

## КОМУТУЮЧА НАПРУГА ТРИФАЗНОГО ДВОМОСТОВОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

**В.С. Бойко**\*, докт. техн. наук  
НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,  
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: [vsboiko1941@gmail.com](mailto:vsboiko1941@gmail.com).

*Наведено результати дослідження електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі, який є одним із варіантів схемної реалізації компенсаційних перетворювачів нового покоління. Комутуюча ланка перетворювача містить трифазну конденсаторну батарею та трифазну групу повністю керованих приладів. Таке технічне рішення дає змогу зробити процес перезаряду конденсаторів керованим. Причому створюється можливість змінювати не лише величину конденсаторної напруги, а і її форму. Наголошено, що у компенсаційних перетворювачах попереднього покоління можливості змінювати форму комутуючої напруги не було. Останнє є суттєвою перевагою пристроїв нового покоління, оскільки дає змогу забезпечити високі енергетичні характеристики перетворювача. Це підтверджують наведені у публікації результати дослідження енергетичних спроможностей досліджуваного перетворювача у дев'яти режимах роботи та висновок щодо найбільш ефективних режимів. Бібл. 9, рис. 10.*

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

**Вступ.** Серед пристроїв енергетичної електроніки великої потужності, які працюють у режимі випрямляча, досить поширеними є ті, дія яких ґрунтуються на застосуванні трифазної мостової схеми. Наприклад, відомий перетворювач, реалізований за 12-фазною еквівалентною двотактною паралельною вентиляційною схемою [1], наведено на рис. 1, а. Вона містить два трифазні перетворювальні трансформатори, обмотки одного з'єднані за схемою зірка/зірка, а іншого – трикутник/зірка таким чином, щоб забезпечити між ЕРС вторинних обмоток трансформаторів зсув за фазою у  $\pi/6$ .

Паралельне з'єднання трифазних мостових схем є відомим технічним рішенням і застосовується для покращення гармонічного складу струму мережі живлення та вихідної напруги.

Подібні схемотехнічні рішення із використанням паралельного з'єднання трифазних мостових схем застосовувалися і під час створення пристроїв енергетичної електроніки компенсаційного типу, тобто таких пристроїв, які наряду з функцією перетворення параметрів електричної енергії (випрямлення змінного струму) були здатні компенсувати власну реактивну енергію, а у разі необхідності – генерувати реактивну енергію у мережу. Розробка та дослідження перетворювачів електричної енергії з конденсаторами у силових колах ведуться як в Україні [2–5], так і за її межами [6, 7]. Приклад одного з таких схемотехнічних рішень наведено на рис. 1, б. Це двомостовий компенсаційний перетворювач з однією комутуючою ланкою, яка складається з трифазної конденсаторної батареї та трифазного зрівноважувального реактора (ТЗР).

Такий перетворювач на стороні змінного струму містить трифазний перетворювальний трансформатор з двома вторинними обмотками, з'єднаними за схемою прямої та зворотної зірки таким чином, щоб забезпечити між ЕРС вторинних обмоток трансформатора зсув за фазою у  $\pi$  ( $180^\circ$ ).

До кожної вторинної трифазної обмотки трансформатора підключено свою трифазну мостову схему, реалізовану на діодах чи тиристорах.

Трифазні системи електроживлення мостових схем мають між собою зсув за фазою, тож включення останніх на паралельну роботу можливе лише через двофазний зрівноважувальний реактор (ДЗР), який підключається між нульовими точками анодних (чи катодних) груп електричних вентилів мостових схем. Середня точка двофазного зрівноважувального реактора (ДЗР) є одним із вихідних затискачів перетворювача. У компенсаційних перетворювачах попереднього покоління інший вихідний затискач – спільна точка обмоток трифазного зрівноважувального реактора (ТЗР).

Оскільки компенсаційний перетворювач містить одну комутуючу ланку, підключену до електричних вентилів його катодної частини, то тільки вони працюють у компенсаційному режимі і мають випереджаючий кут регулювання. Такий режим роботи забезпечується напругою конденсаторів комутуючої ланки, перезаряд яких забезпечується ТЗР. Він ділить випрямлений струм перетворювача на три однакові частини. Тому у перетворювачах попереднього покоління форма кривої комутуючої напруги за будь-якого навантаження перетворювача не змінюється, змінюється лише її величина.

