

КОМУТАЦІЙНИЙ ПРОЦЕС У ТРИФАЗНОМУ ДВОМОСТОВОМУ КОМПЕНСАЦІЙНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Наведені результати аналізу енергетичних процесів у досліджуваному компенсаційному перетворювачі при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами. Виявлено наявність трьох режимів роботи, які відрізняються закономірністю зміни струму фази конденсаторної батареї. Один із цих режимів досліджується докладно. При цьому отримано новий науковий результат. Він засвідчує, що у випадку, коли комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, величина комутуючої напруги у момент комутації не залежить від величини затримки подачі імпульсів керування на транзистори. Для підтвердження і верифікації отриманих результатів застосоване схемотехнічне моделювання у пакеті *Microworld*. Описана методика моделювання, наведені її результати, проведено аналіз результатів. Порівняльний аналіз числових значень характеристик енергетичних процесів досліджуваного перетворювача, отриманих в результаті аналітичного розрахунку і схемотехнічного моделювання, показав, що розбіжність не перевищує 4%. Це свідчить про адекватність застосованої методики моделювання і прийнятну точність результатів аналітичних розрахунків. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: конденсаторна батарея, схемотехнічна модель, комутуюча напруга, електричний вентиль, кут комутації, кут регулювання.

Вступ. Схема двомостового трифазного компенсаційного перетворювача наведена на рис. 1. Він відноситься до нового покоління пристроїв силової електроніки компенсаційного типу, створення та дослідження яких ведеться у Національному технічному університеті України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» [1]. Живлення перетворювача здійснюється через трифазний трансформатор з двома вторинними вентильними обмотками, з'єднаними за прямою та зворотною зіркою. Перетворювач містить дві трифазні групи силових електричних вентилів компенсаційної частини (VD1 – VD3 та VD4 – VD6), дві трифазні групи силових електричних вентилів некомпенсаційної частини (VD7 – VD9 та VD10 – VD12), комутуючу ланку, яка складається з трифазної конденсаторної батареї і трифазної групи повністю керованих приладів (типів GTO, IGCT або IGBT) та навантаження R_n і L_n .

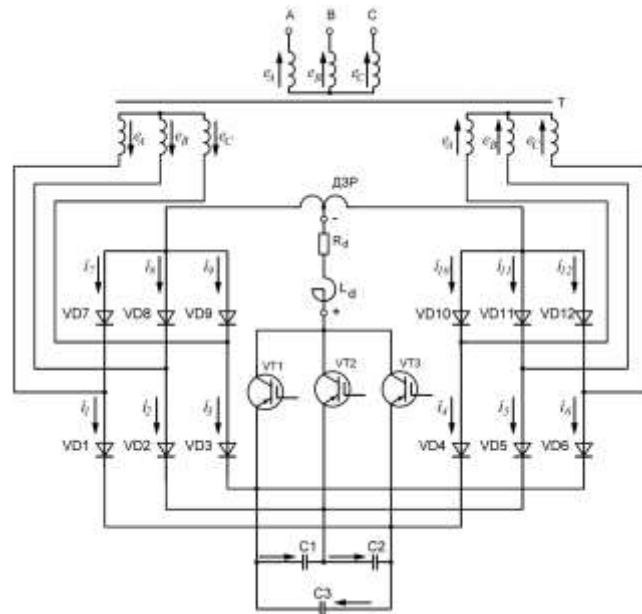


Рисунок 1 – Схема трифазного двомостового компенсаційного перетворювача

Складна схемотехнічна побудова досліджуваного перетворювача та широкі можливості щодо регулювання процесу живлення споживачів постійного струму, обумовлюють різноманіття робочих режимів та особливостей електромагнітних процесів, що їх супроводжують.

Перші результати дослідження електромагнітних процесів у трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі опубліковані в [2]. У публікації відмічалось, що перетворювач відноситься до засобів силової електроніки з конденсаторами у силових колах. Розробка і дослідження таких пристроїв проводиться як у нашій країні [3,4], так і за її межами [5,6].

У публікації [2] ставилося за мету визначення впливу керування транзисторами комутуючої ланки на закономірність зміни струму комутації силовими електричними вентилями, величину кутів регулювання і комутації, та визначення енергоефективних режимів роботи. Обсяг досліджень був обмежений режимами роботи, які забезпечувались регулювання транзисторів комутуючої ланки імпульсами подвоєної частоти. При цьому урахувалась величина випрямленого струму (струму навантаження I_d), сміність фази комутуючих конденсаторів C , індуктивність кола змінного струму L_γ умови регулювання робочого режиму транзисторами комутуючої ланки θ та т. ін.

