

**УМОВИ ПЕРЕЗАРЯДУ КОНДЕНСАТОРІВ КОМУТУЮЧОЇ ЛАНКИ ТРИФАЗНОГО  
МОСТОВОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА**

**В.С. Бойко**, докт. техн. наук, **О.В. Шкардун**  
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.  
E-mail: [VSBoiko@bigmir.net](mailto:VSBoiko@bigmir.net).

*Розробка авторів спрямована на створення сучасного пристрою силової електроніки з високими енергетичними характеристиками. У схемі трифазного мостового компенсаційного перетворювача роль комутатора виконує трифазна група повністю керованих приладів. Таке технічне рішення дає змогу забезпечити керований перезаряд конденсаторів комутуючої ланки. При цьому кінцевою метою є створення такої комутуючої напруги, яка за формою і величиною здатна забезпечити компенсаційний режим роботи силових електричних вентилів, тобто їхню роботу з випереджаючим кутом регулювання. Умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки досліджено у трьох режимах: регулювання здійснюється у межах роботи силового електричного вентиля своєї фази, наступної та попередньої. Доведено, що трифазний мостовий перетворювач здатний ефективно працювати у компенсаційному режимі, якщо для перезаряду конденсаторної батареї група повністю керованих приладів комутуючої ланки регулюється у межах роботи силового електричного вентиля своєї чи наступної фази. Порівняння характеристик комутуючої напруги за різних режимів її формування здійснено методом гармонічного аналізу. Бібл. 8, рис. 5, табл. 2.*

**Ключові слова:** конденсаторна батарея, комутатор, комутуюча напруга, гармоніки, електричний вентиль.

**Вступ.** Компенсаційні перетворювачі зарекомендували себе як високоефективні пристрої енергетичної електроніки, призначені для живлення потужних споживачів у кольоровій металургії, хімічних виробництвах, електрифікованому транспорті та т. ін. Характерною особливістю електромагнітних процесів, що мають місце у режимі електроживлення такими перетворювачами, є особливі умови комутації струму силовими електричними вентилями. Вони здійснюють комутацію струму не лише за рахунок ЕРС вторинних обмоток перетворювального трансформатора, а й за безпосередньої участі додаткової напруги, яка створюється в результаті перезаряду конденсаторної батареї комутуючої ланки перетворювача складовими струму навантаження та комутації. При цьому компенсаційні перетворювачі здатні не лише компенсувати власну реактивну енергію, а й, у разі необхідності, генерувати реактивну енергію у мережу [1, 2, 3].

Комутуюча ланка перших з розроблених у Київському політехнічному інституті компенсаційних перетворювачів складалася з трифазної конденсаторної батареї та трифазного зрівноважувального реактора (ТЗР). Приклад комплектації нульового перетворювача комутуючою ланкою наведено на схемі рис. 1 [4].

Подібні технічні рішення застосовувалися іншими авторами для переведення у компенсаційний режим роботи перетворювачів, реалізованих за іншими схемами [5, 6].

Серед пристроїв енергетичної електроніки великої потужності, які працюють у режимі випрямляча, досить поширеними є ті, дія яких ґрунтується на застосуванні трифазної мостової схеми. Вона має багато переваг перед більшістю відомих в енергетичній електроніці схем, але не позбавлена й недоліків. Основний з них полягає у тому, що навіть за діючої реалізації та роботі у режимі випрямляча, вона має невисокий коефіцієнт потужності за рахунок некомпенсованої потужності комутаційного процесу.

Відомо, що спроби підвищення енергетичних характеристик трифазного мостового перетворювача мали місце. Наприклад, у [7] наведено результати досліджень трифазного мостового перетворювача з конденсаторами в силових колах. Перетворювач не знайшов практичного застосування через невисоку енергетичну ефективність технічного рішення.

Питання щодо комплектації трифазного мостового перетворювача комутуючою ланкою з ТЗР (як на схемі рис. 1) не розглядалося. Основною перепоною була наявність трифазного зрівноважувального реактора, громіздкого, високовартісного елемента з суттєвими втратами електричної енергії. Для такого високотехнологічного рішення, яким є трифазний мостовий перетворювач, застосування ТЗР скоріш за все було недоречним.

