

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ КОМУТЮЮЧОЇ ЛАНКИ ДВОМОСТОВОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗА РАХУНОК ЗБІЛЬШЕННЯ ЧАСТОТИ СТРУМУ ЇХНЬОГО ПЕРЕЗАРЯДУ

В.С. Бойко*, докт. техн. наук

НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

Е-mail: vsboiko1941@gmail.com.

Досліджується нове технічне рішення, яким є трифазний двомостовий компенсаційний перетворювач паралельного типу з однією комутуючою ланкою. Вона складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазної групи повністю керованих приладів (наприклад, IGBT). Основною метою дослідження є доведення умов, за яких забезпечується ефективне використання обладнання комутуючої ланки перетворювача і створюються такі умови формування конденсаторної напруги, за яких перетворювач набуває здатності не лише компенсувати власну реактивну енергію, а й генерувати її у мережу електропостачання. Обсяг досліджень включає аналіз режимів роботи компенсаційного перетворювача під час керування транзисторами комутуючої ланки імпульсами подвоєної, чотирикратної та восьмикратної частоти. Методика дослідження ґрунтується на гармонічному аналізі кривих струму фази конденсаторної батареї. Загальний висновок отримано зіставленням результатів аналізу за різних частот імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Бібл. 5, рис. 8, табл. 2.

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

Вступ. Одним із напрямків удосконалення пристроїв силової електроніки з метою покращення їхніх енергетичних характеристик є розробка схемотехнічних рішень з конденсаторами у силових колах. Такі розробки і їх дослідження ведуться як науковцями нашої держави [1, 2], так і спеціалістами поза її межами [3, 4]. Розробка та дослідження компенсаційних перетворювачів електричної енергії знаходяться в межах зазначеного напрямку, а досліджуваний у публікації перетворювач (схема, рис. 1), реалізований за двомостовою компенсаційною схемою паралельного типу, є новим технічним рішенням.

Досліджуваний перетворювач живиться від одного трифазного трансформатора з двома трифазними вентильними обмотками, одна з яких з'єднана за схемою прямої зірки, а інша – зворотної. Силкові електричні вентиля трифазних мостових схем – діоди. Перетворювач містить комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазної групи

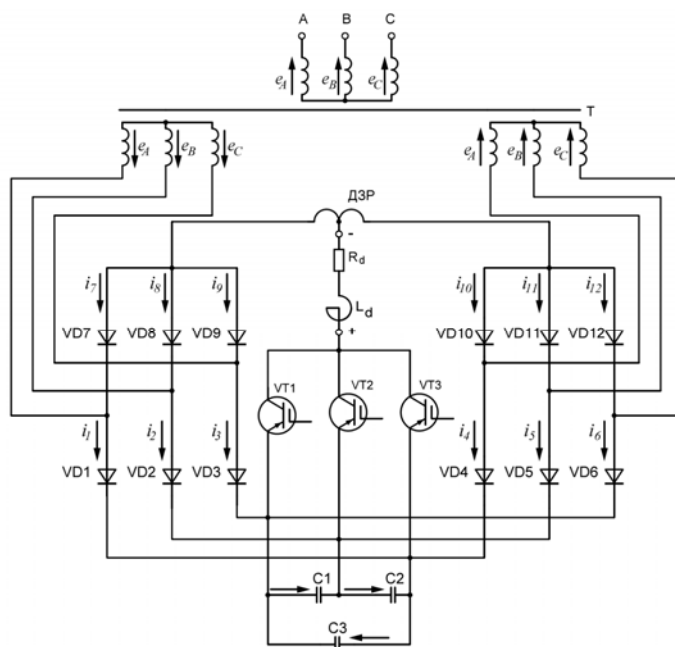


Рис. 1

© Бойко В.С., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-1018-0642>

© Видавець ВД «Академпериодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

повністю керованих приладів (IGBT), що забезпечує перезаряд конденсаторів і регулює енергетичний процес. Функціонально комутуюча ланка забезпечує створення такої конденсаторної напруги (комутуючої напруги), за якої перетворювач здатний компенсувати власну реактивну енергію, а в разі необхідності, то і генерувати її у мережу.

