

УДК 621.315.1.024:621.311.6

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПРИМУСОВОЮ КОМУТАЦІЄЮ**С. П. Літковець, М. В. Пстухов**

Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018. E-mail: SergiyLitkov@mail.ru

Роботу присвячено дослідженню статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності з примусовою комутацією за наявності вольтододавання й визначенню інтегральних показників його енергетичного процесу для двох стратегій керування реактивною потужністю: із зсувом та без зсуву за основною гармонікою. Показано, що цей компенсатор є системою зі змінною структурою та параметрами. Під час протікання струму через фазний реактор у квазіусталеному режимі роботи протягом періоду напруги живлення статичний компенсатор на першій ділянці часової діаграми буде споживати активну потужність із мережі, а на третій – її генерувати. Якщо за рахунок вольтододавання збільшити амплітуду напруги живлення на третій ділянці часової діаграми, то статичний тиристорний компенсатор із примусовою комутацією буде генерувати більше активної потужності. Внаслідок цього мінімізується величина питомої споживаної активної потужності, що є критерієм економічної ефективності компенсатора як джерела реактивної потужності. Запропонований спосіб підвищення енергетичної ефективності статичного тиристорного компенсатора з примусовою комутацією дозволяє реалізувати енергозберігаючі технології управління ним і забезпечити конкурентоспроможність відносно інших статичних компенсаторів. Крім того, застосування вольтододавання дозволяє збільшити діапазон регулювання кута керування комутуючими тиристорами, в якому забезпечуються мінімальні значення величини питомої споживаної активної потужності.

Ключові слова: статичні компенсатори, примусова комутація, вольтододавання.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИЕЙ**С. П. Литковец, Н. В. Петухов**

Луцкий национальный технический университет

ул. Львовская, 75, г. Луцк, Украина, 43018. E-mail: SergiyLitkov@mail.ru

Работа посвящена исследованию статического тиристорного компенсатора реактивной мощности с принудительной коммутацией при наличии вольтодобавки и определению интегральных показателей его энергетического процесса для двух стратегий управления реактивной мощностью: со сдвигом и без сдвига по основной гармонике. Показано, что этот компенсатор является системой с переменной структурой и параметрами. Во время протекания тока через фазный реактор в квазиустановившемся режиме работы в течение периода напряжения питания статический компенсатор на первом участке временной диаграммы будет потреблять активную мощность из сети, а на третьем – ее генерировать. Если за счет вольтодобавки увеличить амплитуду напряжения питания на третьем участке временной диаграммы, то статический тиристорный компенсатор с принудительной коммутацией будет генерировать больше активной мощности. Вследствие этого минимизируется величина удельной потребляемой активной мощности, что является критерием экономической эффективности компенсатора как источника реактивной мощности. Предложенный способ повышения энергетической эффективности статического тиристорного компенсатора с принудительной коммутацией позволяет реализовать энергосберегающие технологии управления им и обеспечить конкурентоспособность по отношению к другим статическим компенсаторам. Кроме того, применение вольтодобавки позволяет увеличить диапазон регулирования угла управления коммутирующими тиристорами, в котором обеспечиваются минимальные значения величины удельной потребляемой активной мощности.

Ключевые слова: статические компенсаторы, принудительная коммутация, вольтодобавка.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Статичні тиристорні компенсатори (СТК) з примусовою комутацією поділяються на компенсатори з прямою та непрямою компенсацією. СТК з прямою компенсацією реактивної потужності потребують спеціальних швидкодіючих тиристорів із малим часом відновлення запірних властивостей, мають складну схемну конфігурацію [1, 2], низьку надійність [3], малий запас за перенапругою [4–6], низьку перевантажувальну здатність [7–9] та недостатню швидкість регулювання [10–12]. Непряма компенсація реактивної потужності може бути реалізована на базі тиристорних регуляторів змінної напруги з примусовою комутацією

[13, 14], які забезпечують постійну в часі комутуючу здатність та незалежність параметрів вузла комутації від параметрів навантаження. Однак під час керування реактивною потужністю СТК з примусовою комутацією споживає значну частину активної потужності. Крім того, при живленні компенсатора синусоїдною напругою (базовий варіант) зміною кутів керування комутуючих тиристорів не вдається знизити величину питомої споживаної активної потужності [15], яка є критерієм економічної ефективності СТК як джерела реактивної потужності. Певною мірою покращити ситуацію можливо за рахунок живлення СТК з примусовою комутацією від

