не може відкритися, але через другий тиристор буде протікати максимальний струм. При подачі керуючого імпульсу на другий тиристор БК у момент $\theta = \frac{5\pi}{2} - \alpha$ він відкривається і через нього та фазний реактор починає протікати струм

$$i_2(\theta) = \frac{U_m}{X\sqrt{1+\rho^2}} (-\cos(\alpha+\varphi) + \sin(\theta-\varphi)).$$
(12)

Прирівнюючи вираз (12) до нуля, знайдемо кут вимкнення другого тиристора БК для режиму, що розглядається

$$\alpha_{sw2} = \frac{\pi}{2} + 2\varphi + \alpha.$$
(13)

Отримані співвідношення (7), (8), (12) та (13) дають змогу визначити за формулами (1)...(3) ін-

тегральні показники енергетичного процесу в СТК при несиметричному керуванні тиристорами БК

$$Q_{*asy} = -\frac{1}{2\pi\sqrt{1+\rho^2}} \left(\int_{\alpha}^{\pi+2\varphi-\alpha} (-\sin(\alpha-\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) \cos\theta d\theta + \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}+2\varphi+\alpha} (-\cos(\alpha+\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) \cos\theta d\theta \right) = \frac{1}{4\pi\sqrt{1+\rho^2}} \sin\varphi (4\varphi - \pi - 2\sin 2\alpha \cos 2\varphi); \tag{14}$$

$$P_{*asy} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1+\rho^2}} \left(\int_{\alpha}^{\pi+2\varphi-\alpha} (-\sin(\alpha-\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) \sin\theta d\theta + \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}+2\varphi+\alpha} (-\cos(\alpha+\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) \sin\theta d\theta \right) = \frac{1}{4\pi\sqrt{1+\rho^2}} \cos\varphi (4\varphi - \pi - 2\sin 2\alpha \cos 2\varphi); \tag{15}$$

$$P_{T*asy} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\gamma_0}{\sqrt{1+\rho^2}} \int_{\alpha}^{\pi+2\varphi-\alpha} (-\sin(\alpha-\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) d\theta + \frac{\rho d}{1+\rho^2} \times \int_{\alpha}^{\pi+2\varphi-\alpha} (-\sin(\alpha-\varphi) + \sin(\theta-\varphi))^2 d\theta - \frac{\gamma_0}{\sqrt{1+\rho^2}} \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}+2\varphi+\alpha} (-\cos(\alpha+\varphi) + \sin(\theta-\varphi)) d\theta + \frac{\rho d}{1+\rho^2} \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}+2\varphi+\alpha} (-\cos(\alpha+\varphi) + \sin(\theta-\varphi))^2 d\theta \right). \tag{16}$$

На основі виразів (4), (9)...(11), (14)...(16) були проведені розрахунки та побудовані графіки зміни реактивної потужності $Q_*(\alpha)$ (рис. 3), споживаної активної потужності $P_*(\alpha)$ та питомої споживаної активної потужності $P_{Q*}(\alpha)$ (рис. 4) при симетричному та несиметричному керуванні тиристорами БК.

Аналіз кривих на рис. 3 та 4 показує, що питома споживана активна потужність при генерації

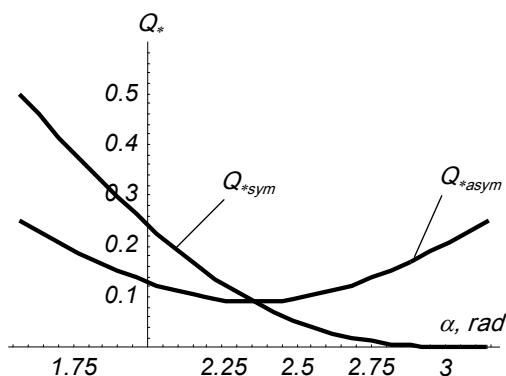


Рис. 3. Графіки зміни реактивної потужності СТК для синусоїдальної форми напруги живлення

реактивної потужності практично не залежить від кута керування тиристорами α та режимів роботи тиристорів БК. Отримані результати свідчать про те, що у середньому на генерацію кожного 1 МВАр реактивної потужності необхідно витратити близько 2034 Вт активної потужності.