Дана публікація є третьою у переліку оприлюднення результатів дослідження особливостей формування комутуючої напруги у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі.

Мета роботи. Визначити режими роботи трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, за яких забезпечується генерація реактивної енергії при максимальній ефективності використання конденсаторів комутуючої ланки за рахунок збільшення частоти струму їхнього перезаряду.

Результати досліджень. У поточній публікації, як і у попередніх з цієї тематики [5], напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора вважається симетричною трифазною 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; ϑ – поточна змінна; ψ – початкова фаза напруги під час включення вентилів.

Силкові електричні вентиля компенсаційної (катодної) частини перетворювача працюють у послідовності VD1 → VD2 → VD3 та VD4 → VD5 → VD6. Між моментами вступу в роботу зазначених трійок силових електричних вентилів має місце зсув за фазою, що дорівнює половині періоду.

Комутуюча ланка досліджуваного перетворювача є керованою. Тому у перетворювачі є можливість змінювати величину і форму комутуючої напруги, змінюючи момент подачі та частоту імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки.

Подвоєна частота імпульсів керування. Результати дослідження процесу формування комутуючої напруги у досліджуваному перетворювачі за двократною частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки наведені у [5]. За базовий там прийнято такий режим роботи, за якого момент вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 збігається з моментом включення транзистора VT3, тобто момент подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки зміщений на $2\pi / 3$.

Подвоєна частота імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки відповідає зворотному чергуванню фаз. Тому послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки VT1 → VT3 → VT2. Спираючися на алгоритм комутації силових електричних вентилів і транзисторів комутуючої ланки, на рис. 2 побудовано половину періоду кривої струму фази C3 комутуючих конденсаторів у робочому режимі, прийнятому за базовий.

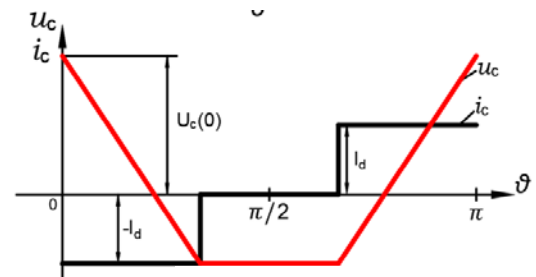


Рис. 2

Проаналізуємо форму кривої струму фази конденсаторної батареї, подавши її рядом Фур'є.

Коефіцієнти ряду косинуса та синуса

$$a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_C(\vartheta) \cos k\vartheta d\vartheta; \quad b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_C(\vartheta) \sin k\vartheta d\vartheta. \quad (2)$$

Здійснивши інтегрування, отримаємо

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} [-\sin(k\pi/3) + \sin(k2\pi/3)]; \quad b_k = \frac{I_d}{k\pi} [\cos(k\pi/3) - \cos(k2\pi/3)].$$

Розрахунок коефіцієнтів ряду Фур'є за останніми співвідношеннями показує, що крива струму фази конденсаторної батареї містить лише гармоніки ряду синуса, числове нормоване значення яких для усіх гармонік однакове. Тобто, стосовно числових значень коефіцієнтів ряду Фур'є усі гармоніки рівнозначні. Це пояснюється тим, що уся періодична несинусоїдна крива струму фази конденсаторної батареї має на періоді мережі живлення двократну частоту, і подвоєну частоту також мають імпульси керування транзисторами комутуючої ланки. При цьому не забуваємо, що амплітуди гармонік обернено пропорційні їхньому порядку.

На рис. 2 також наведено половину періоду розрахованої у [5] кривої комутуючої напруги за співвідношенням

$$u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_c(0). \quad (3)$$

Початкове значення кривої комутуючої напруги $u_c(0)$ розраховане, виходячи з того, що середнє значення кривої $u_c(\vartheta)$ на періоді дорівнює нулю

$$u_c(0) = \frac{I_d}{9fC}, \quad (4)$$

де I_d – половина випрямленого струму двомостового перетворювача чи випрямлений струм одного мостового перетворювача; C – ємність фази комутуючих конденсаторів; f – частота мережі живлення.