С1 перезаряджається через тиристор VS1 та обмотку дроселя L1, набуваючи полярність, яка вказана на рис. 1 у дужках. Для замикання тиристора VS1 відмикається тиристор VS3 й конденсатор C3 перезаряджається через тиристор VS3 та обмотку дроселя L2. На обмотці дроселя L2 наводиться електрорушійна сила, під дією якої тиристор VS1 замикається. При відмиканні тиристора VS3 забезпечується екіпотенціальність точок *a3* та нейтралі *N* трансформатора й фазний реактор LR1 буде закороченим через випрямляч VD3, що забезпечує неперервність струму в разі активно-індуктивного навантаження. Для замикання тиристора VS3 відмикається тиристор VS2, при цьому забезпечується екіпотенціальність точок *a2* та нейтралі *N* трансформатора й до фазного реактора LR1 прикладається негативна півхвиля напруги живлення. Конденсатор C2 перезаряджається через тиристор VS2 та обмотку дроселя L2, набуваючи полярність, яка вказана на рис. 1 у дужках. Для замикання тиристора VS2 відмикається тиристор VS3 й конденсатор C3 перезаряджається через тиристор VS3 та обмотку дроселя L3. На цій обмотці наводиться електрорушійна сила, під дією якої тиристор VS2 замикається. Процеси, які відбуваються у

фазах *B* та *C* статичного компенсатора реактивної потужності, протікають аналогічно й незалежно один від одного.

СТК реактивної потужності з примусовою комутацією є системою зі змінною структурою та параметрами. На часовій діаграмі можна виділити три ділянки, математичний опис яких буде різним (рис. 2). На першій ділянці напруга живлення й струм через фазний реактор мають однакові знаки, і тому статичний компенсатор споживає активну потужність з мережі. На другій ділянці, коли напруга живлення відсутня, а фазні реактори замикаються на коротко для забезпечення безперервності струму, СТК не споживає активної потужності з мережі. На третій ділянці напруга живлення та струм через фазний реактор мають різні знаки й статичний компенсатор генерує активну потужність у мережу. Якщо за рахунок вольтододавання збільшити амплітуду напруги живлення, то в цьому випадку СТК з примусовою комутацією буде генерувати більше активної потужності. За рахунок цього можна істотно зменшити величину споживаної активної потужності під час регулювання реактивної потужності.

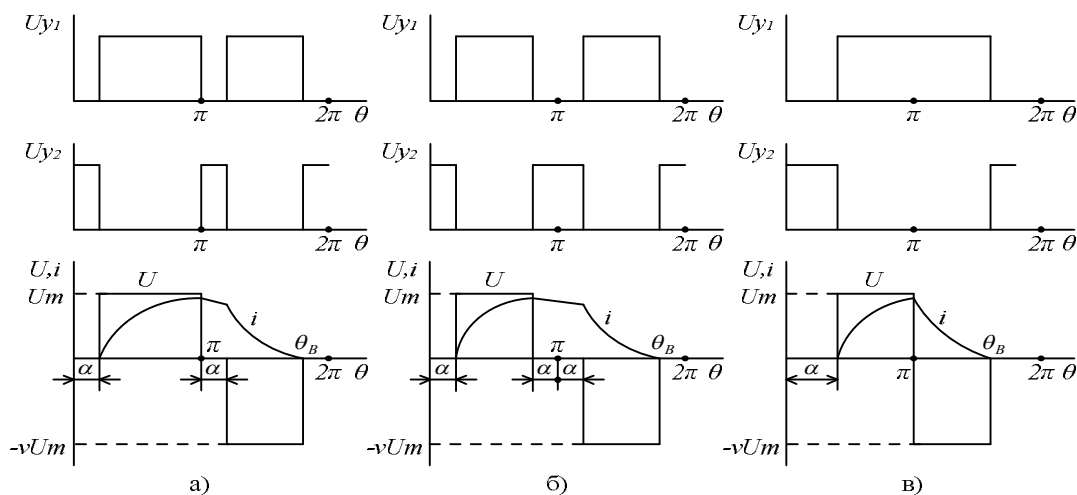


Рисунок 2 – Форми напруг та струмів на реакторах у СТК з примусовою комутацією:

а) керування зі зсувом за основною гармонікою; б), в) керування без зсуву за основною гармонікою відповідно для першого та другого варіанту