Сучасний розвиток напівпровідникової елементної бази перетворювальної техніки дає змогу вирішити проблему перезаряду конденсаторної батареї у компенсаційному перетворювачі без застосування трифазного зрівноважувального реактора. Останній є пасивним елементом комутуючої ланки і застосовується для поділу випрямленого струму перетворювача на три однакові частини. При цьому створюються шляхи для проходження струмів через фази конденсаторної батареї та перезаряду її. Напряга фаз конденсаторної батареї, яка є комутуючою напругою перетворювача, забезпечує компенсаційний режим його роботи.

Сенс застосування замість трифазного зрівноважувального реактора трифазної групи повністю керованих приладів (наприклад, IGBT-транзисторів) полягає у тому, щоб забезпечити керованість процесу перезаряду конденсаторів комутуючої ланки. Основними факторами керованості є частота перемикання транзисторів та момент їхнього включення відносно інтервалу роботи силових електричних вентилів фаз перетворювача. Основним результатом керованості процесу перезаряду конденсаторів комутуючої ланки є формування комутуючої напруги, яка за своєю формою і величиною здатна забезпечити компенсаційний режим роботи перетворювача.

Авторами запатентовано два варіанти переведу трифазного мостового перетворювача у компенсаційний режим роботи [8]. Один з можливих варіантів наведено на схемі рис. 2. Це схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою. Інший варіант – схема з двома комутуючими ланками. Оскільки в обох варіантах трифазного мостового компенсаційного перетворювача процес формування комутуючої напруги однаковий, у подальшому досліджується процес перезаряду конденсаторів комутуючої ланки у перетворювачі, реалізованому за схемою рис. 2.

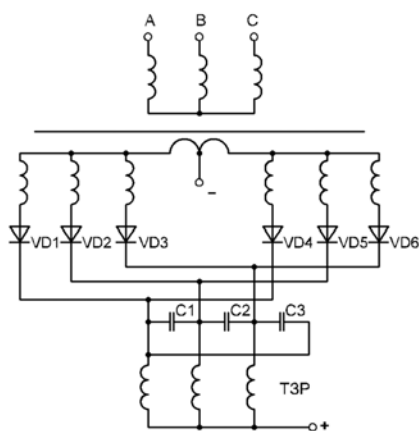


Рис. 1

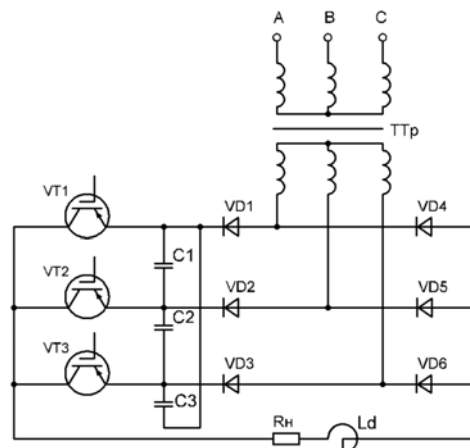


Рис. 2

Таке технічне рішення полягає у переводі однієї з трифазних груп силових електричних вентилів у компенсаційний режим роботи. Комутуюча ланка перетворювача за схемою рис. 2 складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазної групи повністю керованих приладів. Перетворювач працює у режимі випрямляча.

**Мета роботи.** На основі аналізу величини і форми комутуючої напруги зробити висновок щодо режимів керування перезарядом комутуючих конденсаторів, перспективних для застосування під час практичної реалізації перетворювачів за розробленою авторами схемою трифазного мостового компенсаційного перетворювача з комутуючою ланкою, що містить трифазну групу повністю керованих приладів.

**Результати досліджень.** Аналіз проведено за спрощених умов, коли нехтуються індуктивні опори кола змінного струму та активні опори обладнання перетворювача і ошиновки, а індуктивність згладжувального дроселя у колі навантаження вважається нескінченно великою. За таких умов комутація струму силовими електричними вентилями вважається практично миттєвою. Також не розглядалося питання щодо впливу індуктивності кола навантаження на процес формування

комутуючої напруги. У дослідженні також вважалося, що струм силових електричних вентилів в інтервалі їхньої роботи є ідеально згладженим.

Система ЕРС трифазного перетворювального трансформатора (ТТр) є стандартною трифазною системою прямого чергування фаз

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 6 + \psi); \\ e_B &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 2 + \psi); \\ e_C &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6 + \psi), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $E_m$  – амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора;  $\vartheta$  – поточна змінна;  $\psi$  – початкова фаза напруги під час включення вентиля.

Діоди анодної групи VD4, VD5 і VD6 вступають в роботу один раз за період і проводять струм протягом однієї третини періоду напруги мережі живлення. Комутація струму діодів здійснюється лінійною напругою вторинної обмотки перетворювального трансформатора.

