

УДК 621.314

Ю. В. Грицюк, асп.;

М. В. Петухов, к. т. н., доц.;

Б. С. Рогальський, д. т. н., проф.

## ЗАСТОСУВАННЯ АМПЛІТУДНО-МОДУЛЬОВАНОЇ НАПРУГИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

*Досліджено вплив амплітудно-модульованої напруги живлення на енергетичні показники статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності з заземленою нейтраллю у разі симетричного або несиметричного керування тиристорами бітиристорних ключів. Виявлено фактори, що дозволяють оптимізувати режими роботи компенсатора, а також підвищити його економічну ефективність як джерела реактивної потужності.*

### Вступ

Спотворення синусоїдної форми кривих напруг і струмів в електричних мережах виникають, здебільшого, через нелінійний характер параметрів їх структурних елементів. Це відбувається, переважно, через вплив вентильних пристроїв (вставок постійного струму, тягових установок постійного струму, випрямлячів, інверторів тощо), електромагнітних апаратів та електричних машин із насиченими магнітопроводами, коронування ліній електропередачі.

Спотворення форми кривих струмів і напруг таке як поява вищих гармонік в електричних мережах, крім зниження якості електроенергії та збільшення втрат активної потужності, може приводити до виникнення досить небезпечних надструмів і перенапруг внаслідок резонансних явищ на окремих гармоніках. В загальному випадку криві напруги в електричних мережах можуть розглядатись як амплітудно-фазово-модульовані коливання з випадковим або детермінованим законом зміни амплітуди та початкової фази [1].

### Постановка задачі

Несинусоїдність форми кривої напруги живлення суттєво впливає на енергетичні процеси в статичних тиристорних компенсаторах (СТК) реактивної потужності. Наприклад, у разі живлення СТК амплітудно-модульованими напругами з детермінованими законами зміни амплітуди за певних умов спостерігаються стрибки реактивної потужності [2].

*Метою* дослідження енергетичних процесів в СТК реактивної потужності є виявлення можливості використання амплітудно-модульованої напруги живлення для підвищення економічної ефективності застосування компенсатора в якості джерела реактивної потужності.

У разі однотональної амплітудної модуляції напруги мережі, яка здійснюється за допомогою фільтрокомпенсувального пристрою (ФКП), вираз для знаходження напруги живлення на затискачах СТК матиме вигляд

$$u(\theta) = U_m (1 + q \cos \theta) \sin \theta = U_m (\sin \theta + 0,5q \sin 2\theta), \quad (1)$$

де  $\theta = \omega t$ ;  $\omega$  — циклічна частота напруги живлення;  $U_m$  — амплітудне значення напруги живлення;  $q$  — глибина модуляції, причому  $0 \leq q \leq 2$ .

Розглянемо вплив амплітудно-модульованої напруги живлення з детермінованим законом зміни амплітуди на інтегральні показники енергетичного процесу в СТК із заземленою нейтраллю у разі симетричного та несиметричного керування тиристорами бітиристорних ключів (БК) компенсатора. При симетричному керуванні зі збільшенням кута керування  $\alpha$  струм через обидва тиристри БК зменшується. При несиметричному керуванні струм через перший тиристор БК зменшується, а через другий — збільшується. В схемі СТК із заземленою нейт-

раллю струм через БК в кожній із трьох фаз не залежить від струму інших фаз, визначається величиною фазної напруги та характеризується такими самими співвідношеннями між кутами керування тиристорами  $\alpha$ , кутами вимкнення  $\alpha_{\text{вим}}$ , провідностями  $\lambda$ , кутами зсуву фаз навантаження  $\varphi$ , що і для однофазної схеми. Тому інтегральні показники енергетичного процесу СТК можна визначити, розглядаючи процеси тільки в одній із фаз.