Узагальнене рівняння електричної рівноваги кола для всіх трьох ділянок часової діаграми буде мати вигляд:

$$x_{|2-n|} \frac{di_n(\theta)}{dt} + r_{|2-n|} i_n(\theta) = (2-n) \nu^{\frac{n-1}{2}} U_m, \quad (1)$$

де $n = 1, 2, 3$ – номер ділянки; U_m – амплітудне значення напруги; $\theta = \omega t$ – час у відносних одиницях; ω – 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 опір вторинної обмотки трансформатора; r_p та x_p – відповідно активний та реактивний опір фазного реактора; ν – коефіцієнт вольтододавання. Вираз

(1) справедливий для всіх способів керування СТК з примусовою комутацією.

При керуванні СТК реактивної потужності з примусовою комутацією та глухо заземленою нейтраллю за наявності вольтододавання зі зсувом за основною гармонікою (рис. 2,а) на першій ділянці в момент α відкривається перший комутуючий тиристор і до сумарного активно-індуктивного опору вторинної обмотки трансформатора й фазного реактора прикладається напруга U_m . Через фазний реактор починає протікати струм:

$$i_1(\theta) = \frac{I_m}{\rho_I} [1 - e^{\rho_I(\alpha - \theta)}], \quad (2)$$

де $\rho_1 = \frac{r_1}{x_1}$ – питомий опір першої ділянки.

На другій ділянці в момент π перший комутуючий тиристор закривається, а другий відкривається, фазний реактор замикається накоротко і через нього починає протікати струм:

$$i_2(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} [1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}] e^{\rho_0(\pi - \theta)}, \quad (3)$$

де $\rho_0 = \frac{r_0}{x_0}$ – питомий опір другої ділянки.

На третій ділянці в момент $\pi + \alpha$ знову відкривається перший комутуючий тиристор і до сумарного активно-індуктивного опору вторинної обмотки трансформатора й фазного реактора прикладається напруга $-vU_m$. У цьому випадку через фазний реактор протікає струм:

$$i_3(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} (v + e^{-\rho_0\alpha} - e^{\rho_1(\alpha - \pi)} e^{-\rho_0\alpha}) \times e^{\rho_1(\pi + \alpha - \theta)} - \frac{vI_m}{\rho_1}. \quad (4)$$

Для нормальної роботи СТК реактивної потужності з примусовою комутацією та глухо заземленою нейтраллю за наявності вольтододавання необхідно закрити перший комутуючий тиристор у момент переходу струму $i_3(\theta)$ через нуль, тобто в момент

$$\theta_o = \pi + \alpha + \frac{1}{\rho_1} \ln \frac{v + e^{-\rho_0\alpha} - e^{\rho_1(\alpha - \pi)} e^{-\rho_0\alpha}}{v}. \quad (5)$$

Реактивну потужність можна розглядати як інтегральну міру швидкості зміни напруги живлення в часі [18]:

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \int_0^T i(\theta) \frac{du(\theta)}{d\theta} d\theta. \quad (6)$$

З урахуванням виразів (2)–(6) величина реактивної потужності у відносних одиницях при керуванні зі зсувом за основною гармонікою для СТК з примусовою комутацією та глухо заземленою нейтраллю буде складати:

$$Q^*(\alpha) = \frac{I}{\rho_1\pi} [1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)} + v(1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}) e^{-\rho_0\alpha}]. \quad (7)$$

Величина споживаної активної потужності у відносних одиницях при керуванні зі зсувом за основною гармонікою для СТК з примусовою комутацією та глухо заземленою нейтраллю становить:

$$P^*(\alpha) = \frac{I}{\rho_1\pi} \left[\pi - \alpha + v^2(\theta_o - \pi - \alpha) + \frac{I}{\rho_1} e^{\rho_1(\alpha - \pi)} - \frac{I}{\rho_1} - \frac{v}{\rho_1} (e^{-\rho_0\alpha} - e^{\rho_1(\alpha - \pi)} e^{-\rho_0\alpha}) \right]. \quad (8)$$