Нехай ФКП формує на затискачах СТК напругу живлення прямокутної форми (рис. 2b). Оскільки напруга живлення має розриви першого роду та різний математичний опис на різних її ділянках, то це потрібно враховувати при визначенні реактивної потужності та струмів через фазний реактор.

При симетричному керуванні тиристорами БК на підставі загального рівняння кола (5) методом

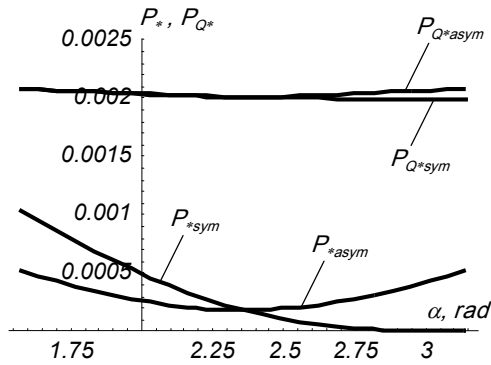


Рис. 4. Графіки зміни споживаної активної потужності та питомої споживаної активної потужності для синусоїдної форми напруги живлення

Лагранжа, з урахуванням початкових умов $i_1(\alpha) = 0$, знайдемо закон зміни струму через фазний реактор на ділянці від α до π

$$i_1(\theta) = \frac{U_m}{R} - \frac{U_m}{R} e^{\rho(\alpha-\theta)} \quad (17)$$

та, з урахуванням початкових умов $i_1(\pi) = i_2(\pi) = \frac{U_m}{R} - \frac{U_m}{R} e^{\rho(\alpha-\pi)}$, закон зміни струму на ділянці від π до α_{sw1}

$$i_2(\theta) = -\frac{U_m}{R} + \frac{U_m}{R} (2e^{\rho\pi} - e^{\rho\alpha}) e^{-\rho\theta} \quad (18)$$

Прирівнявши (18) до нуля, визначимо кут

вимкнення першого тиристора БК

$$\alpha_{sw1} = \pi + \frac{1}{\rho} \ln(2 - e^{\rho(\alpha-\pi)}) \quad (19)$$

Через ідентичність процесів, які відбуваються в колі другого тиристора БК, немає потреби у визначенні струму через цей тиристор та його кута вимкнення.

При несиметричному керуванні тиристорами БК струм через фазний реактор на ділянці від $\frac{5\pi}{2} - \alpha$ до 2π визначатиметься за виразом

$$i_3(\theta) = -\frac{U_m}{R} + \frac{U_m}{R} e^{\rho\left(\frac{5\pi}{2}-\alpha\right)} e^{-\rho\theta}, \quad (20)$$

а на ділянці від 2π до α_{sw2} —

$$i_4(\theta) = \frac{U_m}{R} + \frac{U_m}{R} \left(-2e^{-\rho 2\pi} + e^{\rho\left(\frac{5\pi}{2}-\alpha\right)} \right) e^{-\rho\theta} \quad (21)$$

Прирівнявши (21) до нуля, знайдемо кут вимкнення другого тиристора БК

$$\alpha_{sw2} = 2\pi + \frac{1}{\rho} \ln \left(2 - e^{\rho\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)} \right) \quad (22)$$

Підставляючи вирази (17)...(22) у формули (1)...(3), отримаємо при симетричному керуванні тиристорами БК величину реактивної потужності

$$Q_{*sym} = \frac{2}{\pi\rho} (1 - e^{\rho(\alpha-\pi)}), \quad (23)$$

споживану фазним реактором і тиристорами БК активну потужність

$$P_{*sym} = \frac{1}{\pi\rho^2} \left(\left((\pi - \alpha)\rho - \ln(2 - e^{(-\pi+\alpha)\rho}) \right) \gamma_0 + (-2 + 2e^{(-\pi+\alpha)\rho} + \rho(\pi - \alpha) + \ln(2 - e^{(-\pi+\alpha)\rho})) (1 + \rho d) \right) \quad (24)$$