### Результати досліджень

У разі визначення показників енергетичного процесу СТК доречно застосовувати інтегральні методи, 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 знайдена шляхом ортогоналізації напруги  $u(t)$  чи струму  $i(t)$  за інтегралом Рімана [4]

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

величина споживаної активної потужності у фазному реакторі — як скалярний добуток  $u(t)$  та  $i(t)$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt, \quad (3)$$

величина споживаної активної потужності в тиристорі за умови, що основним джерелом нагрівання є втрати у стані прямої провідності — за формулою [5]

$$P_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^T i_T(t) u_T(t) dt = U_0 I_{\text{сер}} + R_\partial I_T^2, \quad (4)$$

де  $U_0$ ,  $R_\partial$  — відповідно порогова напруга та диференційний опір прямої ділянки вольт-амперної характеристики тиристора;  $I_{\text{сер}}$ ,  $I_T$  — відповідно середнє та діюче значення струму через тиристор, а величина питомої споживаної активної потужності у разі генерування реактивної — за виразом

$$P_Q = \frac{P + P_T}{Q}. \quad (5)$$

Друге рівняння Кірхгофа для електричного кола, до складу якого входять БК і фазний реактор, у випадку, коли один із тиристорів БК відкритий, має вигляд

$$X \frac{di(\theta)}{d\theta} + Ri(\theta) = u(\theta), \quad (6)$$

де  $X = \omega L$  та  $R$  — відповідно, реактивний і активний опори фазного реактора.

Застосовуючи для розв'язку диференційного рівняння (6) метод Лагранжа, можна знайти струм, який тече через відкритий тиристор БК і фазний реактор

$$i(\theta) = e^{-\rho\theta} \left( \int u(\theta) e^{\rho\theta} d\theta + A \right), \quad (7)$$

де  $\rho = \frac{R}{X}$  — відносний опір фазного реактора;  $A$  — стала інтегрування, яка визначається початковими умовами.

Після зміни полярності, прикладеної до кола напруги живлення, тиристор БК автоматично закривається під час переходу струму  $i(\theta)$  через нульову позначку. Момент переходу струму через нуль визначає кут вимкнення тиристора.

Реальні потужні реактори, які застосовуються в СТК, характеризуються дуже малим відносним опором, тобто для них  $\rho \ll 1$ . Це дає можливість суттєво спростити вирази для струмів за формулою (7) та отримати аналітичні залежності (2)—(5) для інтегральних показників енергетичного процесу в СТК у прийнятій формі.

Проведемо розрахунок інтегральних показників енергетичного процесу в СТК із заземленою нейтраллю, який живиться амплітудно-модульованою напругою (рис. 1). В якості фазних реакторів застосовуються реактори типу РКОС-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  $X = 31,3$  Ом, середні втрати активної потужності в номінальному режимі  $\Delta P_{\text{сер}} = 8154,5$  Вт, активний опір реактора

$$R = \frac{\Delta P_{\text{сер}}}{I_n^2} = \frac{8154,5}{385^2} = 0,055 \text{ Ом},$$

$$\rho = \frac{0,055}{31,3} = 1,757 \cdot 10^{-3}.$$

В СТК застосовуються тиристори Т253-500 з такими паспортними даними: амплітудне значення напруги живлення  $U_m = 6$  кВ, порогова напруга  $U_0 = 1,4$  В, диференційний опір  $R_\theta = 0,9 \cdot 10^{-3}$  Ом.

Коли здійснюється симетричне керування тиристорами, то у разі подачі в момент  $\theta = \alpha$  керуючого імпульсу на перший тиристор БК він відкривається і через нього та фазний реактор у відповідності з (7) буде текти струм

$$i_1(\theta) = \frac{I_m}{\sqrt{1 + \rho^2}} \left( \sin(\theta - \beta_1) - \sin(\alpha - \beta_1) e^{\rho(\alpha - \theta)} \right) + \frac{0,5qI_m}{\sqrt{4 + \rho^2}} \left( \sin(2\theta - \beta_2) - \sin(2\alpha - \beta_2) e^{\rho(\alpha - \theta)} \right), \quad (8)$$

де  $I_m = \frac{U_m}{X}$  — амплітудне значення струму,  $\beta_1 = \arctg \frac{1}{\rho}$ ,  $\beta_2 = \arctg \frac{2}{\rho}$ .

