

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ У ТРИФАЗНОМУ ДВОМОСТОВОМУ КОМПЕНСАЦІЙНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ОДНІЄЮ КОМУТЮЮЧОЮ ЛАНКОЮ

В.С. Бойко*, докт. техн. наук
НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.
E-mail: VSBoiko@bigmir.net.

Наведено результати досліджень щодо енергетичних характеристик двомостового компенсаційного перетворювача паралельного типу. Перетворювач є одним із представників нового покоління пристроїв компенсаційного типу, основна особливість яких полягає у застосуванні в комутуючій ланці трифазної групи повністю керованих приладів (IGBT). Вони разом з трифазною конденсаторною батареєю створюють комутуючу ланку, елемент перетворювача, який здатний змінити характер електромагнітних процесів, а саме, забезпечити компенсацію власної реактивної енергії, а у разі необхідності – генерувати реактивну енергію у мережу живлення. Зазначені енергетичні можливості досліджуваного компенсаційного перетворювача залежать, в основному, від величини випереджаючого кута регулювання α та кута комутації γ . Тому основна мета роботи полягає у дослідженні можливостей їхньої зміни регулюванням процесу перезаряду конденсаторної батареї транзисторами комутуючої ланки. Доведено, що, враховуючи особливості режимів роботи перетворювача у процесі енергозабезпечення споживачів постійного струму, є можливість, узгоджуючи кути регулювання та комутації, досягти найвищої енергоефективності функціонування перетворювача. Бібл. 6, рис. 6.

Ключові слова: конденсаторна батарея, комутатор, комутуюча напруга, електричний вентиль, енергетичні характеристики, перетворювач, реактивна енергія, кут комутації.

Вступ. Компенсаційні перетворювачі є високоефективними засобами силової електроніки, які разом із забезпеченням енергоживлення технологічних споживачів здатні компенсувати власну реактивну енергію, а у разі необхідності – генерувати реактивну енергію у мережу. Дослідження компенсаційних перетворювачів – один із напрямків розвитку засобів силової електроніки, в яких важливою складовою схемотехнічного рішення є наявність конденсаторів у силових колах. Розробка і дослідження таких засобів ведуться як у нашій країні [1, 2], так і за її межами [3, 4]. У нашій державі основними науковими центрами з розробки та дослідження перетворювачів електричної енергії компенсаційного типу є Інститут електродинаміки НАН України і НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». У роботі наведено результати дослідження двомостового компенсаційного перетворювача (рис. 1), технічне рішення якого розроблене автором [5], що є представником київської політехніки.

Досліджуваний компенсаційний перетворювач є одним із пристроїв нового покоління, характерною особливістю яких є наявність у силових колах трифазної групи повністю керованих приладів (наприклад, IGBT). Вони разом з

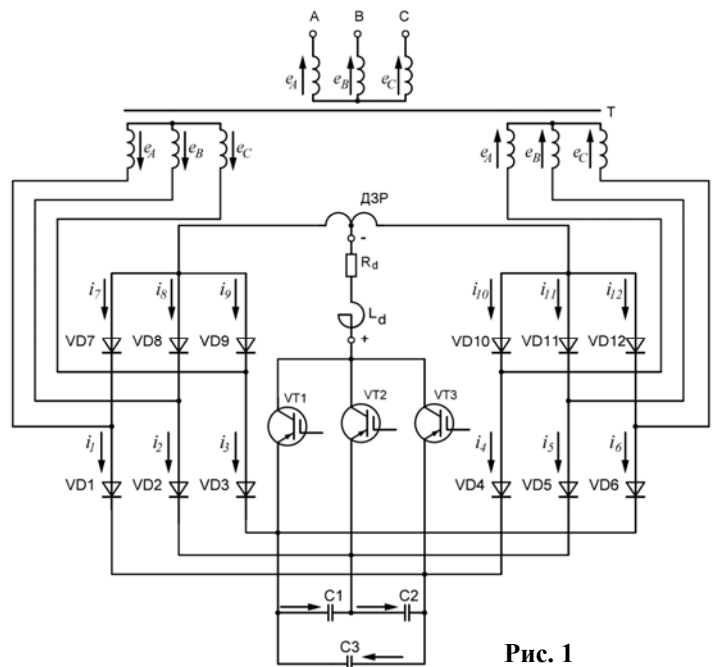


Рис. 1

© Бойко В.С., 2025

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

© Видавець Інститут електродинаміки 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>

трифазною конденсаторною батареєю створюють комутуючу ланку. Транзистори комутуючої ланки забезпечують перезаряд конденсаторів складовими струму навантаження і, що важливо, роблять цей процес регульованим. Попередньою публікацією [6] доведено, що за рахунок керованості процесу перезаряду конденсаторів комутуючої ланки є можливість зміни як величини, так і форми комутуючої напруги. Оскільки комутуюча напруга (напруга конденсаторів) є основним чинником, здатним забезпечити випереджаючу комутацію струму силовими електричними вентилями (СЕВ), вона ж забезпечує і енергоефективний режим роботи перетворювача у разі живлення споживачів постійного струму.