та при несиметричному керуванні тиристорами БК величину реактивної потужності

$$Q_{*asymp} = \frac{1}{\pi\rho} \left(2 - e^{\rho(\alpha-\pi)} - e^{\rho\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right)} \right), \quad (25)$$

величину активної потужності, що споживається фазним реактором та тиристорами БК

$$P_{*asymp} = \frac{1}{4\pi\rho^2} \left(\left(\pi\rho - 2\ln \left(2 - e^{\frac{1}{2}(\pi-2\alpha)\rho} \right) - 2\ln \left(2 - e^{(-\pi+\alpha)\rho} \right) \right) \gamma_0 \right) + \left(-8 + 4e^{\frac{1}{2}(\pi-2\alpha)\rho} + 4e^{(-\pi+\alpha)\rho} + \pi\rho + 2\ln \left(2 - e^{\frac{1}{2}(\pi-2\alpha)\rho} \right) + 2\ln \left(2 - e^{(-\pi+\alpha)\rho} \right) \right) (1 + \rho_d). \quad (26)$$

На основі виразів (23)...(26) були проведені розрахунки та побудовані графіки $Q_*(\alpha)$ (рис. 5), $P_*(\alpha)$ і $P_{Q*}(\alpha)$ (рис. 6).

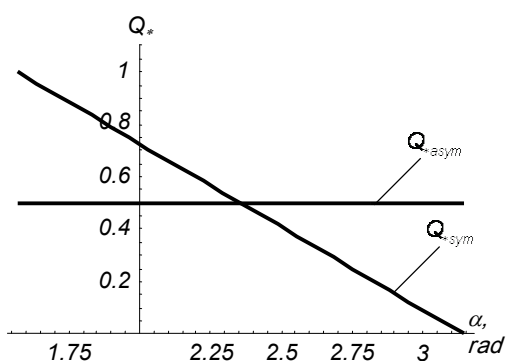


Рис. 5. Графіки зміни реактивної потужності СТК для прямокутної форми напруги живлення

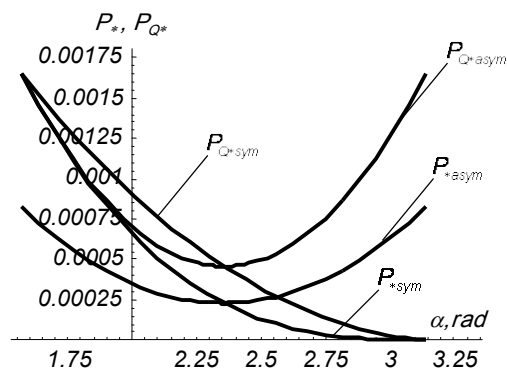


Рис. 6. Графіки зміни споживаної активної потужності та її питомого значення для прямокутної форми напруги живлення

Аналіз кривих на рис. 5 показує, що при симетричному керуванні тиристорами реактивна потужність практично лінійно залежить від кута керування α . Це дозволяє спростити систему керування тиристорами СТК у замкнених системах. При несиметричному керуванні тиристорами рівень реактивної потужності є практично постійним на всьому діапазоні зміни кута керування. Це дозволяє підтримувати на заданому рівні величину реактивної потужності в мережах промислових підприємств з високою економічністю, встановлюючи кут керування $\alpha = 3\pi/4$ і, тим самим, мінімізуючи споживану активну потужність та її питома значення (рис. 6). Розрахунки показують, що в цьому випадку на генерацію кожного 1 МВАр реактивної потужності споживана активна потужність становить близько 473 Вт, тобто у 4,3 рази менша, ніж у базовому варіанті. Навіть у найгіршому випадку питома споживана активна потужність СТК при його живленні напругою прямокутної форми у 1,23 рази менша, ніж у базовому варіанті. Мінімізувати питому споживану активну потужність можна також за допомогою комбінованого керування тиристорами СТК, коли на ділянці зміни кута керування α від $\pi/2$ до $3\pi/4$ БК працює в несиметричному режимі, а на ділянці від $3\pi/4$ до π — у симетричному режимі.