За результатами проведених досліджень доведено, що стосовно комутаційного процесу у досліджуваному перетворювачі за схемою рис. 1, усе різноманіття робочих режимів, при подвоєній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, підпорядковується двом узагальненим співвідношенням струму комутації i_k , які залежать від закономірності зміни струму i_C фази конденсаторної батареї в інтервалі комутації. Варіанти виразів струму фази конденсаторної батареї наведені далі:

$$i_{C(1)} = -\frac{1}{3}I_d - \frac{2}{3}i_k; \quad (1)$$

$$i_{C(2)} = I_d - \frac{2}{3}i_k. \quad (2)$$

Кожному варіанту закономірності зміни струму фази конденсаторної батареї відповідає вираз струму комутації силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача. У публікації [1] наведено нормовані вирази струмів комутації. При цьому застосована наступна система базисних величин:

$$\text{базисна напруга } U_0 = \sqrt{3}E_m;$$

базисний струм: $I_0 = \sqrt{3}E_m / 2x_\gamma$, де x_γ - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведене до його вторинної обмотки;

$$\text{базисна частота } \omega_0 = \omega = 314;$$

$$\text{базисна реактивність кола змінного струму: } x_0 = \sqrt{3}E_m / 2I_d.$$

Остаточно нормований вираз струму комутації при подвоєній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки записується так:

$$i_{k*(1)} = -\frac{1}{2} + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} + \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0*}\vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0*}x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} \sin \omega_{0*}\vartheta; \quad (3)$$

$$i_{k*(2)} = 1.5 + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} + \left(-1.5 - \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0*}\vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0*}x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} \sin \omega_{0*}\vartheta. \quad (4)$$

Дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі за схемою трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, при більш високих частотах імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки, раніше не проводилося.

Мета роботи. Визначити вплив підвищеної (чотирикратної) частоти імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки на закономірність зміни струму комутації силовими електричними вентилями та величину кутів регулювання і комутації, які є основною енергетичною характеристикою компенсаційного перетворювача.

Результати досліджень. Система вхідної ЕРС трифазного перетворювального трансформатора схеми рис. 1 є стандартною трифазною системою прямого чергування фаз:

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

де E_m - амплітуда вторинної фазної ЕРС перетворювального трансформатора; ϑ - поточна змінна; ψ - початкова фаза напруги при включенні вентиля.

Комутаційний процес в анодних групах силових електричних вентилів VD7 – VD12 у поточній публікації не розглядається, оскільки він є відомим. Зазначені силові електричні вентиля працюють у

звичайному (некомпенсаційному) режимі і їх комутаційний процес відбувається точно так, як і у трифазному мостовому випрямлячі за схемою Ларіонова.

Режим роботи з випереджаючим кутом регулювання α (компенсаційний режим) мають силові електричні вентиля катодної групи VD1 – VD6. Оскільки система трифазних ЕРС перетворювального трансформатора є системою прямого чергування фаз, послідовність вступу в роботу силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача буде такою: 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, відповідно до схеми з'єднання вентильних обмоток.

Як зазначено у меті роботи, у публікації представлені результати дослідження режимів роботи перетворювача при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Це також відповідає прямому чергуванню фаз. Відповідно, послідовність вступу в роботу транзисторів комутуючої ланки VT1 → VT2 → VT3.

Аналіз енергетичних процесів у досліджуваному компенсаційному перетворювачі з урахуванням алгоритму комутації силових електричних вентилів та транзисторів комутуючої ланки при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами, також свідчить про широкий спектр їх особливостей, пов'язаних зі застосуванням зміни моменту подачі імпульсів керування на транзистори. У роботі здійснено графічну побудову кривих струму фази конденсаторної батареї для усіх можливих режимів роботи з урахуванням усіх викладених вище факторів. Проведене графічне дослідження виявило наявність трьох режимів роботи, які відрізняються закономірністю зміни струму фази конденсаторної батареї. Один із цих режимів, який досліджувався першим, характеризувався тим, що комутаційний процес у силовому електричному вентилі VD1 відбувався в інтервалі часу, протягом якого працював транзистор комутуючої ланки VT2.