Оскільки  $\rho \ll 1$ , а кут провідності тиристора в квазіусталеному режимі  $\lambda \leq \pi$ , то  $e^{\rho(\alpha - \theta)} \approx 1$  і вираз (8) можна записати у спрощеному вигляді

$$i_1(\theta) = \frac{I_m}{\sqrt{1 + \rho^2}} \left( \sin(\theta - \beta_1) - \sin(\alpha - \beta_1) \right) + \frac{0,5qI_m}{\sqrt{4 + \rho^2}} \left( \sin(2\theta - \beta_2) - \sin(2\alpha - \beta_2) \right). \quad (9)$$

Не порушуючи еквівалентності виразу (9), його можна подати таким чином

$$i_1(\theta) = \frac{I_m}{\sqrt{1 + \rho^2}} \left( \sin(\theta - \beta_1) - \sin(\alpha - \beta_1) \right) + \frac{0,5qI_m}{\sqrt{4 + \rho^2}} \left( \sin(2\theta - 2\beta_1 + 2\beta_1 - \beta_2) - \sin(2\alpha - 2\beta_1 + 2\beta_1 - \beta_2) \right). \quad (10)$$

Кути  $\beta_1$  та  $\beta_2$  близькі один до одного, оскільки різниця між ними становить лише  $\beta_2 - \beta_1 = \arctg \frac{2}{1,757 \cdot 10^{-3}} - \arctg \frac{1}{1,757 \cdot 10^{-3}} = 8,785 \cdot 10^{-4}$ . Тому можна вважати, що  $\beta_1 \approx \beta_2$ .

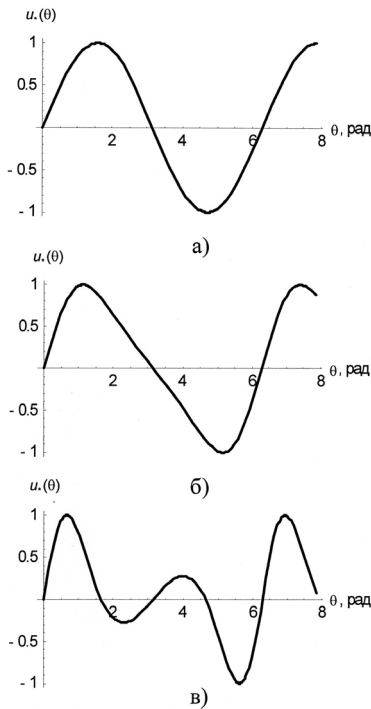


Рис. 1. Амплітудно-модульована напруга живлення СТК для різних  $q$ : а)  $q = 0$ ; б)  $q = 0,5$ ; в)  $q = 1,5$

Тоді  $2\beta_1 - \beta_2 \approx \beta_2 = \arctg \frac{1}{1,757 \cdot 10^{-3}} = 1,5690 \approx \frac{\pi}{2}$ . З урахуванням цих міркувань вираз (10) має

вигляд

$$i_1(\theta) = \frac{I_m}{\sqrt{1+\rho^2}} (\sin(\theta - \beta_1) - \sin(\alpha - \beta_1)) + \frac{0,5qI_m}{\sqrt{4+\rho^2}} (\cos(2\theta - 2\beta_1) - \cos(2\alpha - 2\beta_1)). \quad (11)$$

Перший тиристор БК вимикається, коли струм  $i_1(\theta)$  переходить через нуль. Прирівнюючи до нуля вираз (11) та розв'язуючи тригонометричне рівняння, знайдемо кути вимикання першого тиристора БК:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\text{вим11}} &= \pi + 2\beta_1 - \alpha, \quad \text{якщо } 0 \leq q \leq \frac{\sqrt{4+\rho^2}}{2\sqrt{1+\rho^2}}, \quad \beta_1 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} + \beta_1; \\ \alpha_{\text{вим12}} &= \pi + 2\beta_1 - \alpha, \quad \text{якщо } \frac{\sqrt{4+\rho^2}}{2\sqrt{1+\rho^2}} \leq q \leq 2, \quad \beta_1 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{гр}}; \\ \alpha_{\text{вим13}} &= \beta_1 + \arcsin\left(\frac{\sqrt{4+\rho^2}}{q\sqrt{1+\rho^2}} - \sin(\alpha - \beta_1)\right), \quad \text{якщо } \frac{\sqrt{4+\rho^2}}{2\sqrt{1+\rho^2}} \leq q \leq 2; \\ \alpha_{\text{гр}} &\leq \alpha \leq \pi - \arccos\frac{1}{q}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де  $\alpha_{\text{гр}} = \beta_1 - \arcsin\left(1 - \frac{\sqrt{4+\rho^2}}{q\sqrt{1+\rho^2}}\right)$  — граничний кут керування тиристором.