Далі розглянемо випадок, коли ФКП формує на затискачах СТК напругу живлення пилкоподібної форми (рис. 2в). Ця форма напруги живлення, як і прямокутна форма має розриви першого роду та різний математичний опис на різних ділянках. Слід зазначити, що умови роботи обох тиристорів БК будуть різними через неоднаковість напруги живлення на відповідних ділянках.

Знайдемо струми через перший та другий тиристори БК при симетричному керуванні. Після інтегрування (6) за початкових умов $i_1(\alpha) = 0$ та з урахуванням того, що для $\rho \ll 1$ величина

$e^{\rho(\alpha-\theta)} = 1 + \rho(\alpha - \theta) + \frac{\rho^2}{2}(\alpha - \theta)^2$, отримаємо значення струму через перший тиристор і фазний реактор на ділянці від α до π

$$i_1(\theta) = \frac{U_m}{\pi X \rho} \left(-\frac{1}{\rho} + \theta + \left(\frac{1}{\rho} - \alpha \right) e^{\rho(\alpha - \theta)} \right) = \frac{U_m}{\pi X} \left(-\frac{\alpha^2}{2} - \frac{1}{2} \rho \alpha^3 + \rho \alpha^2 \theta + \frac{\theta^2}{2} - \frac{1}{2} \rho \alpha \theta^2 \right). \quad (27)$$

Усі подальші математичні розрахунки будемо виконувати, враховуючи, що $\rho \ll 1$.

$$\begin{aligned} & \text{Інтегруючи вираз (6) за початкових умов } i_1(\pi) = i_2(\pi) = \frac{U_m}{\pi X \rho} \left(-\frac{1}{\rho} + \pi + \left(\frac{1}{\rho} - \alpha \right) e^{\rho(\alpha - \pi)} \right) = \\ & = \frac{U_m}{\pi X} \left(-\frac{\alpha^2}{2} - \frac{1}{2} \rho \alpha^3 + \rho \alpha^2 \pi + \frac{\pi^2}{2} - \frac{1}{2} \rho \alpha \pi^2 \right), \text{ знайдемо закон зміни струму через перший тиристор} \end{aligned}$$

БК та фазний реактор на ділянці від π до α_{sw1}

$$i_2(\theta) = \frac{U_m}{\pi X} \left(2\pi^2 - 2\pi\theta + \rho\pi^3 - 2\pi^2\rho\theta + \pi\rho\theta^2 - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{\rho\alpha^3}{2} + \rho\alpha^2\theta + \frac{\theta^2}{2} - \frac{\rho\alpha\theta^2}{2} \right). \quad (28)$$

Перший тиристор БК закриється, коли $i_2(\theta) = 0$, тому кут вимкнення тиристора буде визначатись як

$$\alpha_{sw1} = \frac{2\pi + 2\pi^2\rho - \alpha^2\rho}{1 - \alpha\rho + 2\pi\rho} - \sqrt{\left(\frac{2\pi + 2\pi^2\rho - \alpha^2\rho}{1 - \alpha\rho + 2\pi\rho} \right)^2 - \frac{4\pi^2 + 2\pi^3\rho - \alpha^2 - \alpha^3\rho}{1 - \alpha\rho + 2\pi\rho}}. \quad (29)$$

У разі симетричного керування другий тиристор БК має відкритись у момент $\theta = \pi + \alpha$. Тому, інтегруючи (6) за початкових умов $i_3(\pi + \alpha) = 0$, знайдемо закон зміни струму через другий тиристор БК та фазний реактор

$$i_3(\theta) = \frac{U_m}{X} \left(\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) (\pi + \alpha - \theta) + \left(1 + \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{\rho} - \alpha \right) \right) \frac{\rho}{2} (\pi + \alpha - \theta)^2 \right). \quad (30)$$