Оскільки компенсаційний перетворювач, що досліджується, містить одну комутуючу ланку, підключену до електричних вентилів катодної частини перетворювача, то тільки вони працюють у компенсаційному режимі і мають випереджаючий кут регулювання. Його величина, як і енергетичні показники трифазного мостового компенсаційного перетворювача, залежить від величини і форми комутуючої напруги, дослідження процесу формування якої і складає основний зміст даної публікації.

Технічна відмінність перетворювачів нового покоління полягає у заміні трифазного зрівноважувального реактора трифазною групою повністю керованих приладів. І якщо метою є доведення доцільності такого технічного рішення, то порівнювати потрібно не лише криві комутуючої напруги за різних режимів роботи розробленого перетворювача між собою, а й з кривою комутуючої напруги у перетворювачі попереднього покоління, близьким за процесом перезаряду конденсаторів у перетворювачі за схемою рис. 2.

Тож спочатку припустимо, що у досліджуваному перетворювачі комутуюча ланка складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазного зрівноважувального реактора. Виходячи з алгоритму комутації силових електричних вентилів катодної групи, який задається системою ЕРС вторинної обмотки перетворювального трансформатора і комутуючою напругою конденсаторів комутуючої ланки, струм фази конденсаторної батареї має на періоді три інтервали. Якщо за початок відліку прийняти момент вступу в роботу діода VD1 фази А під час переходу струму з вентиля VD3 на вентиль VD1, слід розглядати формування комутуючої напруги фази СЗ конденсаторної батареї, оскільки якраз вона бере участь у комутаційному процесі.

Аналітичний розрахунок кривої комутуючої напруги за інтервалами здійснимо, використовуючи співвідношення

$$u_C = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_C(0). \quad (2)$$

Кількість інтервалів кривої комутуючої напруги така ж, як і кількість інтервалів кривої струму

I інтервал:  $i_C = -I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 3;$

$$u_{C(1)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_C(0) = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0). \quad (3)$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = 2\pi / 3, \quad u_{C(1)k} = -\frac{2\pi I_d}{9\omega C} + u_C(0).$

II інтервал:  $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 3;$

$$u_{C(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(1)k} = -\frac{2\pi I_d}{9\omega C} + u_C(0) = u_{C(2)k}. \quad (4)$$

III інтервал:  $i_C = I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi / 3;$

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(2)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{2\pi I_d}{9\omega C} + u_C(0). \quad (5)$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = 2\pi/3$ ,  $u_{C(3)k} = u_C(0)$ .

Початкове значення кривої комутуючої напруги  $u_C(0)$  розрахуємо, виходячи з того, що середнє значення кривої  $u_C(\vartheta)$  на періоді дорівнює нулю. При цьому отримаємо

$$u_C(0) = \frac{I_d}{3\omega C} \cdot \frac{4\pi}{9}. \quad (6)$$

Таким же є і максимальне значення кривої  $u_C(\vartheta)$ . Виходячи з (3) – (5), її форма досить проста. На першій третині періоду вона зменшується від додатного максимального значення до половини його від'ємного значення, на другій третині періоду не змінюється, а на третій – зростає до додатного максимального значення.

Порівняння величини і форми комутуючої напруги компенсаційних перетворювачів попереднього покоління і нового проведемо, застосовуючи метод гармонічного аналізу.

Використовуючи (3) – (5), закономірність зміни кривої комутуючої напруги по інтервалах на періоді частоти мережі живлення запишемо так:

$$\begin{aligned} \text{I)} \quad u_{CI}(\vartheta) &= U_{mC} \left(1 - \frac{9}{4\pi} \vartheta\right), \quad 0 \leq \vartheta \leq 2\pi/3; \\ \text{II)} \quad u_{CII}(\vartheta) &= -U_{mC}/2, \quad 2\pi/3 \leq \vartheta \leq 4\pi/3; \\ \text{III)} \quad u_{CIII}(\vartheta) &= U_{mC} \left(\frac{9}{4\pi} \vartheta - 3.5\right), \quad 4\pi/3 \leq \vartheta \leq 2\pi. \end{aligned}$$

Коефіцієнти ряду косинуса

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_C(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/3} u_{CI}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta + \frac{1}{\pi} \int_{2\pi/3}^{4\pi/3} u_{CII}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta + \frac{1}{\pi} \int_{4\pi/3}^{2\pi} u_{CIII}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta.$$