Із виразу (12) випливає, що для  $0 \leq q \leq \frac{\sqrt{4+\rho^2}}{2\sqrt{1+\rho^2}}$  тривалість провідного стану першого тиристо-

ра БК складає  $\pi + 2\beta_1 - 2\alpha$ . У разі глибшої модуляції, тобто, коли  $\frac{\sqrt{4+\rho^2}}{2\sqrt{1+\rho^2}} \leq q \leq 2$ , тривалість

провідного стану тиристора буде такою ж, як і в попередньому випадку, але за умови, що кут керування не перевищує  $\alpha_{\text{гр}}$ . Однак, коли  $\alpha \geq \alpha_{\text{гр}}$ , внаслідок біфуркації струму, тривалість провідного

стану тиристора стрибком зменшується до величини  $\beta_1 + \arcsin\left(\frac{\sqrt{4+\rho^2}}{q\sqrt{1+\rho^2}} - \sin(\alpha - \beta_1)\right) - \alpha$ .

Якщо під час від'ємної півхвилі напруги живлення подати керуючий імпульс на другий тиристор БК в момент  $\theta = \pi + \alpha$ , то тиристор відкриється і через нього та фазний реактор згідно з (7) буде текти струм

$$i_2(\theta) = \frac{I_m}{\sqrt{1+\rho^2}} (\sin(\theta - \beta_1) + \sin(\alpha - \beta_1)) + \frac{0,5qI_m}{\sqrt{4+\rho^2}} (\sin(2\theta - \beta_2) - \sin(2\alpha - \beta_2)). \quad (13)$$

Виходячи з тих же міркувань, що застосовувались для знаходження величини струму  $i_1(\theta)$ , вираз (13) можна записати у вигляді

$$i_2(\theta) = \frac{I_m}{\sqrt{1+\rho^2}} (\sin(\theta - \beta_1) + \sin(\alpha - \beta_1)) + \frac{0,5qI_m}{\sqrt{4+\rho^2}} (\cos(2\theta - 2\beta_1) - \cos(2\alpha - 2\beta_1)). \quad (14)$$

Прирівнюючи вираз (14) до нуля, отримаємо тригонометричне рівняння для визначення кута вимкнення другого тиристора БК, яке має лише один дійсний корінь

$$\alpha_{\text{вим2}} = 2\pi + 2\beta_1 - \alpha. \quad (15)$$

Кут вимкнення (15) не залежить від глибини модуляції  $q$ . Тривалість провідного стану другого тиристора БК складає  $\pi + 2\beta_1 - 2\alpha$ .

Враховуючи зазначені вище особливості роботи тиристорів БК СТК у разі його живлення амплітудно-модульованою напругою, визначимо у відносних одиницях інтегральні показники енергетичного процесу (2)—(5) при симетричному керуванні тиристорами.

Коли  $0 \leq q \leq \frac{\sqrt{4 + \rho^2}}{2\sqrt{1 + \rho^2}}$ , а кут керування тиристорами  $\alpha$  змінюється в межах від  $\beta_1$  до  $\frac{\pi}{2} + \beta_1$ ,

то реактивна потужність, яку генерує СТК, дорівнює

$$Q_{*сим} = \frac{Q_{сим}}{U_m I_m} = -\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\alpha_{вим11}} i_{*1}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta + \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{вим2}} i_{*2}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta \right), \quad (16)$$

активна потужність, яку споживає СТК, становить

$$P_{*сим} = \frac{P_{сим}}{U_m I_m} = \frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\alpha_{вим11}} i_{*1}(\theta) u_*(\theta) d\theta + \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{вим2}} i_{*2}(\theta) u_*(\theta) d\theta \right), \quad (17)$$

активна потужність, яка споживається тиристорами СТК, складає

$$P_{T*сим} = \frac{P_{Tсим}}{U_m I_m} = \frac{1}{2\pi} \left( \gamma_0 \int_{\alpha}^{\alpha_{вим11}} i_{*1}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\alpha}^{\alpha_{вим11}} i_{*1}^2(\theta) d\theta - \right. \\ \left. - \gamma_0 \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{вим2}} i_{*2}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{вим2}} i_{*2}^2(\theta) d\theta \right), \quad (18)$$