Наведені вище дані стосовно базового режиму використані під час порівняння енергетичних спроможностей двомостового компенсаційного перетворювача за підвищеної частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки.

Чотирикратна частота імпульсів керування. У [5] наведено результати подібних досліджень за чотирикратної частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Проаналізовано три основні режими, позначені як режими 1, 2, 3, і три проміжні, позначені як режими (1-2), (2-3) та (3-1). За результатами аналізу побудовано криві струмів фази конденсаторів і комутуючої напруги. У поточній публікації вони зображені на рис. 3 та рис. 4. Гармонічний аналіз струму фази конденсаторної батареї у публікації [5] не проводився.

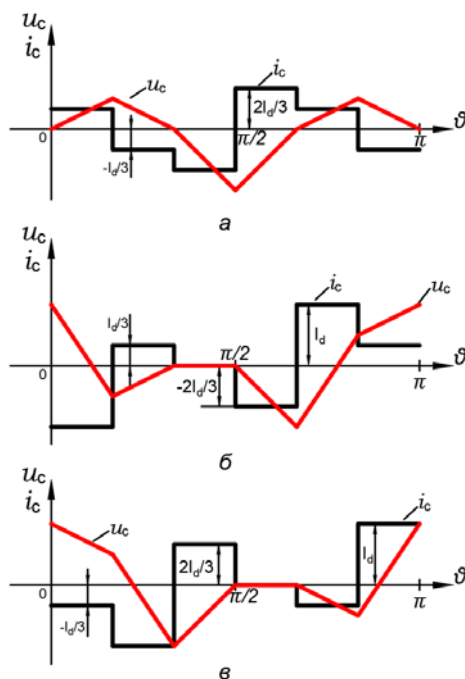


Рис. 3. Струм і напруга фази конденсаторної батареї у режимах 1, 2, 3

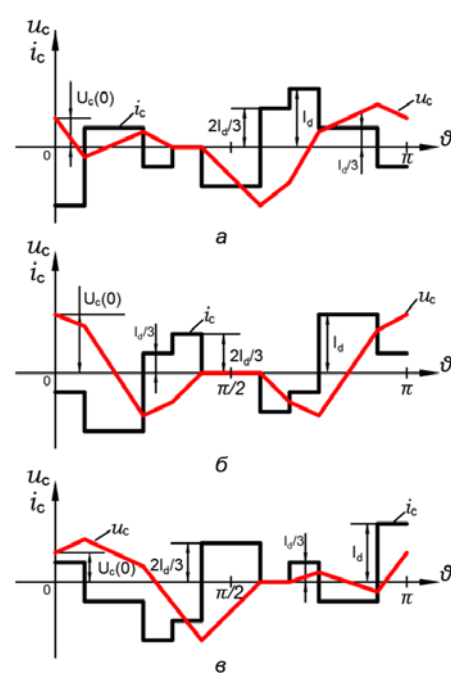


Рис. 4. Струм і напруга фази конденсаторної батареї у режимах (1-2), (2-3), (3-1)

Такі дослідження проведені у рамках поточної публікації. Її результати наведені нижче.

Подання кривої струму фаз конденсаторної батареї рядом Фур'є з використанням (2) дає наступні вирази для розрахунку коефіцієнтів ряду косинуса і синуса.

Режим 1:

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} [2\sin(k\pi/6) + 2\sin(k5\pi/6)];$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} [-2 \cos(k\pi/6) - 2 \cos(k5\pi/6) + 4 \cos(k\pi/2) + 3].$$

Режим 2:

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} [-4 \sin(k\pi/6) + \sin(k\pi/3) - 5 \sin(k2\pi/3) + 2 \sin(k5\pi/6)];$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} [4 \cos(k\pi/6) - \cos(k\pi/3) - 2 \cos(k\pi/2) + 5 \cos(k2\pi/3) - 2 \cos(k5\pi/6) - 4].$$

Режим 3:

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} [2 \sin(k\pi/6) - 5 \sin(k\pi/3) + \sin(k2\pi/3) - 4 \sin(k5\pi/6)];$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} [-2 \cos(k\pi/6) + 5 \cos(k\pi/3) - 2 \cos(k\pi/2) - \cos(k2\pi/3) + 4 \cos(k5\pi/6) - 4].$$