Здійснивши інтегрування, отримаємо

$$a_k = \frac{9U_{mC}}{4\pi^2 k^2} \left(2 - \cos k \frac{2\pi}{3} - \cos k \frac{4\pi}{3}\right). \quad (7)$$

З останнього випливає, що коефіцієнти ряду косинуса гармонік кратних трьом не містять. Для гармонік інших порядків, враховуючи, що  $-\cos k \frac{2\pi}{3} - \cos k \frac{4\pi}{3} = 1$ ,

$$a_k = \frac{27U_{mC}}{4\pi^2 k^2} = \frac{1}{\pi k^2} I_d \frac{1}{\omega C}. \quad (8)$$

Коефіцієнти ряду синуса

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_C(\vartheta) \sin k \vartheta d\vartheta = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/3} u_{CI}(\vartheta) \sin k \vartheta d\vartheta + \frac{1}{\pi} \int_{2\pi/3}^{4\pi/3} u_{CII}(\vartheta) \sin k \vartheta d\vartheta + \frac{1}{\pi} \int_{4\pi/3}^{2\pi} u_{CIII}(\vartheta) \sin k \vartheta d\vartheta.$$

Здійснивши інтегрування, отримаємо

$$b_k = \frac{9U_{mC}}{4\pi^2 k^2} \left(-\sin k \frac{2\pi}{3} - \sin k \frac{4\pi}{3}\right) = 0. \quad (9)$$

Крива не містить гармонік ряду синуса.

Якщо б у комутуючій ланці трифазного мостового компенсаційного перетворювача застосовувався трифазний зрівноважувальний реактор, то форма кривої комутуючої напруги була б незмінною з коефіцієнтом гармонік  $K_r = 0.267$  і максимальним значенням за виразом (6).

У компенсаційних перетворювачах нового покоління на величину і форму комутуючої напруги впливають такі фактори як момент включення в роботу повністю керованих приладів комутуючої ланки та діапазон регулювання. Тому дослідження умов перезаряду конденсаторів комутуючої ланки перетворювача за схемою рис. 2 поділено на три режими:

- регулювання здійснюється у межах роботи силового електричного вентиля своєї фази;
- регулювання здійснюється у межах роботи силового електричного вентиля наступної фази;
- регулювання здійснюється у межах роботи силового електричного вентиля попередньої фази.

Величина комутуючої напруги залежить від ємності фази конденсаторної батареї комутуючої ланки і величини струму навантаження. Для об'єктивного порівняння результатів досліджень у різних режимах роботи перетворювача ці величини вважаються незмінними.

**Регулювання у межах роботи силового електричного вентиля своєї фази.**

За початок відліку також прийнято момент вступу в роботу діода VD1 фази A під час переходу струму з вентиля VD3 на вентиль VD1. Оскільки розглядається режим регулювання моменту вступу в роботу транзистора VT1 комутуючої ланки в межах роботи силового електричного вентиля VD1, діапазон регулювання складає третину періоду. Іншими словами, затримка моменту вступу в роботу VT1 знаходиться в межах  $0 \leq \theta \leq 2\pi/3$ .

Нехай  $\theta = \pi/3$ . Виходячи з алгоритму комутації струму силовими електричними вентилями та моменту включення транзисторів комутуючої ланки, струм фази конденсаторної батареї протягом періоду має 6 інтервалів з різною закономірністю зміни. Відповідно, і комутуюча напруга на періоді матиме таку ж кількість інтервалів. Її розрахунок за співвідношенням (2) дає наступний результат:

I інтервал:  $i_c = I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3;$

$$u_{C(1)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_C(0) = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi/3$ ,  $u_{C(1)k} = \frac{I_d}{18fC} + u_C(0)$ .

II інтервал:  $i_c = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3;$

$$u_{C(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_{C(1)k} = \frac{I_d}{18fC} + u_C(0) = u_{C(2)k}.$$

III інтервал:  $i_c = -2I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3;$

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(2)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi/3$ ,  $u_{C(3)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_C(0)$ .

IV інтервал:  $i_c = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3;$

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_{C(3)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_C(0) = u_{C(4)k}.$$

V інтервал:  $i_c = I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3;$

$$u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(4)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi/3$ ,  $u_{C(5)k} = u_C(0)$ .

VI інтервал:  $i_c = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/3;$

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_{C(5)k} = u_C(0).$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi/3$ ,  $u_{C(6)k} = u_C(0)$ .