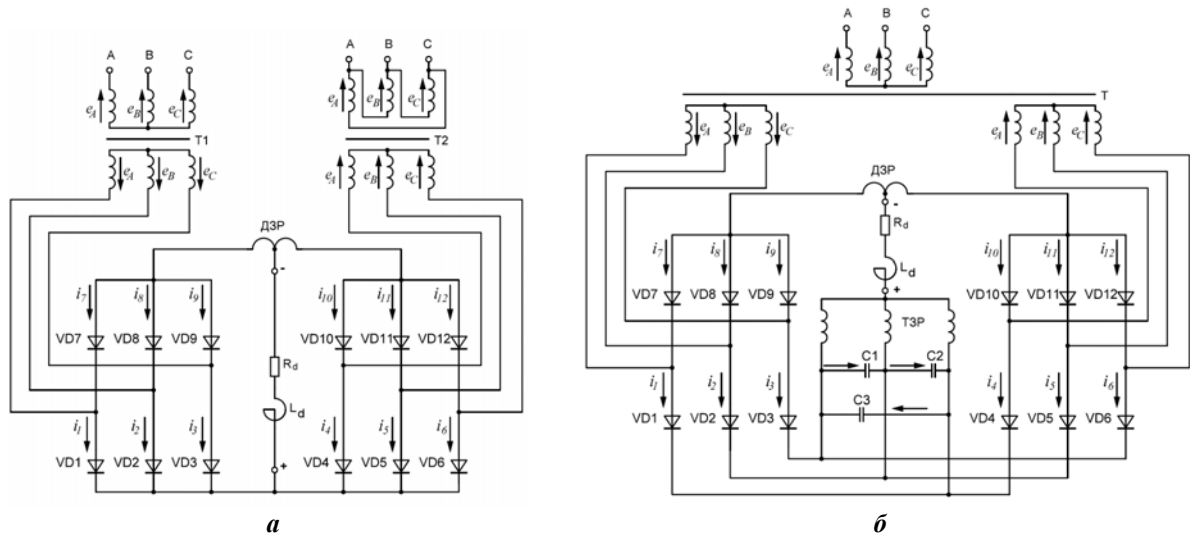


Рис. 1

**Мета роботи.** Визначити режими керування перезарядом конденсаторів комутуючої ланки двомостового компенсаційного перетворювача, за яких формується така комутуюча напруга, яка забезпечує генерування максимальних обсягів реактивної енергії.

**Результати досліджень.** Незмінність форми комутуючої напруги у компенсаційному перетворювачі з комутуючою ланкою, що містить трифазний зрівноважувальний реактор, це лише один із його недоліків. Інший полягає у тому, що сам ТЗР є громіздким апаратом з великими втратами електричної енергії. Компенсаційні перетворювачі з трифазними зрівноважувальними реакторами у комутуючій ланці є пристроями попереднього покоління. У пристроях нового покоління замість ТЗР використовуються трифазні групи повністю керованих приладів, наприклад, IGBT. Якраз таке технічне рішення застосоване у схемі на рис. 2. Воно є новим, тож електромагнітні процеси у перетворювачі, реалізованому за такою схемою, раніше не досліджувалися. Проведемо аналіз його роботи за спрощених умов, коли нехтуються індуктивні опори кола змінного струму та активні опори обладнання перетворювача та ошиновки. За таких умов комутація струму силовими електричними вентилями здійснюється миттєво.

Система ЕРС трифазного перетворювального трансформатора (Т) (рис. 2) 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 VD7, VD8, VD9, VD10, VD11, VD12 працюють так, як і повинні працювати у звичайному (некомпенсаційному) трифазному мостовому перетворювачі: 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, до яких зазначені діоди підключені.

Досліджуваний компенсаційний перетворювач також має одну комутуючу ланку, підключену до електричних вентилів його катодної частини. Але їхній випереджаючий кут регулювання, як і енергетичні показники трифазного двомостового компенсаційного перетворювача в цілому, залежить

не лише від величини, а й від форми комутуючої напруги, які можна змінювати. Дослідження цього питання і складає основний зміст даної публікації.

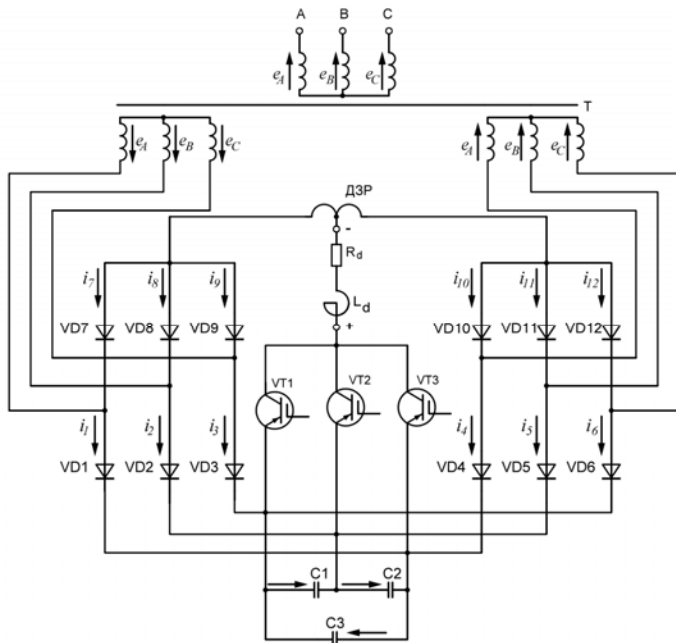


Рис. 2

ційному процесі, струмами діодів VD1, VD2 і VD3 докладно розглянуто в [9]. У цій публікації аналітичний розрахунок кривої комутуючої напруги за окремими інтервалами здійснено, використовуючи співвідношення

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

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

$$u_c(0) = \frac{I_d}{3\omega C} \cdot \frac{4\pi}{9} = \frac{2I_d}{27fC}, \quad (3)$$

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

Одну складову кривої  $u_c(\vartheta)$  фази C3 конденсаторної батареї побудовано на рис. 3, а. Інша складова цієї напруги (від діодів VD4, VD5 і VD6) буде такою ж, але зміщеною на половину періоду. В результаті накладання двох таких складових отримаємо результуючу криву струму фази C3 (рис. 3, б) комутуючих конденсаторів двомостового компенсаційного перетворювача попереднього покоління.