Режим (2-1):

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} [-4 \sin(k\pi/12) + 2 \sin(k\pi/4) + 2 \sin(k5\pi/12) - 4 \sin(k7\pi/12) + 2 \sin(k3\pi/4) + 2 \sin(k11\pi/12)];$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} [4 \cos(k\pi/12) - 2 \cos(k\pi/4) - 2 \cos(k5\pi/12) + 4 \cos(k7\pi/12) - 2 \cos(k3\pi/4) - 2 \cos(k11\pi/12) - 3].$$

Режим (2-3):

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} [2 \sin(k\pi/12) - 4 \sin(k\pi/4) + 2 \sin(k5\pi/12) + 2 \sin(k7\pi/12) + 4 \sin(k3\pi/4) - 2 \sin(k11\pi/12)];$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} \left[\begin{array}{l} -2 \cos(k\pi/12) + 4 \cos(k\pi/4) - 2 \cos(k5\pi/12) - 2 \cos(k7\pi/12) + 4 \cos(k3\pi/4) - \\ -2 \cos(k11\pi/12) - 3 \end{array} \right].$$

Режим (3-1):

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} [2 \sin(k\pi/12) + 2 \sin(k\pi/4) - 4 \sin(k5\pi/12) + 2 \sin(k7\pi/12) + 2 \sin(k3\pi/4) - 4 \sin(k11\pi/12)];$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} [-2 \cos(k\pi/12) - 2 \cos(k\pi/4) + 4 \cos(k5\pi/12) - 2 \cos(k7\pi/12) - 2 \cos(k3\pi/4) + 4 \cos(k11\pi/12) - 3].$$

Гармонічний склад кривої струму фази конденсаторної батареї в основних робочих режимах наведено у табл. 1.

З наведених у табл. 1 даних випливає, що збільшення частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки до чотирикратної робить найбільш вагомим для величини і форми комутуючої напруги внесок гармонік струму, кратних чотирьом. Якщо врахувати, що у разі збільшення частоти ємнісний опір падає, то це є поясненням факту підвищення ефективності використання конденсаторів комутуючої ланки у разі зменшення ємності фази конденсаторної батареї. Це також є свідченням доцільності досліджень режимів роботи двомостового компенсаційного перетворювача за підвищеної частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки.

Таблиця 1

Нормовані по I_d числові значення коефіцієнтів										
коефіцієнт	$k\pi \cdot a_k$					$k\pi \cdot b_k$				
$k \setminus$ режим	1	(1-2)	2	(2-3)	3	1	(1-2)	2	(2-3)	3
2, 10, 14, 22	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2
4, 20	0	$-4\sqrt{3}$	$-4\sqrt{3}$	0	$4\sqrt{3}$	6	2	-6	-10	-6
8, 16	0	$-4\sqrt{3}$	$4\sqrt{3}$	0	$-4\sqrt{3}$	6	-6	-6	6	-6

Восьмикратна частота імпульсів керування. Дослідимо процес формування комутуючої напруги у перетворювачі за схемою рис. 1 за восьмикратної частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, вважаючи струм навантаження і ємність фази комутуючих конденсаторів такими ж, як і у разі подвоєної та чотирикратної частоти.

Звернімо увагу, що напруга перетворювального трансформатора залишається трифазною напругою прямого чергування фаз. Восьмикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки відповідає зворотне чергування фаз. Тому алгоритм комутації силових електричних вентилів і транзисторів комутуючої ланки буде таким же, як і за подвоєної частоти.