Виходячи з того, що середнє значення кривої  $u_C(\vartheta)$  на періоді дорівнює нулю, отримаємо  $u_C(0) = 0$ . Максимальне значення комутуючої напруги  $U_{mC} = \frac{I_d}{3\omega C} \cdot \theta$  у часі збігається з початком комутації з вентиля VD3 на вентиль VD1. Її найбільше значення буде за  $\theta = 2\pi/3$ , тобто

$$U_{mC} = \frac{I_d}{3\omega C} \cdot \frac{2\pi}{3}. \quad (10)$$

Узагальнено закономірність зміни кривої комутуючої напруги по інтервалах на періоді частоти мережі живлення запишемо так:

I)  $u_{CI}(\vartheta) = U_{mC} \left(1 - \frac{2}{\theta} \vartheta\right), \quad 0 \leq \vartheta \leq \theta;$

II)  $u_{CII}(\vartheta) = -U_{mC}, \quad \theta \leq \vartheta \leq 2\pi/3;$

$$\text{III) } u_{CIII}(\vartheta) = U_{mC} \left( \frac{1}{\theta} \vartheta - \frac{2\pi}{3\theta} - 1 \right), \quad 2\pi/3 \leq \vartheta \leq (2\pi/3 + \theta);$$

$$\text{IV) } u_{CIV}(\vartheta) = 0, \quad (2\pi/3 + \theta) \leq \vartheta \leq 4\pi/3;$$

$$\text{V) } u_{CV}(\vartheta) = U_{mC} \left( \frac{1}{\theta} \vartheta - \frac{4\pi}{3\theta} \right), \quad 4\pi/3 \leq \vartheta \leq (4\pi/3 + \theta);$$

$$\text{VI) } u_{CVI}(\vartheta) = U_{mC}, \quad (4\pi/3 + \theta) \leq \vartheta \leq 2\pi.$$

Відповідно до наведених вище рівнянь, рис. 3 ілюструє динаміку зміни величини і форми комутуючої напруги у разі зміни моменту вступу в роботу транзистора VT1 в діапазоні  $0 \leq \theta \leq 2\pi/3$ .

За  $\theta = 0$  струм через конденсатори не проходить і комутуюча напруга дорівнює нулю. По мірі зростання затримки  $\theta$  величина комутуючої напруги збільшується.

Представимо криві рис. 3 рядом Фур'є. Коефіцієнти ряду косинуса

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_C(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\theta} u_{CI}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta + \int_{\theta}^{2\pi/3} u_{CII}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta + \int_{2\pi/3}^{2\pi/3+\theta} u_{CIII}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta + \int_{2\pi/3+\theta}^{4\pi/3} u_{CIV}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta + \int_{4\pi/3}^{4\pi/3+\theta} u_{CV}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta + \int_{4\pi/3+\theta}^{2\pi} u_{CVI}(\vartheta) \cos k \vartheta d\vartheta \right].$$

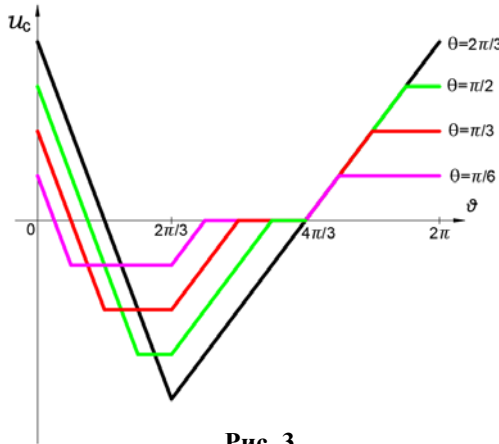


Рис. 3

Здійснивши інтегрування, отримаємо

$$a_k = \frac{2}{\pi\theta k^2} + \frac{1}{\pi\theta k^2} \left[ -2 \cos k\theta - \cos k \frac{2\pi}{3} + \cos k \left( \frac{2\pi}{3} + \theta \right) - \cos k \frac{4\pi}{3} + \cos k \left( \frac{4\pi}{3} + \theta \right) \right]. \quad (11)$$

З останнього випливає, що коефіцієнти ряду косинуса гармонік кратних трьом не містять. Ураховуючи (8), для гармонік інших порядків отримаємо

$$a_k = \frac{1}{\pi\theta k^2} \left[ 3 - 2 \cos k\theta + \cos k \left( \frac{2\pi}{3} + \theta \right) + \cos k \left( \frac{4\pi}{3} + \theta \right) \right]. \quad (12)$$

Коефіцієнти ряду синуса  $b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_C(\vartheta) \sin k \vartheta d\vartheta$ .