Величину питомої споживаної активної потужності можна оцінити за виразом

$$P_Q(\alpha) = \frac{P^*(\alpha)}{Q^*(\alpha)}. \quad (9)$$

Керування без зсуву за основною гармонікою можна виконати за двома варіантами (рис. 2,б,в). Для обох варіантів на першій ділянці буде протікати той же струм, що й при регулюванні зі зсувом за основною гармонікою, оскільки рівняння електричної рівноваги й початкові умови збігаються. Для першого варіанту (рис. 2,б) на другій і третій ділянках будуть протікати такі струми:

$$i_2(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} [1 - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)}] e^{\rho_0(\pi - \alpha - \theta)}; \quad (10)$$

$$i_3(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} (v + e^{-\rho_0 2\alpha} - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)} e^{-\rho_0 2\alpha}) \times e^{\rho_1(\pi + \alpha - \theta)} - \frac{vI_m}{\rho_1}. \quad (11)$$

Величини реактивної та споживаної активної потужності з урахуванням виразів (2), (10), (11) для СТК реактивної потужності з примусовою комутацією будуть складати:

$$Q^*(\alpha) = [1 - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)} + v(1 - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)}) e^{-\rho_0 2\alpha}] \frac{1}{\rho_1\pi}; \quad (12)$$

$$P^*(\alpha) = \frac{I}{\rho_1\pi} \left[\pi - 2\alpha + v^2(\theta_o - \pi - \alpha) + \frac{I}{\rho_1} e^{\rho_1(2\alpha - \pi)} - \frac{I}{\rho_1} - \frac{v}{\rho_1} (e^{-\rho_0 2\alpha} - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)} e^{-\rho_0 2\alpha}) \right]. \quad (13)$$

$$\text{де } \theta_o = \pi + \alpha + \frac{1}{\rho_1} \ln \frac{v + e^{-\rho_0 2\alpha} - e^{\rho_1(2\alpha - \pi)} e^{-\rho_0 2\alpha}}{v}.$$

Для другого варіанту (рис. 1,в) на другій ділянці протікає струм, який складає:

$$i_2(\theta) = -\frac{vI_m}{\rho_1} + \frac{I_m}{\rho_1} [v + 1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}] e^{\rho_0(\pi - \theta)}. \quad (14)$$

Величини реактивної та споживаної активної потужності у відносних одиницях з урахуванням виразів (2), (14) становлять

$$Q^*(\alpha) = \frac{I + v}{\rho_1\pi} [1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}]; \quad (15)$$

$$P^*(\alpha) = \frac{I}{\rho_1\pi} \left[\pi - \alpha + v^2(\theta_o - \pi) + \frac{I}{\rho_1} e^{\rho_1(\alpha - \pi)} - \frac{I}{\rho_1} - \frac{v}{\rho_1} (1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}) \right], \quad (16)$$

$$\text{де } \theta_o = \pi + \frac{1}{\rho_1} \ln \frac{v + 1 - e^{\rho_1(\alpha - \pi)}}{v}.$$

Нехай як живлячий трансформатор для СТК реактивної потужності з примусовою комутацією застосовується трифазний трансформатор ТРДН–25000/110–76У1 з РПН на двох розщеплених обмотках на стороні низької напруги $\pm 15\% \pm 10$ ступенів, $-12\% - 8$ ступенів. У функції фазних реа-

кторів виберемо реактори РКOC–3900/10–У1. Питомі опори на першій та третій ділянках СТК із примусовою комутацією однакові й становлять величину $\rho_l = \frac{r_p + r_2}{x_p + x_2} = \frac{0,055 + 0,0185}{31,3 + 0,4052} = 2,318 \cdot 10^{-3}$, питомий опір на другій ділянці складає

$$\rho_0 = \frac{r_p}{x_p} = \frac{0,055}{31,3} = 1,757 \cdot 10^{-3}$$

(7)–(9), (12)–(13), (15)–(16) побудовано залежності $Q^*(\alpha)$, $P^*(\alpha)$, $P_Q(\alpha)$ СТК реактивної потужності з примусовою комутацією та глухо заземленою нейтраллю для двох способів керування реактивною потужністю й різних коефіцієнтів вольтододавання v .