де  $i_{*k}(\theta) = \frac{i_k(\theta)}{I_m}$ ,  $k = 1, 2$ ;  $u_*(\theta) = \frac{u(\theta)}{U_m}$ ;  $\frac{du_*(\theta)}{d\theta} = \cos \theta + q \cos 2\theta$ ;

$$\gamma_0 = \frac{U_0}{U_m} = \frac{1,4}{6 \cdot 10^3} = 2,33333 \cdot 10^{-4};$$

$$\rho_{\partial} = \frac{R_{\partial}}{X} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{31,3} = 2,875 \cdot 10^{-5}.$$

У разі глибокої амплітудної модуляції напруги живлення, коли  $\frac{\sqrt{4 + \rho^2}}{2\sqrt{1 + \rho^2}} \leq q \leq 2$ , інтегральні показники енергетичного процесу в СТК будуть визначатися по-різному, залежно від того, в яких межах знаходиться кут керування тиристорами  $\alpha$ .

Коли кут  $\alpha$  змінюється в межах від  $\beta_1$  до  $\alpha_{гр}$ , то інтегральні показники енергетичного процесу СТК визначаються за формулами (16)—(18).

Зі зміною кута  $\alpha$  в межах від  $\alpha_{гр}$  до  $\pi - \arccos \frac{1}{q}$  величина генерованої реактивної потужності СТК складає

$$Q_{*сим} = -\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\alpha_{вим13}} i_{*1}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta + \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{вим2}} i_{*2}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta \right), \quad (19)$$

величина споживаної активної потужності СТК дорівнює

$$P_{*сим} = \frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\alpha_{вим13}} i_{*1}(\theta) u_*(\theta) d\theta + \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{вим2}} i_{*2}(\theta) u_*(\theta) d\theta \right), \quad (20)$$

величина споживаної активної потужності в тиристорах СТК становить

$$P_{T^*_{\text{сим}}} = \frac{1}{2\pi} \left( \gamma_0 \int_{\alpha}^{\alpha_{\text{вим13}}} i_{*1}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\alpha}^{\alpha_{\text{вим13}}} i_{*1}^2(\theta) d\theta - \gamma_0 \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{\text{вим2}}} i_{*2}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{\text{вим2}}} i_{*2}^2(\theta) d\theta \right). \quad (21)$$

Коли  $\pi - \arccos \frac{1}{q} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} + \beta_1$ , то інтегральні показники енергетичного процесу СТК визначаються лише роботою другого тиристора БК

$$Q^*_{\text{сим}} = -\frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{\text{вим2}}} i_{*2}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta; \quad (22)$$

$$P^*_{\text{сим}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{\text{вим2}}} i_{*2}(\theta) u_*(\theta) d\theta; \quad (23)$$

$$P_{T^*_{\text{сим}}} = \frac{1}{2\pi} \left( -\gamma_0 \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{\text{вим2}}} i_{*2}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\pi+\alpha}^{\alpha_{\text{вим2}}} i_{*2}^2(\theta) d\theta \right). \quad (24)$$

У несиметричному режимі роботи тиристорів БК перший тиристор працює за таким самим алгоритмом, що і в симетричному режимі, тобто тиристор відкривається з подачею імпульсів керування в момент  $\theta = \alpha$  та автоматично вимикається у відповідності з виразом (12). Для забезпечення несиметричного режиму роботи треба змінити алгоритм роботи другого тиристора БК таким чином, щоб керуючий імпульс на цей тиристор надходив в момент  $\theta = \frac{5\pi}{2} - \alpha$ . В цьому випадку,

коли кут керування  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , через перший тиристор БК буде текти максимальний струм, але в той же час другий тиристор буде закритий, оскільки у момент подачі керуючого імпульсу  $\theta = \frac{5\pi}{2} - \frac{\pi}{2} = 2\pi$  напруга живлення проходить через нуль. У разі подальшого збільшення кута  $\alpha$  струм через перший тиристор БК зменшується, а через другий тиристор збільшується. У разі подачі керуючого імпульсу на другий тиристор БК у момент  $\theta = \frac{5\pi}{2} - \alpha$  він відкривається і через нього та фазний реактор у відповідності з (7) буде текти струм

$$i_3(\theta) = \frac{I_m}{\sqrt{1+\rho^2}} (\sin(\theta - \beta_1) - \cos(\alpha + \beta_1)) + \frac{0,5qI_m}{\sqrt{4+\rho^2}} (\sin(2\theta - \beta_2) - \sin(2\alpha + \beta_2)). \quad (25)$$