Прирівнюючи (30) до нуля, знайдемо кут вимкнення другого тиристора БК α_{sw2}

$$\alpha_{sw2} = \pi + \alpha - \frac{2\alpha - 2\pi}{1 - \alpha\rho + \rho\pi}. \quad (31)$$

У разі несиметричного керування тиристорами БК достатньо визначити струм через другий тиристор та фазний реактор. Другий тиристор БК має відкритись у момент $\theta = \frac{5\pi}{2} - \alpha$. Тому, після інтегрування (6) за початкових умов $i_4\left(\frac{5\pi}{2} - \alpha\right) = 0$, отримаємо вираз для визначення цього струму

$$i_4(\theta) = \frac{U_m}{X} \left(\left(-\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{\pi} \right) \left(\frac{5\pi}{2} - \alpha - \theta \right) + \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{\rho} + \alpha \right) \right) \frac{\rho}{2} \left(\frac{5\pi}{2} - \alpha - \theta \right)^2 \right). \quad (32)$$

Кут вимкнення другого тиристора БК знайдемо, виходячи з умови $i_4(\theta) = 0$,

$$\alpha_{sw3} = \frac{5\pi}{2} - \alpha - \frac{\pi - 2\alpha}{1 + \alpha\rho - \frac{\rho\pi}{2}}. \quad (33)$$

Підставляючи вирази (27)...(33) у формули (1)...(3) та інтегруючи їх за допомогою системи Mathematica 5.0, отримаємо інтегральні показники енергетичного процесу в СТК при його живленні напруженою пилкоподібної форми. Оскільки отримані вирази є досить громіздкими, то подавати їх в тексті недоцільно. Натомість нижче подаються виконані на основі цих розрахунків відповідні графіки зміни реактивної потужності $Q_*(\alpha)$ (рис. 7), споживаної активної потужності $P_*(\alpha)$ та питомої споживаної активної потужності $P_{Q*}(\alpha)$ (рис. 8).

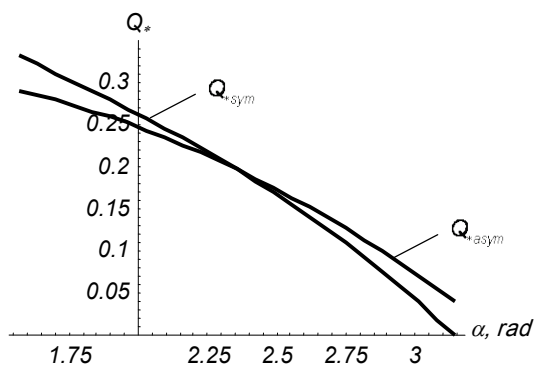


Рис. 7. Графіки зміни реактивної потужності СТК для пилкоподібної форми напруги живлення

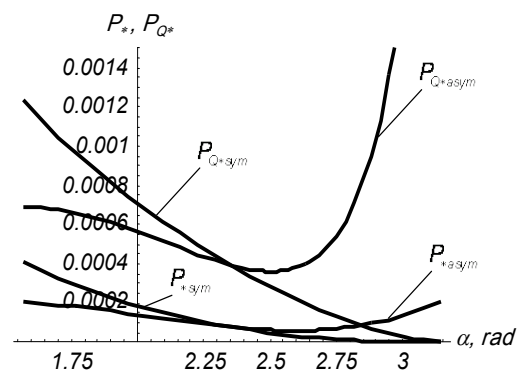


Рис. 8. Графіки зміни споживаної активної потужності та її питомого значення для пилкоподібної форми напруги живлення

Аналіз кривих на рис. 7 показує, що режими роботи БК несуттєво впливають на характер зміни реактивної потужності на відміну від базового варіанта та варіанта, коли СТК живиться напругою прямокутної форми. В даному випадку незалежно від режиму роботи БК величина реактивної потужності зменшується при збільшенні кута керування α на всьому діапазоні.