Але це не основна характеристика досліджуваного режиму роботи. Більш важливим для енергетичного процесу є те, що в інтервалі роботи силового електричного вентиля VD1 транзистор тієї ж фази VT1 вступає в роботу лише один раз. Це впливає з того, що протяжність роботи силового електричного вентиля складає $(2\pi/3 + \gamma)$, а імпульс керування транзисторами комутуючої ланки при чотирикратній частоті має протяжність $\pi/6$. Тож забезпечити досліджуваний режим роботи перетворювача можливо лише за рахунок певного інтервалу зсуву імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки. Тому отримана графічно закономірність зміни половини періоду струму фази конденсаторної батареї представлена на рис. 2 у вигляді трьох графіків. Графічна побудова здійснена якісно, без урахування величини випереджаючого кута регулювання силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача.

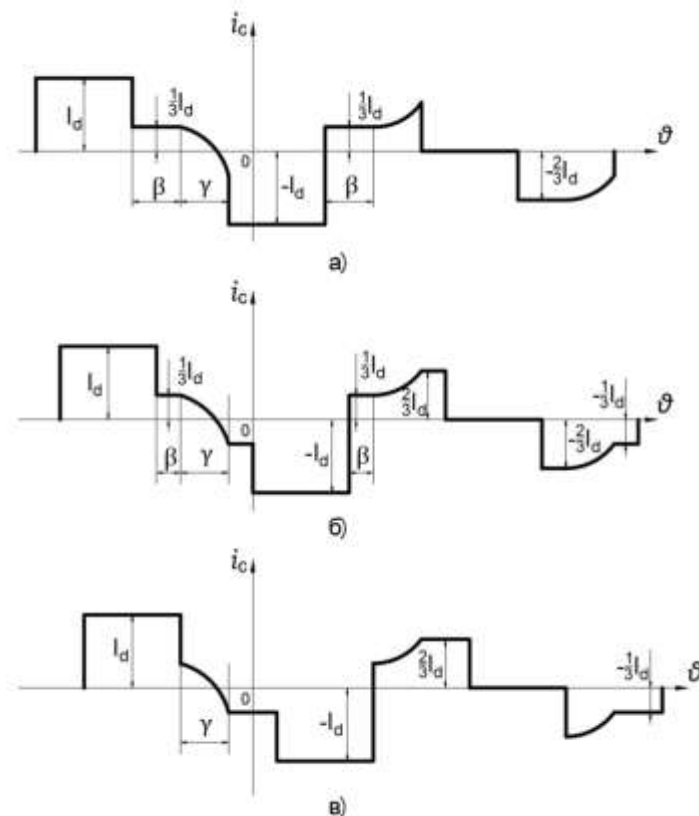


Рисунок 2 – Форма струму фази конденсаторної батареї

Рис. 2,а відповідає випадку, коли початок комутації силового електричного вентиля VD1 починається в інтервалі роботи VT2, а закінчується – коли VT2 виходить з роботи.

Рис. 2,б відповідає випадку, коли комутація силового електричного вентиля VD1 починається і закінчується в інтервалі роботи VT2. Тож принагідно відмітимо, що усі викладені вище міркування стосуються лише таких режимів роботи перетворювача, при яких кут комутації силових електричних вентилів його компенсаційної частини не перевищує $\pi/6$.

Рис. 2,в відповідає випадку, коли початок комутації силового електричного вентиля VD1 збігається з моментом вступу в роботу транзистора VT2.

Але у всіх зазначених вище випадках, в інтервалі комутації струм фази конденсаторної батареї змінюється за законом

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

Для подальшого дослідження скористаємось методикою, яка застосовувалась у [2]. Там наведено універсальне рівняння комутації струму силовими електричними вентилями будь-якого перетворювача компенсаційного типу:

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} - u_c = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi). \quad (7)$$

$$\text{де } u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^\vartheta i_c d\vartheta + u_c(0). \quad (8)$$

Здійснивши спільний розв'язок (6), (7) і (8), отримаємо наступне рівняння для контуру комутації з:

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} + \frac{1}{\omega C} \int_0^\vartheta \left(\frac{2}{3}i_k - \frac{1}{3}I_d\right) d\vartheta - u_c(0) = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi). \quad (9)$$