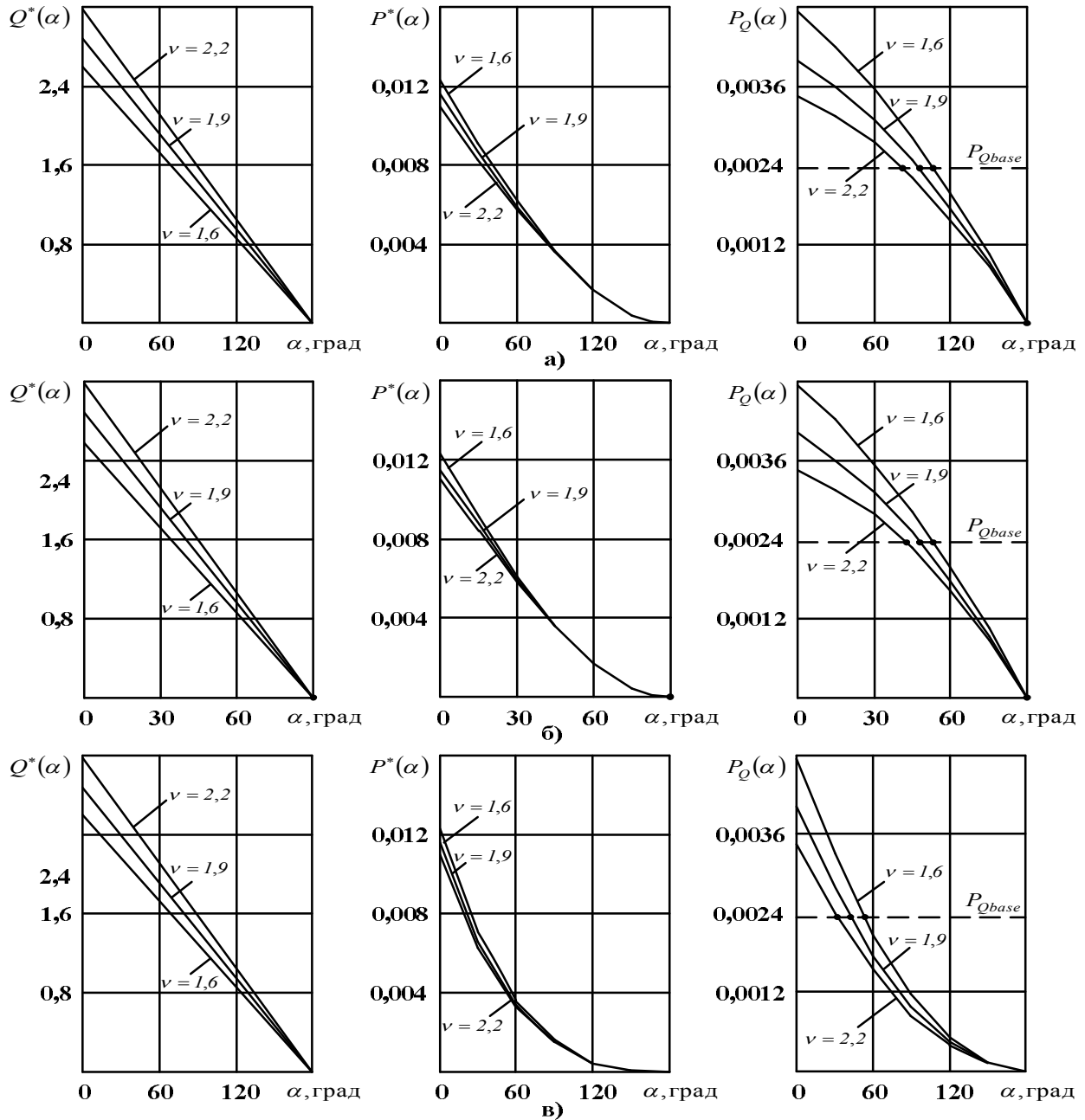


Рисунок 3 – Залежності реактивної потужності $Q^*(\alpha)$, споживаної активної потужності $P^*(\alpha)$ та питомої споживаної активної потужності $P_Q(\alpha)$ від кута керування α СТК реактивної потужності з примусовою комутацією та глухо заземленою нейтраллю за наявності вольтододавання у разі керування: а) зі зсувом за основною гармонікою; б), в) без зсуву за основною гармонікою відповідно для першого та другого варіантів

ВИСНОВКИ. Величина реактивної потужності СТК з примусовою комутацією фактично є лінійною функцією кута керування комутуючими тиристорами α і при збільшенні коефіцієнта вольтододавання ν зростає. Величина споживаної активної потужності нелінійно залежить від кута керування α , але при збільшенні коефіцієнта вольтододавання ν зменшується. У результаті дії цих двох протилежних тенденцій величина питомої споживаної активної потужності $P_Q(\alpha)$ істотно зменшується. Вона стає не тільки меншою за величину економічно обґрунтованого рівня $P_{Qbase} = 2,318 \cdot 10^{-3}$, який визначається базовим варіантом, але й конкурентноздатною відносно однійменних величин інших СТК, в яких застосовуються енергозберігаючі технології. Застосування вольтододавання дозволяє збільшити діапазон регулювання кута керування α , в якому забезпечуються мінімальні значення величини питомої споживаної активної потужності, і тим самим реалізувати енергетично ефективні технології керування реактивною потужністю з мінімальними втратами активної потужності. Найбільш вагомі результати може дати керування СТК без зсуву за основною гармонікою за другим варіантом, оскільки воно має найбільший діапазон регулювання кута керування α .