На підставі таких міркувань, які були використані для визначення величини струму  $i_1(\theta)$ , вираз (25) можна записати у вигляді

$$i_3(\theta) = \frac{I_m}{\sqrt{1+\rho^2}} (\sin(\theta - \beta_1) - \cos(\alpha + \beta_1)) + \frac{0,5qI_m}{\sqrt{4+\rho^2}} (\cos(2\theta - 2\beta_1) + \cos(2\alpha + 2\beta_1)). \quad (26)$$

Прирівнюючи вираз (26) до нуля, знайдемо кут вимкнення другого тиристора БК для режиму, що розглядається

$$\alpha_{\text{вим3}} = \frac{\pi}{2} + 2\beta_1 + \alpha. \quad (27)$$

Тривалість провідного стану другого тиристора БК при несиметричному керуванні тиристорами становить  $-2\pi + 2\beta_1 + 2\alpha$ .

Коли  $0 \leq q \leq \frac{\sqrt{4+\rho^2}}{2\sqrt{1+\rho^2}}$  та  $\beta_1 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} + \beta_1$ , то інтегральні показники енергетичного процесу

СТК у разі несиметричного керування тиристорами БК визначаються за формулами

$$Q_{*несим} = -\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\alpha_{вим11}} i_{*1}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta + \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta \right); \quad (28)$$

$$P_{*несим} = \frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\alpha_{вим11}} i_{*1}(\theta) u_*(\theta) d\theta + \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) u_*(\theta) d\theta \right); \quad (29)$$

$$P_{T*несим} = \frac{1}{2\pi} \left( \gamma_0 \int_{\alpha}^{\alpha_{вим11}} i_{*1}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\alpha}^{\alpha_{вим11}} i_{*1}^2(\theta) d\theta - \gamma_0 \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}^2(\theta) d\theta \right), \quad (30)$$

де  $i_{*3}(\theta) = \frac{i_3(\theta)}{I_m}$ .

За умови глибокої модуляції напруги живлення, коли  $\frac{\sqrt{4+\rho^2}}{2\sqrt{1+\rho^2}} \leq q \leq 2$  та  $\beta_1 \leq \alpha \leq \alpha_{гр}$ , генерована реактивна, споживана активна потужності СТК, а також активна потужність, яку споживають тиристри, також визначаються за формулами (27)–(30).

Коли  $\alpha_{гр} \leq \alpha \leq \pi - \arccos \frac{1}{q}$ , то інтегральні показники енергетичного процесу СТК визначаються як

$$Q_{*несим} = -\frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\alpha_{вим13}} i_{*1}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta + \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta \right); \quad (31)$$

$$P_{*несим} = \frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\alpha_{вим13}} i_{*1}(\theta) u_*(\theta) d\theta + \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) u_*(\theta) d\theta \right); \quad (32)$$

$$P_{T*несим} = \frac{1}{2\pi} \left( \gamma_0 \int_{\alpha}^{\alpha_{вим13}} i_{*1}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\alpha}^{\alpha_{вим13}} i_{*1}^2(\theta) d\theta - \gamma_0 \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}^2(\theta) d\theta \right). \quad (33)$$

В діапазоні кута керування  $\alpha$  від  $\pi - \arccos \frac{1}{q}$  до  $\frac{\pi}{2} + \beta_1$  працює лише другий тиристор БК, тому

$$Q_{*несим} = -\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) \frac{du_*(\theta)}{d\theta} d\theta; \quad (34)$$

$$P_{*несим} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) u_*(\theta) d\theta; \quad (35)$$

$$P_{T*несим} = \frac{1}{2\pi} \left( -\gamma_0 \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}(\theta) d\theta + \rho_{\partial} \int_{\frac{5\pi}{2}-\alpha}^{\alpha_{вим3}} i_{*3}^2(\theta) d\theta \right). \quad (36)$$

За допомогою програмної системи символьної математики Mathematica 5.0 були проведені відповідні розрахунки та на їх основі побудовані графіки зміни реактивної потужності  $Q^*(\alpha)$ , споживаної активної потужності  $P^*(\alpha)$  та її питомого значення  $P_{Q^*}(\alpha)$  при симетричному (рис. 2) й несиметричному (рис. 3) керуванні тиристорами БК, якщо живлення здійснюється амплітудно-модульованою напругою.