Енергоефективним автор називає такий режим роботи перетворювача, за якого здійснюється живлення споживача енергії (навантаження) і забезпечуються вимоги електромагнітної сумісності з мережею живлення за показником коефіцієнта потужності. Наприклад, коли компенсаційний перетворювач попереднього покоління застосовувався як джерело живлення на хімічних підприємствах, він мав бути компенсованим. Тобто його власна реактивна потужність мала компенсуватися конденсаторами комутуючої ланки. Коефіцієнт потужності відносно мережі живлення мав бути близьким до одиниці.

Інші вимоги висувалися до компенсаційних перетворювачів, які працювали паралельно з некомпенсаційними на перетворювальній підстанції у кольоровій металургії. Задля компенсації реактивної потужності обладнання підстанції в цілому компенсаційний перетворювач мав генерувати максимально можливі обсяги реактивної енергії. Енергетичні можливості компенсаційного перетворювача – це можливість генерування у мережу максимальних обсягів реактивної енергії. Вони залежать від багатьох факторів, основними з яких є: величина випереджаючого кута регулювання α , форма стуму комутації, величина кута комутації γ .

У роботі [6] один із режимів роботи перетворювача прийнятий за базовий. Наведемо деякі дані цього режиму, оскільки вони будуть використані і у поточній публікації.

Система ЕРС трифазного перетворювального трансформатора (Т) схеми на рис. 1 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; ϑ – поточна змінна; ψ – початкова фаза напруги під час включення вентиля.

Навантаженням перетворювача є опір R_d . У колі навантаження встановлений реактор L_d , призначений для згладжування випрямленого струму.

Силові електричні вентиля компенсаційної частини перетворювача працюють у послідовності $VD1 \rightarrow VD2 \rightarrow VD3$ та $VD4 \rightarrow VD5 \rightarrow VD6$. Між моментами вступу в роботу зазначених трійок СЕВ 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 (ТКЛ) $VT1 \rightarrow VT3 \rightarrow VT2$.

У базовому режимі з моментом вступу в роботу силового електричного вентиля $VD1$ збігається момент включення транзистора $VT3$. Ураховуючи останнє та наведений вище алгоритм комутації струму СЕВ і транзисторами, на рис. 2 побудовано частину періоду кривої струму фази СЗ комутуючих конденсаторів. Вона на періоді також має шість інтервалів і подвоєну частоту.

За співвідношенням

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

розрахуємо комутуючу напругу в базовому режимі. При цьому врахуємо, що як крива струму конденсаторів, так і крива комутуючої напруги мають подвоєну частоту і шість інтервалів на періоді частоти мережі живлення. Тож розрахунок можна виконувати на половині періоду:

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

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

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

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

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

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

Початкове значення кривої комутуючої напруги розраховане за умови, що її середнє значення за період дорівнює нулю

$$u_C(0) = I_d / 9fC. \quad (3)$$

Маючи початкове значення кривої комутуючої напруги, побудуємо криву комутуючої напруги фази конденсаторної батареї в інтервалі половини періоду (рис. 2, де зображено струм і напругу фази конденсаторної батареї у базовому режимі за миттєвої комутації). Окрім того, це дає змогу визначити величину випереджаючого кута регулювання α у базовому режимі за миттєвої комутації струму силовими електричними вентилями. У [6] доведено, що його найбільше значення досягає близько 35° .

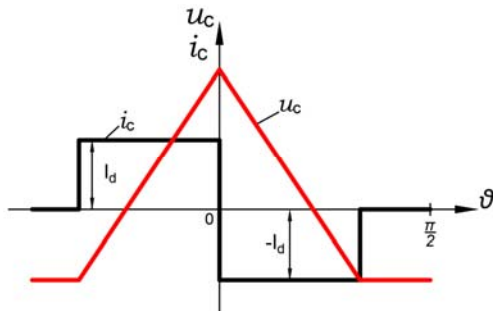


Рис. 2

Але не слід забувати, що не лише величиною випереджаючого кута регулювання визначаються енергетичні характеристики компенсаційного перетворювача. Ці характеристики суттєво залежать і від величини кута комутації γ .