З рис. 3, б випливає, що криві фазного струму конденсаторів комутуючої ланки, як і комутуючої напруги, мають подвоєну частоту і складаються з шести інтервалів.

Початкове значення кривої комутуючої напруги  $u_c(0)$  (рис. 3, б) дорівнює

$$u_c(0) = \frac{I_d}{27fC}. \quad (4)$$

Побудову на рис. 3 кривих комутуючої напруги двомостового компенсаційного перетворювача попереднього покоління і доведення співвідношень (3) та (4) для розрахунку її початкового значення здійснено за умови, що ємність фази конденсаторів комутуючої ланки і випрямлений струм однієї мостової схеми однакові. З цього випливає важливий висновок щодо підвищення ефективності використання конденсаторної батареї у двомостовому компенсаційному перетворювачі.

На завершення цієї частини досліджень звернімо увагу, що у компенсаційних перетворювачах попереднього покоління можливості зміни форми кривої комутуючої напруги не було. Її

**Двомостовий компенсаційний перетворювач з ТЗР.** Переваги і недоліки розробленого автором [8] двомостового компенсаційного перетворювача за схемою рис. 2 природно розглянути, порівнюючи його з перетворювачем старого покоління за схемою рис. 1, б (з ТЗР), на заміну якого він рекомендується.

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 формується складовими струмами вентилів обох трифазних катодних груп. Прийmemo за початок відліку момент вступу в роботу діода VD1 фази A під час переходу струму з вентиля VD3 на вентиль VD1. Формування комутуючої напруги фази C3 конденсаторної батареї, оскільки якраз вона приймає участь у зазначеному комута-

величину можна було змінювати за рахунок зміни струму навантаження чи ємності фази конденсаторів комутуючої ланки.

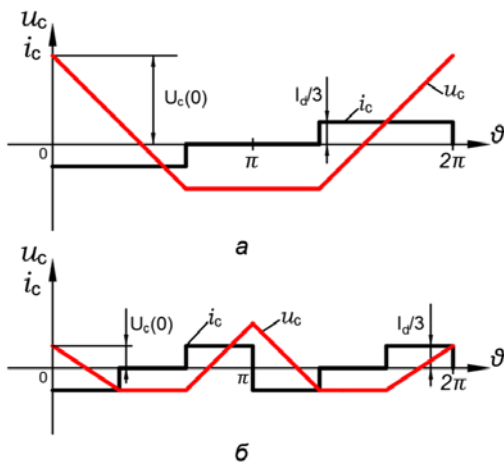


Рис. 3

У перетворювачах нового покоління є можливість зміни як величини, так і форми комутуючої напруги. Окрім зазначених вище факторів величину і форму комутуючої напруги можна також змінювати, здійснюючи регулювання транзисторів комутуючої ланки.

**Двомостовий компенсаційний перетворювач з регулюванням транзисторів комутуючої ланки імпульсами подвоєної частоти.** Дослідимо процес формування комутуючої напруги у перетворювачі за схемою рис. 2, вважаючи струм навантаження та ємність фази комутуючих конденсаторів незмінними і такими, які були під час дослідження перетворювача за схемою рис. 1, б.

Оскільки напруга перетворювального трансформатора є трифазною напругою прямого чергування фаз, силові електричні вентиля компенсаційної 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.

Частота імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки подвоєна, що відповідає зворотному чергуванню фаз. Тому послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки є VT1 → VT3 → VT2.

**Режим 1.** Припустимо, що момент включення транзистора VT1 збігається з моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1. Враховуючи викладене вище стосовно послідовності чергування фаз, на рис. 4, а побудовано половину періоду кривої струму фази C3 комутуючих конденсаторів. Вона на періоді має шість інтервалів і подвоєну частоту.

Тож розрахунок величини комутуючої напруги у момент комутації можна здійснити за половиною періоду, тобто на трьох перших інтервалах:

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

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

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

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

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

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi / 3, \quad u_{c(2)k} = -\frac{I_d}{18fC} + u_c(0).$

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

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

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi / 3, \quad u_{c(3)k} = u_c(0).$

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

$$u_c(0) = 0. \quad (5)$$

Виходить, що у режимі 1 конденсаторна батарея заряджається, але ефекту компенсації реактивної енергії немає.

**Режим 2.** Тепер припустимо, що 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  $\pi/3$ . Ураховуючи викладене вище стосовно послідовності чергування фаз, на рис. 4, б побудовано половину періоду кривої струму фази С3 комутуючих конденсаторів. Вона також на періоді має шість інтервалів і подвоєну частоту. Розрахунок величини комутуючої напруги у момент комутації також здійснюємо за половину періоду на трьох перших інтервалах за співвідношенням (2):

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

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

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

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi / 3, \quad u_{C(2)k} = \frac{I_d}{18fC} + u_C(0).$

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

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

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

Розрахувавши початкове значення кривої комутуючої напруги за тих же умов, що і раніше, отримаємо

$$u_C(0) = 0. \quad (6)$$

Виходить, що і у режимі 2 конденсаторна батарея заряджається, але ефекту компенсації реактивної енергії ще не спостерігається.