Режим 1. Момент включення транзистора VT1 збігається з моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1. Ураховуючи викладене вище стосовно послідовності чергування фаз, на рис. 5, а побудовано половину періоду кривої струму фази СЗ комутуючих конденсаторів, яка складається з дванадцяти інтервалів. Тобто, крива має подвоєну частоту на періоді, містить двадцять чотири інтервали. Її гармонічному складу відповідають наступні вирази коефіцієнтів ряду Фур'є:

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} \left[4\sin(k\pi/12) - 2\sin(k\pi/6) - 2\sin(k\pi/4) + 3\sin(k\pi/3) - 2\sin(k5\pi/12) + 4\sin(k7\pi/12) - \right. \\ \left. - 3\sin(k2\pi/3) - 2\sin(k3\pi/4) + 4\sin(k5\pi/6) - 2\sin(k11\pi/12) \right]; \quad (5)$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} \left[-4\cos(k\pi/12) + 2\cos(k\pi/6) + 2\cos(k\pi/4) - 3\cos(k\pi/3) + 2\cos(k5\pi/12) + 2\cos(k\pi/2) - \right. \\ \left. - 4\cos(k7\pi/12) + 3\cos(k2\pi/3) + 2\cos(k3\pi/4) - 4\cos(k5\pi/6) + 2\cos(k11\pi/12) \right].$$

Тож розрахунок кривої комутуючої напруги можна здійснити за половину періоду на дванадцяти інтервалах, використовуючи співвідношення (3).

Результати розрахунку за окремими інтервалами:

I інтервал: $i_C = I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

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

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(1)k} = \frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$

II інтервал: $i_C = -I_d, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} (-I_d) d\vartheta + u_{C(1)k} = -\frac{I_d}{\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(2)k} = -\frac{I_d}{36fC} + u_C(0).$

III інтервал: $i_C = -I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(2)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{36fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(3)k} = -\frac{I_d}{24fC} + u_C(0).$

IV інтервал: $i_C = I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(3)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{24fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(4)k} = -\frac{I_d}{36fC} + u_C(0).$

V інтервал: $i_C = -2I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(5)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(4)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{36fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(5)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$

VI інтервал: $i_C = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(5)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_C(0) = u_{C(6)k}.$$

VII інтервал: $i_C = 2I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(7)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(6)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(7)k} = -\frac{I_d}{36fC} + u_C(0).$

VIII інтервал: $i_C = -2I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(8)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{2I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(7)k} = -\frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{36fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(8)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$

IX інтервал: $i_C = I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(9)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(8)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(9)k} = -\frac{I_d}{24fC} + u_C(0).$

X інтервал: $i_C = I_d, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(10)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} I_d d\vartheta + u_{C(9)k} = \frac{I_d}{\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{24fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(10)k} = u_C(0).$

XI інтервал: $i_C = -I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(11)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(10)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(11)k} = -\frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$

XII інтервал: $i_C = I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 12;$

$$u_{C(12)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{I_d}{3} d\vartheta + u_{C(11)k} = \frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{72fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(12)k} = u_C(0).$

Початкове значення кривої комутуючої напруги $u_C(0)$ розрахуємо, виходячи з того, що крива $u_C(\vartheta)$ на періоді має середнє значення, яке дорівнює нулю. Виконавши нескладний розрахунок, отримаємо

$$u_C(0) = \frac{I_d}{36fC}. \quad (6)$$

Наведений розрахунок і крива комутуючої напруги, побудована на рис. 5, а, засвідчують, що у режимі 1 перезаряд конденсаторів відбувається, і перетворювач працює у компенсаційному режимі.

Режим 2. З моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 збігається момент включення транзистора VT2, тобто момент подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки змістився на $\pi / 12$. Враховуючи викладене вище стосовно послідовності чергування фаз, на рис. 5, б побудовано половину періоду кривої струму фази C3 комутуючих конденсаторів. Вона має подвоєну частоту і дванадцять інтервалів на половині періоду, а її гармонічний склад розраховується за наступними коефіцієнтами ряду Фур'є:

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} \left[-2\sin(k\pi/12) + 4\sin(k\pi/6) - 2\sin(k\pi/4) - 3\sin(k\pi/3) + 4\sin(k5\pi/12) - \right. \\ \left. -2\sin(k7\pi/12) + 3\sin(k2\pi/3) - 2\sin(k3\pi/4) - 2\sin(k5\pi/6) + 4\sin(k11\pi/12) \right]; \quad (7)$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} \left[2\cos(k\pi/12) - 4\cos(k\pi/6) + 2\cos(k\pi/4) + 3\cos(k\pi/3) - 4\cos(k5\pi/12) + 2\cos(k\pi/2) + \right. \\ \left. + 2\cos(k7\pi/12) - 3\cos(k2\pi/3) + 2\cos(k3\pi/4) + 2\cos(k5\pi/6) - 4\cos(k11\pi/12) \right].$$