Мета роботи: визначити вплив керування транзисторами комутуючої ланки на закономірність зміни струму комутації силовими електричними вентилями, величину кутів регулювання і комутації та режими роботи, за яких процес генерації реактивної енергії є більш ефективним.

Результати досліджень. Дослідимо процес формування комутуючої напруги та величину кута комутації γ у перетворювачі за схемою рис. 1. Цей комутаційний процес є більш складним, оскільки у контур комутації силових електричних вентилів окрім ЕРС вторинних обмоток фаз перетворювального трансформатора входить також і комутуюча напруга u_C однієї з фаз конденсаторної батареї. Тому рівняння контуру комутації струму вентилями цієї групи має вигляд

$$e_A - x_\gamma \frac{di_4}{d\vartheta} - e_C + x_\gamma \frac{di_6}{d\vartheta} - u_C = 0. \quad (4)$$

Врахуємо, що струм вентиля, який входить у роботу, є струмом комутації i_k , тобто $i_1 = i_k$, а струм вентиля, який з роботи виходить $i_3 = I_d - i_k$. Враховуючи викладене, рівняння (4) запишемо так

$$x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_k - I_d) + x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} = e_A - e_C.$$

Вважаючи, що у позакомутаційний проміжок часу випрямлений струм практично не змінюється, отримаємо

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} - u_C = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi). \quad (5)$$

Це універсальне рівняння комутації струму силовими електричними вентилями будь-якого перетворювача компенсаційного типу.

До речі, таким же було і рівняння комутації у компенсаційних перетворювачах попереднього покоління, де у комутуючій ланці використовувався трифазний зрівноважувальний реактор (ТЗР).

У разі заміни ТЗР на групу IGBT-транзисторів форма і величина струму конденсаторів (а також і комутуючої напруги) визначається декількома факторами, а саме: частотою проходження імпульсів керування транзисторами, зміщенням моменту подачі імпульсу управління по відношенню до моменту вступу в роботу силових електричних вентилів, величиною ємності фази комутуючих конденсаторів та величиною струму навантаження.

Частота імпульсів керування ТКЛ є фактором, що суттєво впливає як на характер електромагнітних процесів, так і на енергетичні характеристики перетворювача як джерела живлення споживачів.

Як впливає з матеріалів попередніх досліджень [6], за подвоєної частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки струм фази конденсаторної батареї в інтервалі комутації змінюється за різними законами. У базовому режимі, якщо межа між VT1 і VT3 збігається з початком комутації силового електричного вентиля VD1 (будемо вважати його режимом 1), закономірність зміни струму фази конденсаторної батареї буде наступною:

$$i_c = -\frac{1}{3}I_d - \frac{2}{3}i_k. \quad (6)$$

Враховуючи (2), (5) і (6), рівняння для контуру комутації запишемо так

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} + \frac{1}{\omega C} \int_0^\vartheta \left(\frac{2}{3}i_k + \frac{1}{3}I_d \right) d\vartheta - u_c(0) = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi). \quad (7)$$

Диференціюємо останнє і отримаємо

$$2\omega L_\gamma \frac{d^2 i_k}{d\vartheta^2} + \frac{2i_k}{3\omega C} + \frac{I_d}{3\omega C} = \sqrt{3}E_m \cos(\vartheta + \psi)$$

чи

$$2\omega L_\gamma \frac{d^2 i_k}{d\vartheta^2} + \frac{2i_k}{3\omega C} = \sqrt{3}E_m \cos(\vartheta + \psi) - \frac{I_d}{3\omega C}.$$

Рішення цього неоднорідного диференціального рівняння щодо закономірності зміни струму комутації складається з двох вимушених складових та однієї вільної

$$i_k = i'_{k1} + i'_{k2} + i''_k. \quad (8)$$

Рівняння для визначення коренів характеристичного рівняння

$$2\omega L_\gamma p^2 + \frac{2}{3\omega C} = 0, \quad \text{звідки } p^2 = -\frac{1}{3\omega^2 L_\gamma C}.$$

$$\text{Таким чином } p_{1,2} = \pm j \sqrt{\frac{1}{3\omega^2 L_\gamma C}} = \pm j \frac{\omega_0}{\omega} = \pm j\omega_0^*, \quad (9)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_\gamma C}}$ - власна частота контуру комутації.