**Режим 3.** Тепер припустимо, що з моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 збігається момент включення транзистора VT3, тобто момент подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки змістився на  $2\pi/3$ . Використовуючи ту ж саму методику, що і раніше, на рис. 4, в побудовано половину періоду кривої струму фази С3 комутуючих конденсаторів. Як і у попередніх режимах, вона на періоді також має шість інтервалів і подвоєну частоту.

За співвідношенням (2) розрахуємо комутуючу напругу в режимі 3:

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

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

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi / 3, \quad u_{C(1)k} = -\frac{I_d}{6fC} + u_C(0).$

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

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

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

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

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

Розрахувавши початкове значення кривої комутуючої напруги за тих же умов, що і раніше, отримаємо

$$u_c(0) = I_d / 9fC. \quad (7)$$

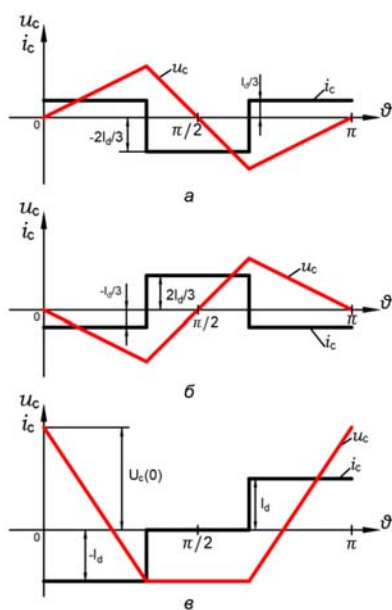


Рис. 4

Маючи початкове значення кривої комутуючої напруги, побудуємо криву комутуючої напруги фази конденсаторної батареї в інтервалі половини періоду (рис. 4, в). Як бачимо, форма цієї напруги така ж, як і на рис. 3, б. Отриманий результат є свідченням того, що між двомостовим компенсаційним перетворювачем (рис. 1, б) попереднього покоління і двомостовим компенсаційним перетворювачем (рис. 2) нового покоління має місце аналогія. Але ця аналогія є суто формальною – за ознаками технічного рішення. Що ж стосується електромагнітних процесів і енергетичних характеристик, то зазначені перетворювачі мають суттєві відмінності.

Одна з них, яка обґрунтовується результатами проведених досліджень, впливає з порівняння величин комутуючої напруги в момент комутації, тобто співвідношень (4) і (7). Як зазначалося раніше, дослідження проведені у припущенні, що струм навантаження та ємність фази комутуючих конденсаторів є незмінними і однаковими для обох перетворювачів.

Але у перетворювачі нового покоління за однакових умов комутуюча напруга в момент комутації утричі більша. Такий ефект пояснюється тим, що трифазний зрівноважувальний реактор ділить випрямлений струм перетворювача на три однакові частини і миттєве значення струму усіх фаз ТЗР у будь-який момент часу

дорівнює третині випрямленого струму перетворювача. Таким же є і середнє значення струму фаз ТЗР.

Середнє значення струму фаз транзисторів комутуючої ланки перетворювача нового покоління також дорівнює третині випрямленого струму, а миттєве значення у будь-який момент часу ні, тому що через фазу транзисторів комутуючої ланки проходить весь випрямлений струм перетворювача протягом тієї частини періоду, коли він відкритий.

Інша відмінність обґрунтовується результатами аналізу співвідношень (5)–(7), з яких випливає, що регулюючий ефект енергетичних показників перетворювача нового покоління знаходиться в інтервалі регулювання подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки, коли  $\pi/3 \leq \beta \leq 2\pi/3$ . При цьому комутуюча напруга зростає від 0 до  $I_d / 9fC$ .

Дослідимо динаміку зміни напруги у проміжку між другим і третім режимами, вважаючи режим 3 базовим, а величину комутуючої напруги в момент комутації у цьому режимі приймемо за 1.

**Режим 2-3.** А) Припустимо, що відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 момент включення транзистора VT2 ( $\pi/3$ ) змістився на чверть протяжності імпульсу керування, тобто на  $\pi/12$ . Відповідно, загальна затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки складає  $\beta = \pi/3 + \pi/12 = 5\pi/12$ . При цьому крива струму фази С3 комутуючих конденсаторів на періоді матиме 12 інтервалів різної протяжності та подвоєну частоту.

Комутуюча напруга на половині періоду має також шість інтервалів. Її розрахунок за (2) дає наступний результат:

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

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

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi/12$ ,  $u_{c(1)k} = -\frac{I_d}{24fC} + u_c(0).$

II інтервал:  $i_c = -I_d/3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/4;$

$$u_{c(2)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{c(1)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{24fC} + u_c(0).$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi/4$ ,  $u_{c(2)k} = -\frac{I_d}{12fC} + u_c(0).$

III інтервал:  $i_c = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi/12;$

$$u_{C(3)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_C d\vartheta + u_{C(2)k} = -\frac{I_d}{12fC} \vartheta + u_C(0) = u_{C(3)k}.$$