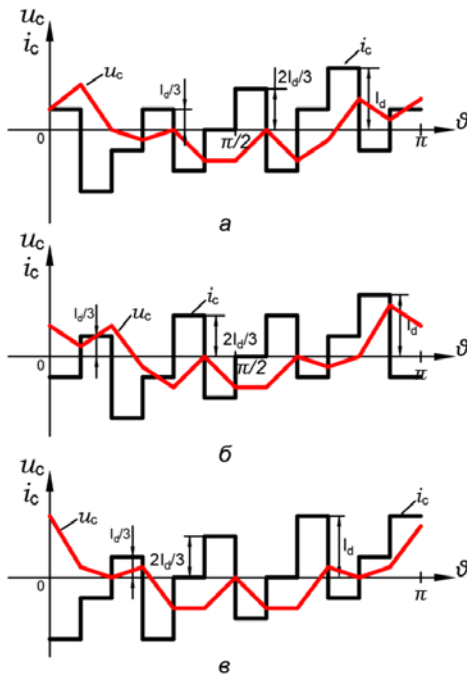


Рис. 5

Використовуючи ту ж методику, що і у попередньому режимі, розрахуємо криву комутуючої напруги. Не переобтяжуючи публікацію подробицями розрахунку, відзначимо, що у цьому режимі початкове значення кривої комутуючої напруги

$$u_c(0) = \frac{I_d}{36fC}. \quad (8)$$

Розрахунок і графічне зображення комутуючої напруги (рис. 5, б) показують, що у режимі 2 конденсаторна батарея також перезаряджається, і має місце ефект компенсації реактивної енергії.

Режим 3. З моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 збігається момент включення транзистора VT3, тобто момент подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки змістився ще на $\pi/12$ відносно попереднього режиму 2 чи всього на $\pi/6$. Використовуючи ту ж саму методику, що і раніше, на рис. 3, в побудована крива струму фази С3 комутуючих конденсаторів в інтервалі половини періоду. Як бачимо, вона на половині періоду також має дванадцять інтервалів і подвоєну частоту. Її гармонічному складу відповідають наступні коефіцієнти ряду Фур'є:

$$a_k = \frac{I_d}{k\pi} \left[-2\sin(k\pi/12) - 2\sin(k\pi/6) + 4\sin(k\pi/4) - 2\sin(k5\pi/12) - 2\sin(k7\pi/12) + \right. \\ \left. + 4\sin(k3\pi/4) - 2\sin(k5\pi/6) - 2\sin(k11\pi/12) \right]; \quad (9)$$

$$b_k = \frac{I_d}{k\pi} \left[2\cos(k\pi/12) + 2\cos(k\pi/6) - 4\cos(k\pi/4) + 3\cos(k\pi/3) + 2\cos(k5\pi/12) - 4\cos(k\pi/2) + \right. \\ \left. + 2\cos(k7\pi/12) + 3\cos(k2\pi/3) - 4\cos(k3\pi/4) + 2\cos(k5\pi/6) + 2\cos(k11\pi/12) \right].$$

За співвідношенням (3) розрахуємо криву комутуючої напруги. Не наводячи подробиць розрахунку, відзначимо, що початкове значення кривої комутуючої напруги

$$u_c(0) = \frac{I_d}{18fC}. \quad (10)$$

Розрахунок і графічне зображення комутуючої напруги на рис. 5, в показують, що у режимі 3 конденсаторна батарея перезаряджається, і також має місце ефект компенсації реактивної енергії.

Якщо момент подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки зміститься ще на $\pi/12$ відносно попереднього режиму 3 чи всього на $\pi/4$, отримаємо умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки, досліджені раніше як режим 1.