Відповідно до характеру коренів вільну складову струму комутації запишемо так

$$i''_k = K_1 \cos \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta + K_2 \sin \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta. \quad (10)$$

Перше окреме рішення отримаємо, розв'язавши рівняння

$$\frac{d^2 i'_{k1}}{d\vartheta^2} + \frac{i'_{k1}}{3\omega^2 L_\gamma C} = -\frac{I_d}{6\omega^2 L_\gamma C}.$$

$$\text{При цьому отримаємо } i'_{k1} = -I_d / 2. \quad (11)$$

Друге окреме рішення визначимо з наступного рівняння:

$$\frac{d^2 i'_{k2}}{d\vartheta^2} + \frac{i'_{k2}}{3\omega^2 L_\gamma C} = \frac{\sqrt{3}E_m \cos(\vartheta + \psi)}{2\omega L_\gamma}. \quad (12)$$

$$\text{Його розв'язок дає } i'_{k2} = \frac{\sqrt{3}E_m \cos(\vartheta + \psi)}{2 / 3\omega C - 2\omega L_\gamma}. \quad (13)$$

Врахувавши (8), (10), (11) та (13), закономірність зміни струму комутації у загальному вигляді буде такою

$$i_k = -\frac{1}{2}I_d + \frac{\sqrt{3}E_m \cos(\vartheta + \psi)}{2 / 3\omega C - 2\omega L_\gamma} + K_1 \cos \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta + K_2 \sin \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta. \quad (14)$$

Якщо силовими електричними вентилями перетворювача є діоди, то рівняння струму комутації набуде вигляду

$$i_k = -\frac{1}{2}I_d + \frac{\sqrt{3}E_m \cos(\vartheta - \alpha)}{2 / 3\omega C - 2\omega L_\gamma} + K_1 \cos \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta + K_2 \sin \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta. \quad (15)$$

Розрахуємо сталі інтегрування.

1. У момент початку комутації за $\vartheta = 0$ струм комутації $i_k = 0$, звідки отримаємо

$$K_1 = \frac{1}{2}I_d - \frac{\sqrt{3}E_m \cos \alpha}{2 / 3\omega C - 2\omega L_\gamma}. \quad (16)$$

2. Комутація струму починається в момент, коли лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівняється за величиною з комутуючою напругою фази конденсаторної батареї, включеної між комутуючими вентилями, і різниця зазначених напруг при цьому дорівнюватиме нулю. Тому

$$K_2 = -\frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{\sqrt{3}E_m \sin \alpha}{2 / 3\omega C - 2\omega L_\gamma}. \quad (17)$$

Враховуючи (15–17), остаточний вираз струму комутації електричних вентилів компенсаційної частини досліджуваного перетворювача має вигляд

$$i_k = -\frac{1}{2}I_d + \frac{\sqrt{3}E_m \cos(\vartheta - \alpha)}{2 / 3\omega C - 2\omega L_\gamma} + \left(\frac{1}{2}I_d - \frac{\sqrt{3}E_m \cos \alpha}{2 / 3\omega C - 2\omega L_\gamma}\right) \cos \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta - \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{\sqrt{3}E_m \sin \alpha}{2 / 3\omega C - 2\omega L_\gamma} \sin \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta. \quad (18)$$

Поділимо останнє на половину випрямленого струму I_d досліджуваного перетворювача і отримаємо нормований вираз струму комутації за подвоєної частоти імпульсів керування ТКЛ, застосувавши наступну систему базисних величин:

- базисна напруга $U_\delta = \sqrt{3}E_m$;
- базисний струм $I_\delta = \sqrt{3}E_m / 2x_\gamma$, де x_γ – індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведений до його вторинної обмотки;
- базисна частота $\omega_\delta = \omega = 314$;
- базисна реактивність кола змінного струму $x_\delta = \sqrt{3}E_m / 2I_d$.

Нормований вираз струму комутації за подвоєної частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки

$$i_{k*} = -\frac{1}{2} + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} + \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0*} \vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0*} x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} \sin \omega_{0*} \vartheta. \quad (19)$$

Використавши співвідношення (19), отримаємо закономірність зміни струму комутуючих конденсаторів і комутуючої напруги за співвідношенням, нормований вираз якого у разі з'єднання конденсаторної батареї трикутником має вигляд

$$u_{C\Delta^*} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta + u_{C^*}(0). \quad (20)$$

Дослідженням питання щодо величини та форми комутуючої напруги у двомостовому компенсаційному перетворювачі у разі миттєвої комутації струму СЕВ доведено [6], що комутуюча напруга є кривою подвоєної частоти і має на періоді частоти мережі живлення шість інтервалів. Якщо врахувати наявність комутаційного процесу, інтервалів на періоді буде удвічі більше.