IV інтервал:  $i_C = 2I_d / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 4;$

$$u_{C(4)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \frac{2I_d}{3} d\vartheta + u_{C(3)k} = \frac{2I_d}{3\omega C} \vartheta - \frac{I_d}{12fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi / 4, \quad u_{C(4)k} = u_C(0).$

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

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

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi / 12, \quad u_{C(5)k} = \frac{I_d}{24fC} + u_C(0).$

VI інтервал:  $i_C = -I / 3, \quad 0 \leq \vartheta \leq \pi / 4;$

$$u_{C(6)} = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} \left(-\frac{I_d}{3}\right) d\vartheta + u_{C(5)k} = -\frac{I_d}{3\omega C} \vartheta + \frac{I_d}{24fC} + u_C(0).$$

В кінці інтервалу за  $\vartheta = \pi / 4, \quad u_{C(6)k} = u_C(0).$

Початкове значення кривої комутуючої напруги  $u_C(0)$  розраховано, виходячи з тих же, що і раніше умов, дає

$$u_C(0) = I_d / 36fC. \quad (8)$$

Як бачимо, отримане значення у чотири рази менше прийнятого за базове. Криву комутуючої напруги фаз конденсаторної батареї в інтервалі половини періоду побудовано на рис. 5, а.

**Б)** Тепер припустимо, що відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 момент включення транзистора VT2 змістився ще на чверть протяжності імпульсу керування. Тобто загальна затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки складає  $\beta = 5\pi / 12 + \pi / 12 = \pi / 2$ . При цьому крива струму фази С3 комутуючих конденсаторів на періоді матиме 12 інтервалів однакової протяжності та подвоєну частоту. Половину періоду зазначеної кривої зображено на рис. 5, б. Також на рис. 5, б зображено половину періоду кривої комутуючої напруги, розрахованої за (2). Її початкове значення у момент комутації складає

$$u_C(0) = I_d / 18fC. \quad (9)$$

Порівнюючи з (7), бачимо, що отримане значення удвічі менше.

**В)** Тепер припустимо, що відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 момент включення транзистора VT2 змістився ще на чверть протяжності імпульсу керування. Тобто загальна затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки складає  $\beta = \pi / 2 + \pi / 12 = 7\pi / 12$ . При цьому крива струму фази С3 комутуючих конденсаторів на періоді, як і раніше, матиме 12 інтервалів різної протяжності і подвоєну частоту. Половину періоду зазначеної кривої зображено на рис. 5, в. Крім того, на рис. 5, в зображено й половину періоду кривої комутуючої напруги, розрахованої за (2). Її початкове значення у момент комутації складає

$$u_C(0) = I_d / 12fC. \quad (10)$$

Порівнюючи з (7), бачимо, що значення на чверть менше.

**Режим 4.** Якщо відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 подачу імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки затримати ще на чверть протяжності імпульсу керування, то отримаємо режим роботи, у якому момент включення транзистора VT1 збігається з моментом вступу в роботу силового електричного вентиля VD1. Це буде розглянутий раніше режим 1.

**Режим 3-1. А)** Припустимо, що відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля VD1 момент включення транзистора VT3 змістився на чверть протяжності імпульсу керування, тобто на  $\pi / 12$ . А загальна затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки складає  $\beta = 2\pi / 3 + \pi / 12 = 3\pi / 4$ . При цьому крива струму фази С3 комутуючих

конденсаторів на періоді матиме 12 інтервалів різної протяжності та подвоєну частоту. Половину періоду зазначеної кривої зображено на рис. 6, а.

Половину періоду кривої комутуючої напруги, розрахованої за (2), також зображено на рис. 6, а. Її початкове значення у момент комутації складає

$$u_c(0) = I_d / 12 fC. \quad (11)$$

**Б)** Нехай момент включення транзистора VT3 ще змістився на чверть протяжності імпульсу керування, тобто на  $\pi/12$ . Тепер загальна затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки складає  $\beta = 3\pi/4 + \pi/12 = 5\pi/6$ . При цьому крива струму фази С3 комутуючих конденсаторів на періоді матиме 12 інтервалів однакової протяжності та подвоєну частоту. Половину періоду зазначеної кривої зображено на рис. 6, б, де також зображено й половину періоду кривої комутуючої напруги, розрахованої за (2). Її початкове значення у момент комутації складає

$$u_c(0) = I_d / 18 fC. \quad (12)$$

**В)** Якщо момент включення транзистора VT3 ще змістився на чверть протяжності імпульсу керування, тобто на  $\pi/12$ , то загальна затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки складає  $\beta = 5\pi/6 + \pi/12 = 11\pi/12$ . При цьому крива струму фази С3 комутуючих конденсаторів на періоді матиме 12 інтервалів різної протяжності та подвоєну частоту. Половину періоду зазначеної кривої зображено на рис. 6, в.