Здійснивши інтегрування, отримаємо

$$b_k = \frac{1}{\pi\theta k^2} \left[ -2 \sin k\theta - \sin k \frac{2\pi}{3} + \sin k \left( \frac{2\pi}{3} + \theta \right) - \sin k \frac{4\pi}{3} + \sin k \left( \frac{4\pi}{3} + \theta \right) \right].$$

З останнього випливає, що і коефіцієнти ряду синуса гармонік кратних трьом не містять. Враховуючи (9), для гармонік інших порядків отримаємо

$$b_k = \frac{1}{\pi\theta k^2} \left[ -2 \sin k\theta + \sin k \left( \frac{2\pi}{3} + \theta \right) + \sin k \left( \frac{4\pi}{3} + \theta \right) \right]. \quad (13)$$

Криві рис. 4 показують, що у разі зміни моменту включення транзистора комутуючої ланки VT1 в межах роботи силового електричного вентиля VD1, змінюється як величина комутуючої напруги, так і її форма. Гармонічний склад кривих комутуючої напруги для деяких значень  $\theta$  наведено у табл. 1.

Таблиця 1

№ гарм.	$\theta = \pi/6$			$\theta = \pi/3$			$\theta = \pi/2$		
	$a_k$	$b_k$	$A_k$	$a_k$	$b_k$	$A_k$	$a_k$	$b_k$	$A_k$
1	0.244	-0.912	0.944	0.456	-0.790	0.912	0.608	-0.608	0.860
2	0.228	-0.395	0.456	0.342	-0.197	0.395	0.304	0.000	0.304
4	0.171	-0.099	0.197	0.085	0.049	0.099	0.000	0.000	0.000
5	0.136	-0.036	0.141	0.018	0.032	0.036	0.024	-0.024	0.034
7	0.069	0.019	0.072	0.009	-0.016	0.019	0.012	0.012	0.018
8	0.043	0.025	0.049	0.021	-0.012	0.025	0.000	0.000	0.000

**Регулювання у межах роботи силового електричного вентиля наступної фази.**

Робота перетворювача у першому з досліджуваних режимів продовжуватиметься, допоки затримка включення в роботу транзистора VT1 не досягне величини  $\theta = 2\pi/3$ .

Якщо величину затримки моменту включення транзистора комутуючої ланки збільшувати, то струм фази конденсаторної батареї змінюватиметься за формою, також на періоді матиме шість інтервалів, але інтервалів з нульовим значенням не буде.

Застосувавши таку ж методику дослідження як і у першому режимі, запишемо аналітично форму кривої комутуючої напруги по ділянках періоду та представимо динаміку її зміни графічно на рис. 4.

Подання кривих комутуючої напруги рядом Фур'є показує, що коефіцієнти ряду косинуса і синуса гармонік кратних трьом не містять. Для гармонік інших порядків отримано

$$a_k = \frac{3}{2\pi^2 k^2} [3 + \cos k\theta - 2 \cos k(\frac{2\pi}{3} + \theta) + \cos k(\frac{4\pi}{3} + \theta)]; \quad (14)$$

$$b_k = \frac{3}{2\pi^2 k^2} [\sin k\theta - \sin k(\frac{2\pi}{3} + \theta) + \sin k(\frac{4\pi}{3} + \theta)]. \quad (15)$$

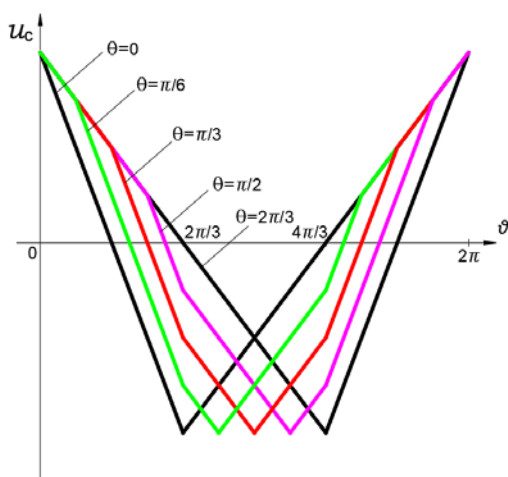
Криві рис. 4 показують, що у разі зміни моменту включення транзистора комутуючої ланки VT1 в межах роботи силового електричного вентиля VD2 максимальне значення кривої комутуючої напруги не змінюється, змінюється лише її форма. Гармонічний склад кривих комутуючої напруги для деяких значень  $\theta$  наведено у табл. 2.