Оскільки криву подвоєної частоти можна аналізувати на половині періоду, на рис. 3 зображено шість інтервалів кривої струму фази конденсаторної батареї з врахуванням протяжності комутаційного процесу γ . Кількість інтервалів кривої комутуючої напруги така ж, як і кількість інтервалів кривої струму:

I інтервал: $i_{C^*} = -\frac{1}{3} - \frac{2}{3} i_{k^*}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \gamma;$

$$u_{C\Delta^*(1)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2} - \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(1)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\gamma}{2} - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$

II інтервал: $i_{C^*} = -1, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/3 - \gamma);$

$$u_{C\Delta^*(2)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(1)k} = -x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{3\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\gamma}{2} - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = (\pi/3 - \gamma)$,

$$u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

III інтервал: $i_{C^*} = -\frac{1}{3} + \frac{1}{3} i_{k^*}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \gamma;$

$$u_{C\Delta^*(3)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$

IV інтервал: $i_{C^*} = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/3 - \gamma);$

$$u_{C\Delta^*(4)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0) = u_{C\Delta^*(4)k}.$$

V інтервал: $i_{C^*} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} i_{k^*}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \gamma;$

$$\begin{aligned} u_{C\Delta^*(5)} &= \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\vartheta + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C\Delta^*(4)k} = \\ &= x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\vartheta + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta - \frac{\pi}{2} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0). \end{aligned}$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2} \right) + u_{C^*}(0).$

VI інтервал: $i_{C^*} = 1, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/3 - \gamma);$

$$u_{C\Delta^*(6)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{3}{2} \vartheta + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2}\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = (\pi/3 - \gamma)$, $u_{C\Delta^*(6)k} = u_{C^*}(0)$.

Визначимо початкове значення комутуючої напруги, виходячи з умови, що крива комутуючої напруги не має постійної складової, тобто її середнє значення за період дорівнює нулю. Виконавши розрахунок, подробиці якого тут не наведено, отримаємо

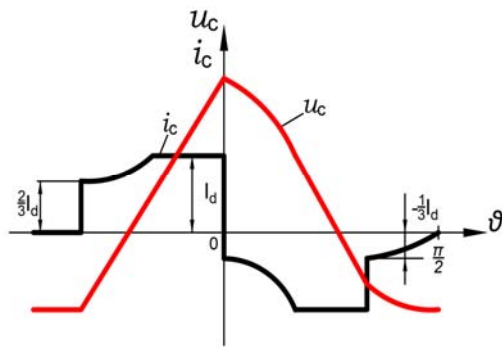


Рис. 3

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right). \quad (21)$$

Застосовуючи результати розрахунку комутуючої напруги за окремими інтервалами і співвідношення (21), на рис. 3, що ілюструє струм фази конденсатора і комутуючу напругу у режимі 1, побудовано половину періоду цієї напруги.

Співвідношення (19) і (21) є системою нелінійних рівнянь для розрахунку кутів регулювання та комутації. Задля цього використано метод Н'ютона. Для роботи перетворювача за режимом, який на початку дослідження позначений як режим 1, рівняння згідно правил методу

Н'ютона, запишуться так

$$1 = -\frac{1}{2} + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} + \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0^*} \vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0^*} x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} \sin \omega_{0^*} \vartheta, \\ \sin \alpha = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right).$$

Сама ж система рівнянь, яка підлягає розв'язку, після деяких математичних перетворень, набуває вигляду

$$F(\alpha, \gamma) = \cos(\gamma - \alpha) - \cos \alpha \cdot \cos \omega_{0^*} \gamma - (\sin \alpha \cdot \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*} - x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)(1.5 - 0.5 \cdot \cos \omega_{0^*} \gamma), \\ G(\alpha, \gamma) = (1.5 \cdot \gamma - \pi) x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1) - (\sin(\gamma - \alpha) - \sin \alpha + \sin \alpha (\cos \omega_{0^*} \gamma + 1) / \omega_{0^*} - \\ - (\cos \alpha \cdot \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*} + 0.5 \cdot x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1) \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*}. \quad (21)$$

Виберемо довільно характеристики одного з режимів роботи досліджуваного двомостового компенсаційного перетворювача і розрахуємо величину випереджаючого кута регулювання α та кута комутації γ . Характеристики режиму: приведена індуктивність фази кола змінного струму $L_{\gamma} = 0.0025$ Гн; ємність фази комутуючих конденсаторів $C = 0.00014$ Ф; лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора $U_m = 100$ В; опір навантаження $R_d = 10$ Ом. Наведеним даним згідно (9) відповідає власна частота контуру комутації $\omega_0 = (3L_{\gamma}C)^{-1/2} = (3 \cdot 0.0025 \cdot 0.00014)^{-1/2} = 976$ рад. При цьому нормоване значення власної частоти контуру комутації дорівнює $\omega_{0^*} = 3.1$. Відповідно наведеним даним випереджаючий кут регулювання $\alpha = 34.63^\circ$, а кут комутації $\gamma = 28.91^\circ$.