Питома споживана активна потужність при симетричному керуванні зі збільшенням кута керування α зменшується (рис. 8). У найгіршому випадку, коли $\alpha = \frac{\pi}{2}$, на генерацію кожного 1

МВАр реактивної потужності витрачається активна потужність величиною 1233 Вт, що в 1,65 разів менше, ніж у базовому варіанті та в 1,33 рази менше, ніж у СТК, який живиться напругою прямокутної форми. Тобто симетричний режим у цьому випадку найекономічніший порівняно зі всіма іншими варіантами. При несиметричному керуванні тиристорами БК питома споживана активна

потужність буде найменшою при $\alpha = \frac{7\pi}{9}$. У цьому випадку на генерацію кожного 1 МВАр

реактивної потужності витрати активної потужності складають 367 Вт, тобто вони у 5,54 рази менші, ніж у базовому варіанті та в 1,29 рази менші, ніж у СТК, який живиться напругою прямокутної форми. Але в діапазоні зміни кута керування α від $\frac{17\pi}{18}$ до π питома споживана активна

потужність дещо зростає. У цих умовах доречно обмежити діапазон регулювання кута керування α межами економічної доцільності. Комбінований спосіб керування тиристорами СТК, коли при

кутах керування α від $\frac{\pi}{2}$ до $\frac{5\pi}{6}$ БК працює у несиметричному режимі, а при кутах керування від

$\frac{5\pi}{6}$ до π — у симетричному, дозволяє мінімізувати питому споживану активну потужність на всьому діапазоні регулювання.

Висновки

1. Вперше запропоновано підхід, коли ФКП використовується для формування на затискачах СТК напруг живлення полігональної форми.

2. Проведено аналіз інтегральних показників енергетичного процесу в СТК при його живленні напругами синусоїдної (базовий варіант), прямокутної та пилкоподібної форми.

3. Доведено економічну ефективність СТК при його живленні напругами прямокутної та пилкоподібної форми у порівнянні з базовим варіантом.

4. Запропоновано здійснювати оптимізацію режимів роботи СТК при його живленні напругами полігональної форми за критерієм мінімуму питомої споживаної активної потужності при генерації реактивної потужності.

5. Встановлено, що, незважаючи на найнижчу величину питомої активної потужності, що споживається СТК, який живиться напругою пилкоподібної форми, остаточний вибір варіанта живлення треба здійснювати з урахуванням функціональних можливостей СТК (діапазон регулювання

реактивної потужності, лінійність реактивної потужності (залежно від кута керування), здатність підтримувати заданий рівень реактивної потужності, незалежність характеру зміни реактивної потужності від режиму керування) та режимів роботи мереж промислових підприємств.

6. Запропоновано для мінімізації споживання активної потужності в СТК, що живляться напругами полігональної форми, застосовувати комбінований метод керування тиристорами СТК, який полягає у перемиканні режимів роботи БК залежно від потрібного кута керування α .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рогальський Б. С., Петухов М. В., Грицюк Ю. В. Методи розрахунку економічно доцільної потужності компенсаторів реактивної потужності при наявності в його мережах синхронних машин і (або) тиристорних статичних компенсаторів реактивної потужності // Промислова електроенергетика та електротехніка. «Промелектро». — 2006. — № 3.
2. Петухов М. В., Гадай А. В., Грицюк Ю. В. Оптимізація режимів роботи статичних компенсаторів реактивної потужності // Збірник праць IV Міжнародної наукової конференції «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств». — Маріуполь: ВПЦ ПДТУ, 2000.
3. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. О методах расчёта реактивной мощности при несинусоидальных режимах // Промышленная энергетика. — 1985. — № 12.
4. Сосков А. Г., Соскова И. А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. — К.: Карвелла, 2005.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження

Надійшла до редакції 6.02.07
Рекомендована до друку 14.03.07

Грицюк Юрій Віталійович — аспірант, **Петухов Микола Васильович** — доцент.

Кафедра електропостачання, Луцький державний технічний університет;

Рогальський Броніслав Станіславович — професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження; **Свиридов Микола Павлович** — професор кафедри електричних станцій та систем.

Вінницький національний технічний університет