Половину періоду кривої комутуючої напруги, розрахованої за (2), теж зображено на рис. 6, в. Її початкове значення у момент комутації складає

$$u_c(0) = I_d / 36 fC. \quad (13)$$

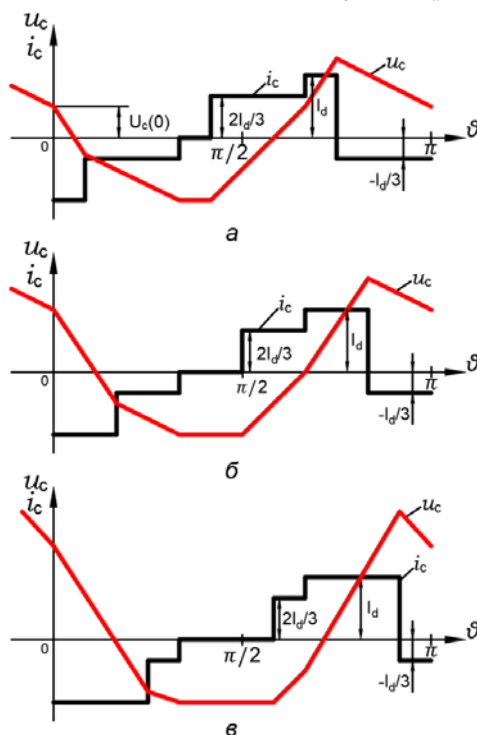


Рис. 5

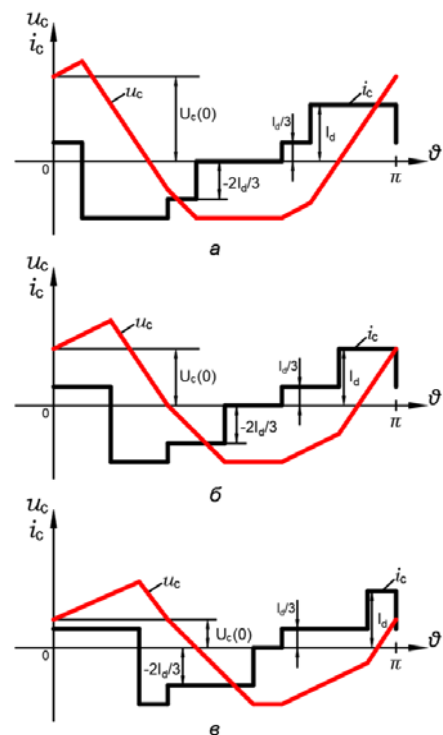


Рис. 6

Усе викладене вище узагальнено на рис. 7, а та 7, б. Перший з них показує, що затримка подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки відносно моменту вступу в роботу силового електричного вентиля до однієї шостої частини періоду ( $\beta = \pi/3$ ) не робить перетворювач компенсаційним. Тобто перезаряд конденсаторної батареї здійснюється, але комутуюча напруга у момент комутації дорівнює нулю.

Затримка в межах ( $\pi/3 \leq \beta \leq 2\pi/3$ ) призводить до зростання відносного значення комутуючої напруги у момент комутації від нуля до одиниці. Нагадаємо, що за одиницю прийнято початкове значення комутуючої напруги в кінці режиму 3, прийнятому за базовий, відповідно до співвідношення (7). Протягом наступного такого ж інтервалу затримки на  $\pi/3$ , початкове значення



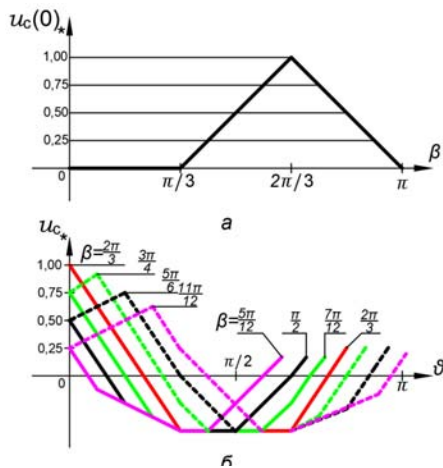


Рис. 7

комутуючої напруги у момент комутації спадає від одиниці до нуля. Таким буде її значення в кінці режиму 4, який фактично є режимом 1.

Зміну величини і форми комутуючої напруги протягом режимів 2-3 та 3-1 представлено на рис. 7, б.

Проаналізуємо величину та форму комутуючої напруги, виходячи з критерію можливості компенсації реактивної потужності. Основним об'єктивним показником такого критерію є величина випереджаючого кута регулювання  $\alpha$ . Безумовно, на величину реактивної енергії, яку спроможний генерувати компенсаційний перетворювач, впливає і величина кута комутації  $\gamma$ . Однак, вона є похідною від параметрів елементів перетворювача та режиму роботи, за якого досягається обумовлений технологічним процесом електроживлення випереджаючий кут регулювання.

Розрахуємо максимально можливий випереджаючий кут регулювання у базовому режимі. Криву комутуючої напруги у цьому режимі представлено на рис. 4, в. Вона має певні значення протяжності ділянок (три ділянки по третині періоду) та співвідношення між найбільшим додатним і найбільшим від'ємним значеннями – 1:2. За таких умов найбільше можливе значення випереджаючого кута регулювання визначиться через дотичну до синусоїди лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора. Тож маємо: функція  $f(\vartheta) = \sin \vartheta$ ; дотична  $u_c(\vartheta) = k\vartheta + b$ , де  $k = f'(\vartheta) = \cos \vartheta$ .