Повну картину динаміки зміни комутуючої напруги у разі регулювання транзисторів комутуючої ланки імпульсами восьмикратної частоти отримаємо, дослідивши процес у проміжку між розглянутими режимами. У поточній публікації наведено лише остаточний результат цього дослідження у вигляді величини комутуючої напруги у момент комутації:

$$\text{у режимі 1-2:} \quad u_c(0) = \frac{I_d}{36fC}; \quad (11)$$

$$\text{у режимах (2-3) та (3-1):} \quad u_c(0) = \frac{I_d}{24fC}. \quad (12)$$

Результати досліджень, викладені вище, дають змогу оцінити можливості підвищення ефективності використання конденсаторів комутуючої ланки, регулюючий ефект транзисторів комутуючої ланки та вплив величини і форми комутуючої напруги на енергетичні характеристики досліджуваного перетворювача.

Гармонічний склад кривої струму фази конденсаторної батареї комутуючої ланки в основних робочих режимах досліджуваного перетворювача наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Нормовані по I_d числові значення коефіцієнтів						
коефіцієнт	$k\pi \cdot a_k$			$k\pi \cdot b_k$		
$k \setminus$ режим	1	2	3	1	2	3
2, 4, 10, 14, 20, 22	0	0	0	-2	-2	-2
8	$8\sqrt{3}$	$-8\sqrt{3}$	0	6	6	18
16	$-8\sqrt{3}$	$8\sqrt{3}$	0	6	6	18

публікацію, оскільки за енергетичними показниками поступаються викладеним вище. Причиною цього є те, що у цих режимах форма комутуючої напруги практично не змінюється і є близькою до форми комутуючої напруги у компенсаційних перетворювачах попереднього покоління.

Регулювальні можливості комутуючої ланки досліджуваного перетворювача за восьмикратною частоти імпульсів керування показано на рис. 6. Він побудований за умови, що відносне значення 1 комутуючої напруги у момент комутації відповідає базовому режиму і розраховується за (4).

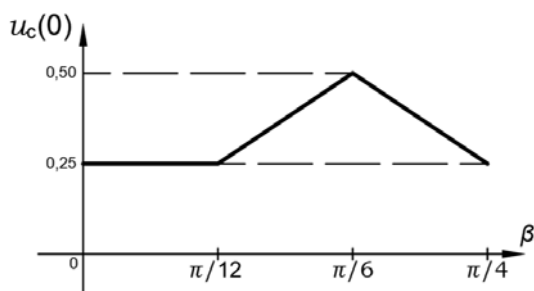


Рис. 6

Дослідження режимів 1, (1-2) і 2 показують, що у разі затримки подачі імпульсів керування в межах $(0 \leq \beta \leq \pi/12)$ конденсатори перезаряджаються, перетворювач працює у компенсаційному режимі, а комутуюча напруга у момент комутації не змінюється, про що свідчать співвідношення (6), (8), (11). Відносно режиму, вибраного за базовий, це складає 0.25.

Протягом наступного інтервалу затримки на $\pi/12$, тобто при $\pi/12 \leq \beta \leq \pi/6$, значення комутуючої напруги у момент комутації згідно (12) та (10) зростає удвічі, тобто від 0.25 до 0.5 порівняно з (4).

Протягом ще одного наступного інтервалу затримки на $\pi/12$, тобто при $\pi/6 \leq \beta \leq \pi/4$, значення комутуючої напруги у момент комутації спадає від 0.5 до 0.25. Далі процес повторюється.

З даних табл. 2 випливає, що з погляду можливостей підвищення енергетичних показників перетворювача, реалізованого за трифазною двомостовою компенсаційною схемою, режим 3 поступається двом попереднім. Більше того, аналізуючи гармонічний склад струму фази конденсаторної батареї у режимах 1 та 2, є підстави стверджувати про їхню рівнозначність за цим показником, незважаючи на відмінність у формі. Останнє підтверджується рис. 7 та рис. 8: на рис. 7 – кут регулювання α у режимі 1 за восьмикратною частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки; на рис. 8 – кут регулювання α у режимі 2 за восьмикратною частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки.