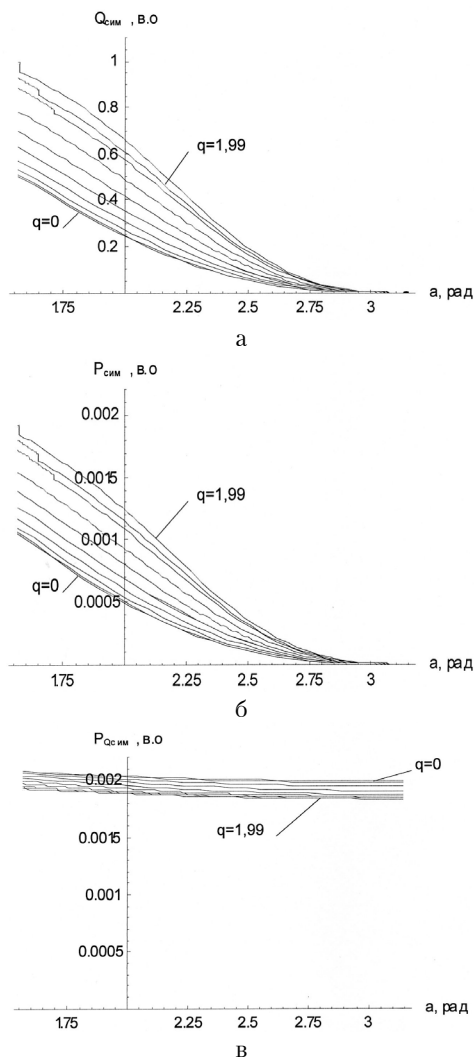


Рис. 2. Графіки залежностей  $Q_s(\alpha)$ ,  $P_s(\alpha)$  та  $P_{Q^*}(\alpha)$  при симетричному керуванні тиристорами у разі живлення СТК амплітудно-модульованою напругою

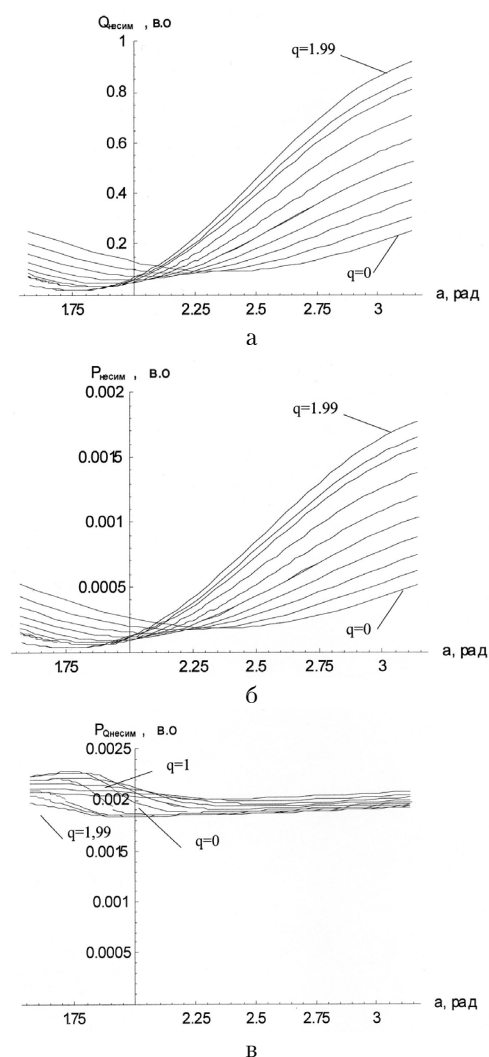


Рис. 3. Графіки залежностей  $Q_s(\alpha)$ ,  $P_s(\alpha)$  та  $P_{Q^*}(\alpha)$  при несиметричному керуванні тиристорами у разі живлення СТК амплітудно-модульованою напругою

Аналіз рис. 2, 3 показує, що на інтегральні показники енергетичного процесу, крім кута керування тиристорами  $\alpha$ , суттєво впливає глибина амплітудної модуляції  $q$ . Фактично утворюється другий канал керування енергетичним процесом в СТК. Компенсатор стає двоканальним, що підвищує його режимну гнучкість.