**Таблиця 2**

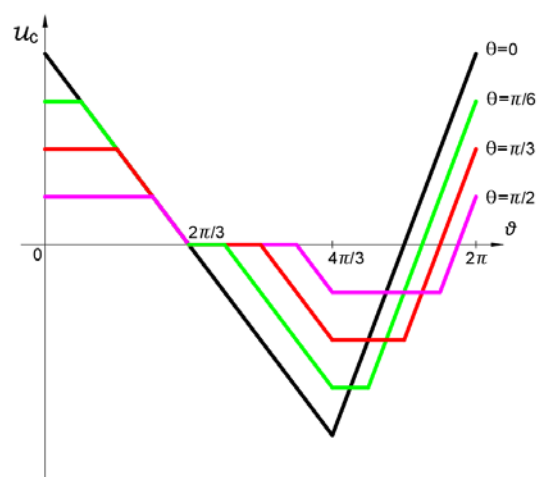
№ гарм.	$\theta = \pi/6$			$\theta = \pi/3$			$\theta = \pi/2$		
	$a_k$	$b_k$	$A_k$	$a_k$	$b_k$	$A_k$	$a_k$	$b_k$	$A_k$
1	0.851	-0.228	0.881	0.912	0.000	0.912	0.851	0.228	0.881
2	0.057	0.099	0.114	0.000	0.000	0.000	0.057	-0.099	0.114
4	0.043	0.025	0.049	0.000	0.000	0.000	0.043	-0.025	0.049
5	0.002	-0.009	0.009	0.036	0.000	0.036	0.002	0.009	0.009
7	0.001	0.005	0.005	0.019	0.000	0.019	0.001	-0.005	0.005
8	0.011	-0.006	0.012	0.000	0.000	0.000	0.011	0.006	0.012

**Регулювання у межах роботи силового електричного вентиля попередньої фази.**

Застосуємо таку ж методику аналізу, що і у двох попередніх режимах, оскільки і у цьому режимі струм фази конденсаторної батареї має на періоді шість інтервалів. Розрахуємо комутуючу напругу за окремими інтервалами і побудуємо рис. 5, який ілюструє динаміку зміни величини і форми комутуючої напруги у разі зміни моменту вступу в роботу транзистора VT1 в діапазоні  $0 \leq \theta \leq 2\pi/3$ .



**Рис. 4**



**Рис. 5**

Подання кривих рис. 5 рядом Фур'є показує, що їхній гармонічний склад не містить гармонік кратних трьом. Для гармонік інших порядків отримано наступні узагальнені вирази для розрахунку коефіцієнтів ряду косинуса і синуса

$$a_k = \frac{1}{\pi\theta k^2} [3 + \cos k\theta + \cos k(\frac{2\pi}{3} + \theta) - 2 \cos k(\frac{4\pi}{3} + \theta)]; \quad (16)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi\theta k^2} [\sin k\theta + \sin k(\frac{2\pi}{3} + \theta) - 2 \sin k(\frac{4\pi}{3} + \theta)]. \quad (17)$$

Відзначимо також, що подібно до першого з досліджених режимів роботи перетворювача у разі зміни моменту включення транзистора комутуючої ланки VT1 в межах роботи силового електричного вентиля VD3 змінюється як величина комутуючої напруги, так і її форма. Гармонічний склад кривих комутуючої напруги близький до показників першого режиму.

#### **Висновки.**

Проведене дослідження стосується умов формування комутуючої напруги трифазного мостового компенсаційного перетворювача, повністю керовані прилади комутуючої ланки якого мають одинарну частоту керування і працюють протягом третини періоду. Аналіз отриманих результатів показує доцільність застосування таких режимів роботи перетворювача, у яких повністю керовані пристрої комутуючої ланки регулюються в межах роботи силового електричного вентиля своєї чи наступної фази.

Якщо діапазон регулювання знаходиться в межах роботи силового електричного вентиля своєї фази, то зміна кута затримки вступу в роботу транзистора комутуючої ланки від 0 до  $2\pi/3$  призводить до зміни як форми, так і величини комутуючої напруги. Вона зростає від нуля до максимально можливого значення відповідно виразу (10).