Якщо у базовому режимі межа між VT1 і VT3 збігається з кінцем комутації силового електричного вентиля VD1, закономірність зміни струму фази конденсаторної батареї буде наступною:

$$i_C = I_d - \frac{2}{3} i_k. \quad (22)$$

Позначимо цей режим роботи як режим 2. Користуючись тією ж методикою, що і у режимі 1, нормований вираз струму комутації за подвоєної частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки без деталей доведення запишемо так

$$i_{k^*} = 1.5 + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} + \left(-1.5 - \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0^*} \vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0^*} x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} \sin \omega_{0^*} \vartheta. \quad (23)$$

Останнє співвідношення буде використане як перше рівняння із системи рівнянь задля розрахунку випереджаючого кута регулювання α та кута комутації γ . Друге рівняння, як і у режимі 1, отримаємо з виразу початкового значення комутуючої напруги у момент комутації. Для цього, враховуючи наведений вище алгоритм комутації струму СЕВ і транзисторами, а також додаткову

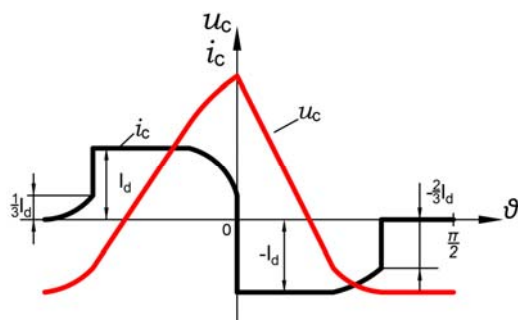


Рис. 4

затримку подачі імпульсу керування на ТКЛ на рис. 4 (зображено струм фази конденсатора і комутуюча напруга у режимі 2), побудовано частину періоду кривої струму фази СЗ комутуючих конденсаторів. Вона, як і у режимі 1, має подвоєну частоту і на половині періоду також містить шість інтервалів. Кількість інтервалів кривої комутуючої напруги така ж, як і кількість інтервалів кривої струму. Застосовуючи співвідношення (20), розрахуємо криву комутуючої напруги на половині періоду за окремими інтервалами:

I інтервал: $i_{C^*} = 1 - \frac{2}{3}i_{k^*}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \gamma;$

$$u_{C\Delta^*(1)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{3\vartheta}{2} - \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(1)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{3\gamma}{2} - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$

II інтервал: $i_{C^*} = -1, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/3 - \gamma);$

$$u_{C\Delta^*(2)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(1)k} = -x_{\gamma^*}\omega_0^2 \frac{3\vartheta}{2} + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{3\gamma}{2} - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = (\pi/3 - \gamma)$, $u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{2} + 3\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$

III інтервал: $i_{C^*} = -1 + \frac{1}{3}i_{k^*}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \gamma;$

$$u_{C\Delta^*(3)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{2} + 3\gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$

IV інтервал: $i_{C^*} = 0, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/3 - \gamma);$

$$u_{C\Delta^*(4)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0) = u_{C\Delta^*(4)k}.$$

V інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3}i_{k^*}, \quad 0 \leq \vartheta \leq \gamma;$

$$\begin{aligned} u_{C\Delta^*(5)} &= \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(4)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(4)k} = \\ &= x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(\frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta - \frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0). \end{aligned}$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2} \right) + u_{C^*}(0).$

VI інтервал: $i_{C^*} = 1, \quad 0 \leq \vartheta \leq (\pi/3 - \gamma);$

$$u_{C\Delta^*(6)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{3}{2} \vartheta + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2}\right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу за $\vartheta = (\pi/3 - \gamma)$, $u_{C\Delta^*(6)k} = u_{C^*}(0)$.

Визначимо початкове значення комутуючої напруги, виходячи з умови, що крива комутуючої напруги не має постійної складової, тобто її середнє значення за період дорівнює нулю. Виконавши розрахунок, подробиці якого тут не наведено, отримаємо

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right). \quad (24)$$

Застосовуючи результати розрахунку комутуючої напруги за окремими інтервалами у режимі 2 і співвідношення (24), на рис. 4 побудовано половину періоду цієї напруги.