За відсутності модуляції, тобто коли  $q = 0$ , СТК живиться синусоїдною напругою. В роботі [3] доведено, що в цьому випадку питома значення споживаної активної потужності практично не залежить від кута керування тиристорами БК та режимів їх роботи. Це означає, що СТК не має резервів для підвищення економічної ефективності його застосування як джерела реактивної потужності.

У разі амплітудної модуляції напруги живлення та симетричного керування тиристорами БК зі збільшенням глибини модуляції  $q$  у межах від 0 до 2 відбувається зростання величини реактивної потужності, величини споживаної активної потужності, а також зниження на 7,3 % питомого значення споживаної активної потужності (рис. 2а, б, в).



Це дозволяє підвищити економічну ефективність застосування СТК як джерела реактивної потужності. У разі глибокої модуляції, коли  $\frac{\sqrt{4+\rho^2}}{2\sqrt{1+\rho^2}} \leq q \leq 2$ , під час подачі керуючих імпульсів на

тиристорі БК в момент  $\alpha = \alpha_{zp} = \beta_1 - \arcsin\left(1 - \frac{\sqrt{4+\rho^2}}{q\sqrt{1+\rho^2}}\right)$  спостерігається біфуркація струму в

колі тиристорів, яка супроводжується стрибком реактивної та споживаної активної потужностей. Причому, чим більше значення  $q$ , тим більші величини цих стрибків. Вказаний фізичний ефект дозволяє практично миттєво переходити на інший режим роботи СТК та застосовуватись при динамічній компенсації реактивної потужності.

У разі несиметричного керування тиристорами БК зі збільшенням  $q$  відбувається зміна конфігурації кривих  $Q_*(\alpha)$ ,  $P_*(\alpha)$  (рис. 3а, б), а саме, зменшуються і зміщуються в бік менших значень кутів  $\alpha$  мінімальні значення реактивної та споживаної активної потужностей; справа від точок мінімуму реактивна й споживана активна потужності СТК зростають, а зліва — зменшуються. Питоме значення споживаної активної потужності зменшується на 7,3 %, що дещо гірше, ніж при симетричному керуванні тиристорами БК, проте це обмежується діапазоном кутів керування  $\alpha$  від  $\frac{2\pi}{3}$  до  $\pi$  (рис. 3в). У разі глибокої модуляції напруги живлення при несиметричному керуванні тиристорами так само, як і при симетричному керуванні, спостерігаються стрибки реактивної та споживаної активної потужностей.

### Висновки

1. Запропоновано використовувати фільтрокомпенсувальний пристрій для формування на затискачах СТК амплітудно-модульованої напруги живлення (з детермінованими законами зміни амплітуди) з метою оптимізації режимів роботи компенсатора.

2. В процесі досліджень виявлено, що на енергетичні показники СТК, крім кута керування  $\alpha$ , суттєво впливає глибина амплітудної модуляції. Як наслідок — утворення другого каналу керування енергетичним процесом СТК. Наявність двох каналів керування підвищує режимну гнучкість компенсатора.

3. Виявлено, що у разі амплітудної модуляції напруги живлення при симетричному та несиметричному керуванні тиристорами БК, внаслідок біфуркації струму в колі тиристорів, спостерігаються стрибки генерованої реактивної потужності та споживаної активної потужності.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.
2. Петухов М. В., Грицюк Ю. В., Гадай А. В. Интегральные показатели энергетического процесса тиристорных компенсаторов реактивной мощности при их живлении від мережі обмеженої потужності // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2005. — № 15. — Ч. 2. — С. 100—104.
3. Грицюк Ю. В., Петухов М. В., Рогальський Б. С., Свиридов М. П. Оптимізація режимів роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх живленні напругами полігональної форми за критерієм мінімуму питомої споживаної активної потужності // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 2. — С. 46—55.
4. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. — М.: Энергия, 1978. — 320 с.
5. Сосков А. Г., Соскова И. А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. — К: Каравелла, 2005. — 344 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергоменеджменту

Надійшла до редакції 7.11.07  
Рекомендована до друку 5.12.07

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

Кафедра електропостачання, Луцький державний технічний університет;

**Рогальський Броніслав Станіславович** — професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергоменеджменту.

Вінницький національний технічний університет