ЛІТЕРАТУРА

1. Rashid M. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. – Oxford: Elsevier Inc., 2011. – 1362 с.
2. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах: пер. тематического сб. РГ Исслед. Ком. № 38 СИГРЭ / Под ред. И.И. Карташева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 174 с.
3. Сегеда М.С. Моделирование электромагнитных процессов электрической сети со статическим тиристорным компенсатором: дис. канд. техн. наук: спец. 05.14.02. – Львів, 1987. – 160 с.
4. Wilamowski B., Irwin J. Power Electronics and Motor Drives. – Boca Raton: Taylor and Francis Group, LLC, 2011. – 962 с.
5. Magalhaes de Oliveira M. Power Electronics for Mitigation of Voltage Sags and Improved Control of AC Power Systems: doctoral dissertation. – Stockholm, 2000. – 281 с.
6. Padiyar K. Facts: Controllers in Power Transmission and Distribution. – New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers, 2007. – 532 с.
7. Dixon J., del Valle Y., Orchard M., Ortuzar M., Moran L., Maffrand C. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active

Power Filter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2003. – Iss. 50, № 5. – PP. 982–989.

8. Dixon J., Moran L., Rodriguez J., Domke R. Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Iss. 93, № 12. – PP. 2144–2164.
9. Dixon J., Garcia J., Moran L. Control System for Three-Phase Active Power Filter Which Simultaneously Compensates Power Factor and Unbalanced Loads // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1995. – Iss. 42, № 6. – PP. 636–641.
10. Moran L., Ziogas P., Joos G. Analysis and Design of a Three-Phase Synchronous Solid-State VAR Compensator // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1989. – Iss. 25, № 4. – PP. 598–608.
11. Wanner E., Mathys R., Hausler M. Compensation Systems for Industry // Brown Boveri Review. – 1983. – № 70. – PP. 330–340.
12. Hingorani N., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – New York: IEEE Press, 2000. – 452 p.
13. Руденко В.С., Сенько В.І., Чиженко І.М. Преобразовательная техника: посібник для вузів за спец. «Промислова електроніка». – К.: Вища школа, 1978. – 424 с.
14. Патент України на корисну модель UA 69876, МПК G05F 1/70 (2006.01). Пристрій для регулювання реактивної потужності / М.В. Петухов, С.П. Літковець. – № u201115153; заявл. 21.12.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9/2012.
15. Интегральные показатели энергетического процесса статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности с примусовою комутацією: Матеріали III-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 28–30 червня 2010 р., Луцьк–Шацькі озера // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах. – Луцьк: ЛНТУ, 2010. – С. 151–153.
16. Літковець С.П., Петухов М.В. Глобальне керування енергетичними процесами в асинхронних статичних тиристорних компенсаторах реактивної потужності з примусовою комутацією // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – № 1 (30). – С. 34–38.
17. Патент України на корисну модель UA 79407, МПК G05F 1/70 (2006.01). Статичний регулятор реактивної потужності / М.В. Петухов, С.П. Літковець. – № u201210710; заявл. 12.09.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8/2013.
18. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

THE WAY TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF STATIC THYRISTOR COMPENSATORS OF REACTIVE POWER WITH FORCED COMMUTATION

S. Litkovets, M. Petukhov

Lutsk National Technical University

vul. Lvivska, 75, Lutsk, 43018, Ukraine. E-mail: SergiyLitkov@mail.ru

The work is dedicated to the research of static thyristor compensator of reactive power with forced commutation under conditions of volt adding and to determining integral indicators of its energy process for two management strategies of reactive power: with shift and without shift by the main harmonic. It is shown that this compensator is a system with variable structure and parameters. During the current flowing through the phase reactor in quasi steady mode of the work over the period of voltage supply the static compensator on the first section of the time chart will consume active power from the grid, and the third section will generate it. If the amplitude of the voltage supply is increased by volt adding on the third section of the time chart, the static thyristor compensator with forced commutation will generate more active power. As a result, the value of the specific active power consumption is minimized, that proves economic efficiency of the compensator as a source of reactive power. The suggested way of increasing energy efficiency of static thyristor compensator of reactive power with forced commutation allows to implement power saving technologies of its running and to ensure competitiveness in comparison with other static compensators. Furthermore, the use of volt adding allows increasing the range of adjustment of the control angle of switching thyristors, where the minimum value of the specific active power consumption is provided.