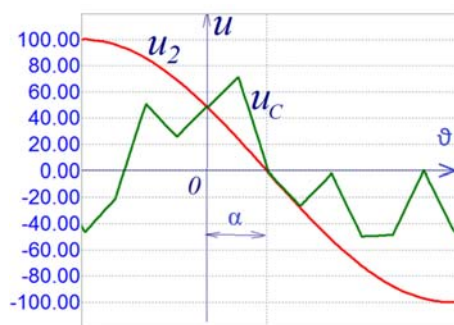


Рис. 7

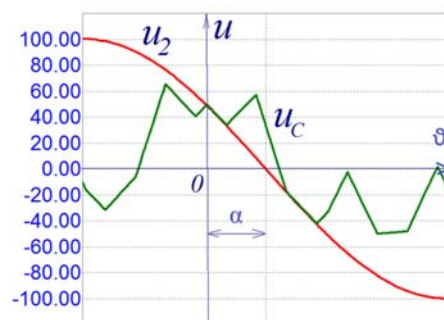


Рис. 8

Визначимо ефективність використання конденсаторів комутуючої ланки, порівнюючи режими 1 та 2 за восьмикратною частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, з базовим. Врахуємо, що криві комутуючої напруги u_C на рис. 7 і рис. 8 отримані за ємності фази конденсаторної батареї у 4 рази меншій, ніж у базовому режимі, при цьому відносне значення комутуючої напруги у момент комутації дорівнює 0.498, що у 1.15 рази менше, ніж у базовому режимі. Тож, ураховуючи викладене, ефективність використання конденсаторів, порівняно з базовим режимом, складає 3.48.

Висновки. Отримані результати підтверджують:

- доцільність застосування у комутуючій ланці повністю керованих пристроїв, що робить процес перезаряду конденсаторів регульованим і з'являється можливість змінювати не лише величину комутуючої напруги, а і її форму;
- форма кривої комутуючої напруги має найбільш важливе значення задля забезпечення умови компенсації та генерування максимальних обсягів реактивної енергії, при цьому найбільш ефективним є регулювання транзисторів комутуючої ланки в діапазоні $0 \leq \beta \leq \pi/6$, де β – затримка подачі імпульсів керування на транзистори відносно початку вступу в роботу силових електричних вентилів;
- найбільша ефективність використання конденсаторів комутуючої ланки у режимах 1 та 2 за восьмикратною частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, порівняно з базовим режимом, складає 3.48.

INCREASING THE EFFICIENCY OF USING CAPACITORS OF THE COMMUTATING LINK OF A TWO-BRIDGE COMPENSATION CONVERTER BY INCREASING THE FREQUENCY OF THEIR RECHARGE CURRENT

V.S. Boiko

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

E-mail: vsboiko1941@gmail.com.

The article investigates a new technical solution proposed by the author, which is a three-phase two-bridge compensating converter of a parallel type with one commutating link. It consists of a three-phase capacitor battery and a three-phase group of fully controlled devices (for example, IGBT). The main objective of the study is to bring the conditions under which the efficient use of the equipment of the commutating link of the converter is ensured and such conditions for the formation of the capacitor voltage are created under which the converter acquires the ability not only to compensate for its own reactive energy, but also to generate it into the power supply network. The scope of the research includes the analysis of the operating modes of the compensating converter when controlling the transistors of the commutating link with pulses of double, quadruple and eightfold frequency. The research methodology is based on the harmonic analysis of the curves of the phase current of the capacitor battery. The general conclusion is obtained as a result of comparing the analysis results at different frequencies of the control pulses of the transistors of the commutating link. References 5, Figures 8, Tables 2.

Keywords: capacitor battery, switch, commutating voltage, harmonics, energy efficiency, electric valve, equipment.

1. Chyzhenko O.I., Trach I.V. An impact of changes in the inductance of distributions network on the modes and parameters of equipment of thyristor compensator of reactive power. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2017.04.048>. (Ukr)

2. Butkevych O.F., Chizhenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V., Influence of FACTS on the electric network mode during direct start of a powerful asynchronous machine as part of a complex load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 62-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2018.06.062>. (Ukr)

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

4. Gan Wei, Ji Hongchao, Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. 2014 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>.

5. Boiko V., Shkardun O., Buryk M. The magnitude and shape of the commutating voltage of a three-phase two-bridge compensating converter. IEEE 5th KhPI Week on *Advanced Technology* (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 07-11 October 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878033>.

Надійшла 29.11.2024