Якщо діапазон регулювання знаходиться у межах роботи силового електричного вентиля наступної фази, форма комутаційної напруги змінюється, а її максимальне значення не змінюється і розраховується за виразом (10).

1. Gan Wei, Ji Hongchao, Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. IEEE PES *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Hong Kong, China, 07-10 December 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.

2. Todtermuschke K., Gensior A., Rudolph J., Weber J., Güldner H. Flatness based control of the VIENNA-rectifier allowing for reactive power compensation. 37th IEEE *Power Electronics Specialists Conference (PESC '06)*. Jeju, Korea (South), 18-22 June 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESC.2006.1712052>.

3. Trainer D., Withanage R., Whitehouse R., Cross A. Multilevel voltage source converter. Patent US No 8879291B2, 2014.

4. Чиженко И.М. Схема преобразования электрического тока звезда-прямая и обратная звезды с уравнительными катушками и коммутирующими конденсаторами. *Известия КПИ*. 1957. Том XXII. С. 179-200.

5. Зайцев А.И., Тихонов Н.К., Смирнов Ю.В. Компенсационный преобразователь. Патент РФ № 2407137, 2010.

6. Хохлов Ю.И., Федорова М.Ю. Компенсированная система электроснабжения удаленных потребителей электрической энергии. Патент РФ № 2557065, 2015.

7. Глинтерник С.Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. Л.: Наука, 1968, 308 с.

8. Бойко В.С. Трифазный мостовой компенсаційний перетворювач. Патент України № 142864, 2020.

#### **CONDITIONS FOR RECHARGING THE CAPACITORS OF THE COMMUTATING DEVICE OF A THREE-PHASE BRIDGE COMPENSATION CONVERTER**

**V.S. Boiko, O.V. Shkardun**

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
37, Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine.**

**E-mail: [VSBoiko@bigmir.net](mailto:VSBoiko@bigmir.net).**

*The development of the authors is aimed at creating a modern power electronics device with high energy characteristics. In the scheme of a three-phase bridge compensation converter, the role of the commutator is a performed by a three-phase group of fully controlled devices. This technical solution allows for controlled recharging*



of the commutating link capacitors. In this case, the ultimate goal is to create such conditions for the formation of a commutating voltage, which, in shape and magnitude, is capable of providing a compensation mode of operation of power electric diodes. The conditions for recharging the capacitors of the commutating link were studied in three modes: the adjustment is carried out within the limits of the operation of the diodes of its phase, the next and the previous one. The conditions under which a three-phase bridge converter is able to operate effectively in a compensation mode are proved. To do this, when recharging the capacitor bank, a group of fully controlled devices of the commutated link must be regulated within the operation of the power electric diode of its own or subsequent phase. Comparison of the characteristics of the commutating voltage for different modes of its formation is carried out by the method of harmonic analysis. References 8, figures 5, tables 2.

**Keywords:** capacitor battery, commutating, commutating voltage, harmonics, electric diod.

1. Gan Wei, Ji Hongchao, Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. IEEE PES *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Hong Kong, China, 07-10 December 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.
2. Todtermuschke K., Gensior A., Rudolph J., Weber J., Güldner H. Flatness based control of the VIENNA-rectifier allowing for reactive power compensation. 37th IEEE *Power Electronics Specialists Conference (PESC '06)*. Jeju, Korea (South), 18-22 June 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESC.2006.1712052>.
3. Trainer D., Withanage R., Whitehouse R., Cross A. Multilevel voltage source converter. Patent US No 8879291B2, 2014.
4. Chizhenko I.M. Electric current conversion circuit star-direct and reverse stars with equalizing coils and switched capacitors. *Izvestiia Kievskogo Pilytekhnicheskogo Instituta*. 1957. Vol. XXII. Pp. 179-200. (Rus).
5. Zaitsev A.I., Tikhonov N.K., Smirnov Yu.V. Compensating rectifier. Patent RF No 2407137, 2010. (Rus)
6. Khokhlov Yu.I., Fedorova M.Yu. Compensated power supply system for remote consumers of electrical energy. Patent RF No 2557065, 2015. (Rus).
7. Glinernik S.R. Electromagnetic processes and modes of powerful static converters. Leningrad: Nauka, 1968. 308 p. (Rus).
8. Boiko V.S. Three-phase bridge compensation converter: Patent UA No 142864, 2020. (Ukr).

Надійшла 02.01.2023  
Остаточний варіант 23.02.2023