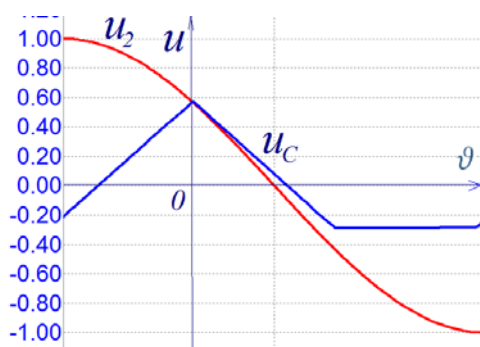


Рис. 8

Графічну побудову дотичної ілюструє рис. 8. Аналітичний розрахунок величини випереджаючого кута регулювання дає значення близько  $35^\circ$ , якому відповідає нормоване за напругою значення максимуму кривої комутуючої напруги 0.574.

Викладене свідчить про обмежені можливості досліджуваного компенсаційного перетворювача щодо генерування реактивної енергії, якщо регулювання транзисторів комутуючої ланки здійснюватиметься в діапазоні зміни моменту подачі імпульсів керування в межах  $\pi/3 \leq \beta \leq 2\pi/3$ .

Як впливає з рис. 7, б, форма кривої комутуючої напруги буде іншою, якщо регулювання транзисторів комутуючої ланки здійснюватиметься в діапазоні зміни моменту подачі імпульсів керування в межах  $2\pi/3 \leq \beta \leq \pi$ . Така форма комутуючої напруги є більш перспективною з погляду здатності компенсаційного перетворювача генерувати реактивну енергію.

Розглянемо режим 3-1 (А). Величину та форму комутуючої напруги режиму представлено на рис. 6, а. Накладемо її на синусоїду лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора (рис. 9, а). Згідно (11) нормоване значення комутуючої напруги в момент комутації буде меншим від його значення у базовому режимі (7) в 1.333 рази, тобто дорівнюватиме 0.429. З цього випливає, що максимальне значення випереджаючого кута регулювання, яке може бути досягнутим у разі застосування можливостей, обумовлених моментом подачі імпульсів керування на транзистори

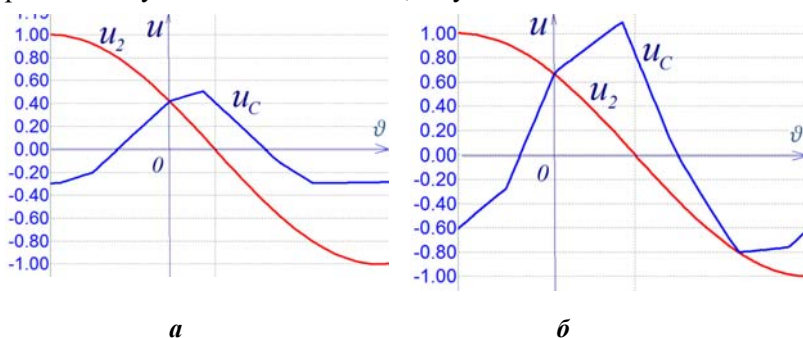


Рис. 9

комутуючої ланки, не перевищуватиме  $25.45^\circ$ . Це значення менше від того, яке можливо отримати у базовому режимі за однакових характеристик робочого режиму.

Але своєрідна форма кривої комутуючої напруги дає змогу збільшити величину випереджаючого кута регулювання у режимі 3-1 (А), зменшивши ємність

фази конденсаторів комутуючої ланки. Зауважимо, що цей захід має свої обмеження, обумовлені зміною характеру електромагнітного процесу. Межею у даному випадку є рівність від'ємного миттєвого значення комутуючої напруги миттєвому значенню лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора (рис. 9, б). При цьому нормоване значення комутуючої напруги у момент комутації дорівнюватиме 0.660, а випереджаючий кут регулювання досягатиме  $41.30^{\circ}$ .

Розглянемо режим 3-1 (Б). Величина і форма комутуючої напруги режиму представлені на рис. 6, б. Як і у попередньому випадку накладемо її на синусоїду лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора (рис. 10, а). Згідно (12) нормоване значення комутуючої напруги в момент комутації буде меншим від його значення в базовому режимі (7) удвічі, тобто дорівнюватиме 0.287. З цього випливає, що максимальне значення випереджаючого кута регулювання, яке може бути досягнутим, не перевищуватиме 16.680. Це значення менше від того, яке можливо отримати у базовому режимі чи у режимі 3-1 (А) без застосування зміни ємності фази конденсаторної батареї.

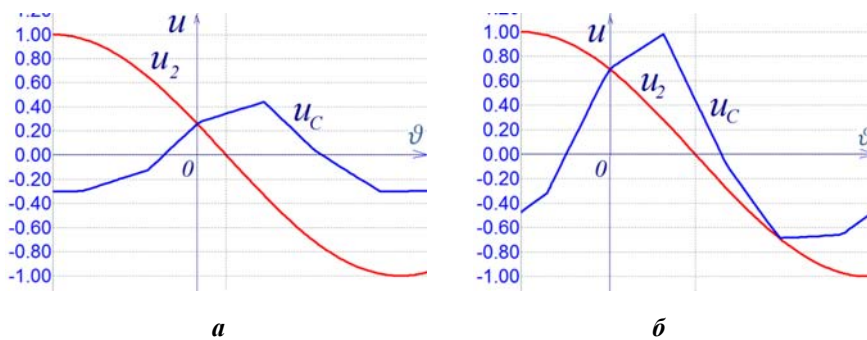


Рис. 10

Форма кривої комутуючої напруги у режимі 3-1 (Б) подібна до форми кривої комутуючої напруги у режимі 3-1 (А). Тому тут також є можливість збільшити величину випереджаючого кута регулювання, зменшивши ємність фази конденсаторів комутуючої ланки. Цей захід має обмеження такі ж, як і у попередньому випадку (рис.