Key words: static compensators, forced commutation, volt adding.

REFERENCES

- Rashid, M. (2011), *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications*, Elsevier Inc., Oxford, UK.
- Kartashov, I.I. (1990), *Statycheskye kompensatory reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh sistemah* [Static Compensators of Reactive Power in Electric Systems: translation thematic collection Working Group Research Committee of CIGRE], no. 38, Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
- Segeda, M.S. (1987), «Modeling of Electromagnetic Processes of Electrical Network with Static Thyristor Compensator», Thesis of Cand. Sci. (Tech.), 05.14.02, Lviv Order of Lenin Polytechnic Institute Named of Lenin Komsomol, Lviv. (in Russian)
- Wilamowski, B. and Irwin, J. (2011), *Power Electronics and Motor Drives*, Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, USA.
- Magalhaes de Oliveira, M. (2000), «Power Electronics for Mitigation of Voltage Sags and Improved Control of AC Power Systems», Doctoral Dissertation (Engineering), Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Padiyar, K. (2007), *FACTS: Controllers in Power Transmission and Distribution*, New Age International (P) Limited, Publishers, New Delhi, India.
- Dixon, J., del Valle, Y., Orchard, M., Ortuzar, M., Moran, L. and Maffrand, C. (2003), «A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 50, no. 5, pp. 982–989.
- Dixon, J., Moran, L., Rodriguez, J. and Domke, R. (2005), «Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review», *Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, no. 12, pp. 2144–2164.
- Dixon, J., Garcia, J. and Moran, L. (1995), «Control System for Three-Phase Active Power Filter Which Simultaneously Compensates Power Factor and Unbalanced Loads», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 42, no. 6, pp. 636–641.
- Moran, L., Ziozas, P. and Joos, G. (1989), «Analysis and Design of a Three-Phase Synchronous Solid-State VAR Compensator», *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 25, no. 4, pp. 598–608.
- Wanner, E., Mathys, R. and Hausler, M. (1983), «Compensation Systems for Industry», *Brown Boveri Review*, Vol. 70, pp. 330–340.
- Hingorani, N. and Gyugyi, L. (2000), *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press, New York, USA.
- Rudenko, V.S., Senko, V.I. and Chizhenko, I.M. (1978), *Preobrazovatel'naya Technika* [Converting Technique], Vyshcha shkola, Kyiv. (in Russian)
- Petukhov, M.V. and Litkovets, S.P. (2012), *Pristryi dlya regulyuvannya reaktivnoy potuzhnosti* [Device for Reactive Power Regulation], Patent for useful model 69876 UA, Bulletin no. 9, Kyiv. (in Ukrainian)
- Litkovets, S.P. and Petukhov, M.V. (2010), «Integrated indicators of energy process of static thyristor compensators of reactive power with forced commutation», *Pidvischennya rivnya efektyvnosti energospozhivannya v elektrotehnichnih prystroyah i sistemah. Materiali III Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii* [Increasing the level of efficiency of energy consumption in electro technical devices and systems. Materials of the 3rd International Scientific Conference], Lutsk, LNTU, June 28–30, 2010, pp. 151–153. (in Ukrainian)
- Litkovets, S.P. and Petukhov, M.V. (2012), «Global Control of Energy Processes in Asynchronous Static Thyristor Compensators of Reactive Power with Forced Commutation», *Power Engineering: Economics, Technique, Ecology*, Vol. 1, no. 30, pp. 34–38. (in Ukrainian)
- Petukhov, M.V. and Litkovets, S.P. (2013), *Statychnyj regulator reaktivnoi potuzhnosti* [Static Regulator of Reactive Power], Patent for useful model 79407 UA, Bulletin no. 8, Kyiv. (in Ukrainian)
- Majewsky, O.A. (1978), *Enerhetycheskye pokazateli ventilyh preobrazovateley* [Energy Indicators of Valve Converters], Energiya, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 18.04.2014.