Співвідношення (23) і (24) є системою нелінійних рівнянь для розрахунку кутів регулювання і комутації у режимі 2. Для роботи перетворювача за режимом 2 рівняння, згідно правил методу Н'ютона, запишуться так

$$1 = 1.5 + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} - \left(1.5 + \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0^*} \vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0^*} x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)} \sin \omega_{0^*} \vartheta,$$

$$\sin \alpha = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta\right).$$

Сама ж система рівнянь, яка підлягає розв'язку, після деяких математичних перетворень набуває вигляду

$$F(\alpha, \gamma) = \cos(\gamma - \alpha) - \cos \alpha \cdot \cos \omega_{0^*} \gamma - (\sin \alpha \cdot \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*} + x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1)(0.5 - 1.5 \cdot \cos \omega_{0^*} \gamma),$$

$$G(\alpha, \gamma) = -\pi \cdot x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1) - (\sin(\gamma - \alpha) - \sin \alpha + \sin \alpha (\cos \omega_{0^*} \gamma + 1) / \omega_{0^*} - (\cos \alpha \cdot \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*} - ; \quad (25)$$

$$- 1.5 \cdot x_{\gamma^*}(\omega_{0^*}^2 - 1) \sin \omega_{0^*} \gamma) / \omega_{0^*}.$$

Розрахунок кутів регулювання і комутації у режимі 2 здійснимо за тими ж даними, що і у режимі 1. Відповідно наведеним даним випереджаючий кут регулювання $\alpha = 26.67^\circ$, а кут комутації $\gamma = 17.36^\circ$.

Аналітичний розрахунок величини випереджаючого кута регулювання та кута комутації у різних режимах роботи перетворювача доводить, що їхню величину можна регулювати, змінюючи момент подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки. При цьому інші характеристики складових перетворювача електричної енергії не змінюються. Тобто є можливість таким способом підібрати необхідні значення кутів регулювання і комутації, за яких якраз у цьому робочому режимі будуть досягнуті найкращі енергетичні характеристики чи, іншими словами, досягнуті найбільш високі енергетичні можливості. Важливим є те, що напрямок зміни зазначених величин між собою не пов'язаний, як це було у компенсаційних перетворювачах попереднього покоління. Там збільшення випереджаючого кута регулювання за інших однакових умов призводило до зменшення кута комутації.

Наведені результати аналітичного розрахунку підтверджують факт більш широких можливостей компенсаційних перетворювачів нового покоління щодо регулювання обсягів реактивної енергії, які вони здатні генерувати. Однак отримані кількісні дані не розкривають механізму досягнення високих енергетичних можливостей. Розглянемо це питання докладно.

На рис. 5 (кут комутації γ і площа комутації у режимі 1) і рис. 6 (кут комутації γ і площа комутації у режимі 2) здійснено накладання кривої комутуючої напруги на лінійну напругу вторинної обмотки перетворювального трансформатора для режимів 1 та 2 відповідно. Заштрихована ділянка між частиною кривої комутуючої напруги і лінійною напругою вторинної обмотки перетворювального трансформатора в межах протяжності комутаційного процесу у теорії компенсаційних перетворювачів носить назву «площадка комутації».

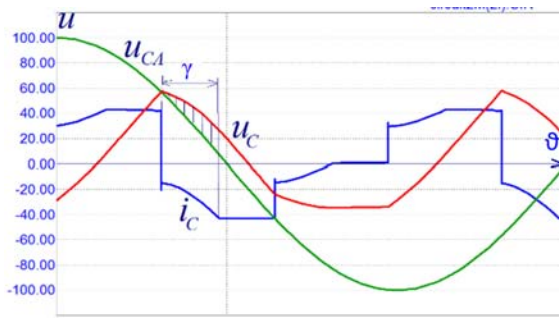


Рис. 5

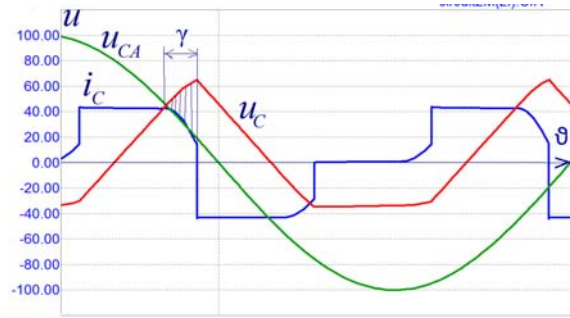


Рис. 6

Струм комутації вентилів некомпенсаційної частини перетворювача змінюється відповідно до наступного виразу:

$$i_k = \frac{\sqrt{3}E_m}{2x_\gamma}(1 - \cos \vartheta) .$$

Проходячи по вторинній обмотці перетворювального трансформатора, за рахунок наявності індуктивності, він створює комутаційну напругу. Назва «комутаційна» подібна до «комутуючої», але це зовсім інша напруга, і розраховується вона за співвідношенням $u_x = x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta_\gamma} = 0.5\sqrt{3}E_m \sin \vartheta$ або її нормований вираз $u_{x*} = 0.5 \sin \vartheta$. За формою ця напруга близька до трикутної, тому її інколи називають комутаційним піком, а її найбільше значення приходить на кінець процесу комутації при $\vartheta = \gamma$: $u_{x*max} = 0.5 \sin \gamma$. Величина «площини комутації»

$$S = \int_0^\gamma u_x d\vartheta = 0.5 \cdot \sqrt{3}E_m (1 - \cos \gamma) = I_d \cdot x_\gamma . \quad (26)$$