10, б). При цьому нормоване значення комутуючої напруги у момент комутації дорівнюватиме 0.694, а випереджаючий кут регулювання досягатиме  $43.95^{\circ}$ .

Дослідження режиму 3-1 (В), проведено в рамках аналізу можливостей трифазного двомостового компенсаційного перетворювача щодо компенсації та генерації реактивної енергії, показали, що за зазначеним показником він поступається двом попереднім режимам, а саме 3-1 (А) та 3-1 (Б).

**Висновки.** Проведеними дослідженнями доведено наступне.

1. У разі затримки подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки в межах  $(0 \leq \beta \leq \pi/3)$  конденсаторна батарея перезаряджається, але комутуюча напруга у момент комутації дорівнює нулю. Тож такий режим керування є неприйнятним, оскільки перетворювач не стає компенсаційним.

2. Затримка подачі імпульсу керування в межах  $(\pi/3 \leq \beta \leq 2\pi/3)$  призводить до зростання величини комутуючої напруги у момент комутації від нуля до максимального значення. Причому за  $\beta = 2\pi/3$  (режим 3) крива комутуючої напруги має таку ж форму, як і у компенсаційному перетворювачі попереднього покоління, що стало підставою для розгляду цього режиму як базового.

3. Якщо регулювання транзисторів комутуючої ланки здійснюється в діапазоні зміни моменту подачі імпульсів керування в межах  $2\pi/3 \leq \beta \leq \pi$ , величина комутуючої напруги у момент комутації зменшується від максимального значення до нуля. Але, виходячи зі здатності досліджуваного компенсаційного перетворювача забезпечити компенсацію реактивної енергії та генерування її максимальних обсягів у мережу живлення, найбільш ефективним з усіх досліджених у роботі режимів є регулювання транзисторів комутуючої ланки в діапазоні  $2\pi/3 \leq \beta \leq 5\pi/6$ .

1. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа, 1980. 423 с.

2. Чиженко А.И. Анализ электромагнитных процессов в компенсационном выпрямителе при ограниченных значениях индуктивности сглаживающего дросселя. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Енергоефективність*. 2001. С. 17–27.

3. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on *Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 261-266. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.

4. Чиженко О.І., Трач І.В. Вплив відхилень індуктивності мережі на режими та характеристики тиристорного компенсатору реактивної потужності. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 4. С. 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.048>.

5. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В. Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 62-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>.

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

7. 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>.

8. Бойко В.С. Трифазний двомостовий компенсаційний перетворювач паралельного типу. Патент України на корисну модель № 147874, 2021.

9. Бойко В.С., Шкардун О.В. Умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки трифазного мостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 3. С. 13-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>.

## COMMUTATING VOLTAGE OF THREE-PHASE DOUBLE-BRIDGE COMPENSATING CONVERTER

V.S. Boiko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
37, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: [vsboiko1941@gmail.com](mailto:vsboiko1941@gmail.com).

*The results of a study of electromagnetic processes in a three-phase two-bridge compensation converter, which is one of the options for the circuit implementation of new generation compensation converters, are presented. The commutating link of the converter contains a three-phase capacitor battery and a three-phase group of fully controlled devices. This technical solution makes it possible to make the process of recharging capacitors controllable. Moreover, it becomes possible to change not only the magnitude of the capacitor voltage, but also its shape. It was noted that in the previous generation of compensation converters there was no ability to change the shape of the commutating voltage. The latter is a significant advantage of new generation devices, since it allows for high energy characteristics of the converter. This is confirmed by the results of a study of the energy capabilities of the converter under study in nine operating modes presented in the publication and the conclusion on the most effective modes. References 9, figures 10.*

**Keywords:** capacitor battery, commutator, commutating voltage, harmonics, electric diode.

1. Rudenko V.S., Senko V.I., Chizhenko I.M. Fundamentals of converting technology. Moskva: Vysshaya shkola, 1980. 423 p. (Rus).

2. Chizhenko A.I. Analysis of electromagnetic processes in a compensation rectifier with limited values of the inductance of the smoothing choke. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. Enerhoefektyvnist*. 2001. Pp. 17–27. (Rus)

3. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A study of transitional modes of the electric network with the powerful electromechanical load and FACTS. IEEE 6th International Conference on *Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 261-266. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.

4. Chyzenko 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/techned2017.04.048>. (Ukr)

5. 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. <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>. (Ukr)

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

7. 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>.

8. Boiko V.S. Three-phase double-bridge parallel type compensation converter: Patent UA for utility model No 147874, 2021. (Ukr).

9. Boiko V.S., Shkardun O.V. Conditions for recharging the capacitors of the commutating link of the three-phase bridge compensation converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 3. Pp. 13-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>. (Ukr)

Надійшла 27.02.2024  
Остаточний варіант 04.04.2024