За таким же співвідношенням розраховується «площина комутації» і у компенсаційній частині досліджуваного перетворювача. Врахуємо, що режими 1 та 2 мають однакові технічні характеристики за винятком моменту подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки. Оскільки від цього залежить як величина, так і форма кривої комутуючої напруги, то стає зрозумілим, чому за однакової величині «площини комутації» на рис. 5 і 6 у режимі 2 кут комутації суттєво менший, ніж у режимі 1.

Є ще одна важлива обставина, пов'язана з питанням, що розглядається. Вона впливає з аналізу співвідношень (19) і (23), тобто закономірностей зміни струму комутації силовими електричними вентилями. У режимі 2 стала складова струму комутації більша, ніж у режимі 1. Фізично це означає, що у режимі 1 крива струму комутації за формою ближча до квадратичної, а у режимі 2 – до прямої. Ця обставина є важливою для оцінки енергетичних можливостей досліджуваного перетворювача, оскільки впливає на величину кута зсуву за фазою між першими гармоніками струму і напруги на входних затискачах перетворювача.

Висновки. Застосування повністю керованих приладів у комутуючій ланці компенсаційних перетворювачів нового покоління розширює їхні можливості щодо енергоефективного забезпечення споживачів постійного струму. Підвищені енергетичні характеристики досліджуваного перетворювача обумовлені сукупністю взаємопов'язаних факторів:

- можливістю регулювати не лише величину кривої комутуючої напруги, а і її форму;
- відповідно до режиму роботи перетворювача впливати на форму струму комутації силових електричних вентилів;
- узгоджувати величину випереджаючого кута регулювання і кута комутації з метою забезпечення найбільш ефективного енергетичного режиму роботи перетворювача щодо компенсації та генерування реактивної енергії.

Досліджуваний перетворювач також характеризується ефективним використанням конденсаторного обладнання, оскільки дві його мостові половини комплектуються однією комутуючою ланкою, яка забезпечує їхній компенсаційний режим роботи.

1. 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>.
2. 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>.
3. Trainer D., Withanage R., Whitehouse R., Cross A. Multilevel voltage source converter. Patent US No 8879291 B2, 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. Бойко В.С. Трифазний двомостовий компенсаційний перетворювач паралельного типу. Патент України на корисну модель № 147874, 2021.
6. Бойко В.С. Комутуюча напруга трифазного двомостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 3. С. 25-35. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>.

ELECTROMAGNETIC PROCESS IN A THREE-PHASE DOUBLE-BRIDGE COMPENSATING CONVERTER WITH ONE COMMUTATING LINK

V.S. Boiko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

37, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: VSBoiko@bigmir.net.

The results of studies of the energy characteristics of a two-bridge parallel-type compensation converter are presented. The converter is one of the representatives of a new generation of compensation-type devices, the main feature of which is the use of a three-phase group of fully controlled devices (IGBT) in the commutating link. They, together with a three-phase capacitor bank, create a switching link, a converter element that is capable of changing the nature of electromagnetic processes, namely, providing compensation for its own reactive energy, and, if necessary, generating reactive energy into the power supply network. The indicated energy capabilities of the compensation converter under study depend mainly on the value of the angle α and the commutation angle γ . Therefore, the main purpose of the publication is to study the possibilities of changing them by regulating the process of recharging the capacitor battery with using transistors of the commutating link. As a result, it has been proven that, taking into account the peculiarities of the operating modes of the converter during the process of supplying energy to DC consumers, it is possible, by coordinating the angles of regulation and commutating, to achieve high energy efficiency of the operation of the converter. References 6, figures 6.

Key words: capacitor bank, commutator, commutating voltage, electric valve, energy characteristics, converter, reactive energy, commutation angle.

1. 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>.
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/techned2018.06.062>. (Ukr).
3. Trainer D., Withanage R., Whitehouse R., Cross A. Multilevel voltage source converter. Patent US No 8879291 B2, 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.S. Three-phase double-bridge parallel type compensation converter. Patent UA for utility model No 147874, 2021. (Ukr).
6. Boiko V.S. Commutating voltage of the three-phase double-bridge compensating converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 3. Pp. 25-35. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. (Ukr).

Надійшла 10.06.2024
Остаточний варіант 26.06.2024