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

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

Звернімо увагу, що останнє диференціальне рівняння відрізняється від наведеного у [2] лише знаком другого доданку правої частини. Тож його вирішення щодо закономірності зміни струму комутації також буде складатися з двох вимушених складових та однієї вільної:

$$i_k = i_{k1} + i_{k2} + i_k''. \quad (10)$$

Вільна і одна з вимушених складових будуть такими ж, як і у [2], а інша вимушена буде такою ж за величиною, але протилежною за знаком. Остаточну закономірність зміни струму комутації у загальному вигляді запишемо наступним чином:

$$i_k = \frac{1}{2}I_d + \frac{\sqrt{3}E_m \cos(\vartheta - \alpha)}{2/3\omega C - 2\omega L_\gamma} + K_1 \cos \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta + K_2 \sin \frac{\omega_0}{\omega} \vartheta. \quad (11)$$

Сталі інтегрування отримаємо, виходячи з наступних міркувань. У момент початку комутації при $\vartheta = 0$, струм комутації $i_k = 0$, та урахувавши той факт, що 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.

Застосувавши також наведену вище систему базисних величин, отримаємо остаточний нормований вираз струму комутації силових електричних вентилів при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки у досліджуваному режимі роботи компенсаційного перетворювача:

$$i_{k*(1)} = \frac{1}{2} + \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} - \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos \alpha}{x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)}\right) \cos \omega_{0*} \vartheta - \frac{\sin \alpha}{\omega_{0*} x_{\gamma*}(\omega_{0*}^2 - 1)} \sin \omega_{0*} \vartheta. \quad (12)$$

Ту ж саму систему базисних величин застосуємо щодо отримання нормованого виразу комутуючої напруги при з'єднанні конденсаторної батареї трикутником:

$$u_{c\Delta*} = \frac{3}{2} x_{\gamma*} \omega_{0*}^2 \int_0^\vartheta i_{k*} d\vartheta + u_{c*}(0). \quad (13)$$

Спільний розв'язок (13), (12) та (6) дає змогу отримати закономірність зміни комутуючої напруги у досліджуваному режимі роботи перетворювача. Розрахунок проведено за окремими інтервалами:

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

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

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

II інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

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

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{12} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta + \beta/2 \right) + u_{C^*}(0)$.

III інтервал: $i_{C^*} = -1$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(3)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(2)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{3\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{12} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta + \beta/2 \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(3)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \gamma - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta + \beta/2 \right) + u_{C^*}(0)$.

IV інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3}$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

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

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

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

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

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta + \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

VI інтервал: $i_{C^*} = 2/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(6)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(5)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \vartheta + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{3} + \frac{3\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta + \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0)$.

VII інтервал: $i_{C^*} = 0$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(7)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(6)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0) = u_{C\Delta^*(7)k}.$$

VIII інтервал: $i_{C^*} = -2/3$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(8)} = \frac{3}{2}x_{\gamma^*}\omega_0^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(7)k} = -x_{\gamma^*}\omega_0^2 \vartheta + x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \beta$, $u_{C\Delta^*(8)k} = x_{\gamma^*}\omega_0^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

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

$$u_{C\Delta^*(9)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(8)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\vartheta + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta - \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \gamma$, $u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2} - \beta \right) + u_{C^*}(0)$.

X інтервал: $i_{C^*} = -1/3$, $0 \leq \vartheta \leq (\pi/6 - \gamma - \beta)$;

$$u_{C\Delta^*(10)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(9)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\vartheta}{2} \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2} - \beta \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = (\pi/6 - \gamma - \beta)$, $u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0)$.

XI інтервал: $i_{C^*} = 1$, $0 \leq \vartheta \leq \pi/6$;

$$u_{C\Delta^*(11)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(10)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{3}{2} \vartheta \right) + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \pi/6$, $u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0)$.

XII інтервал: $i_{C^*} = \frac{1}{3}$, $0 \leq \vartheta \leq \beta$;

$$u_{C\Delta^*(12)} = \frac{3}{2} x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{C^*} d\vartheta + u_{C\Delta^*(11)k} = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \frac{\vartheta}{2} + x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(-\frac{\beta}{2} \right) + u_{C^*}(0).$$

В кінці інтервалу при $\vartheta = \beta$, $u_{C\Delta^*(12)k} = u_{C^*}(0)$.

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:

$$u_{C^*}(0) = x_{\gamma^*} \omega_{0^*}^2 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta \right). \tag{14}$$

Отриманий результат є неочікуваним, чи непередбачуваним. Зі співвідношення (14) випливає, що у випадку, коли комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, величина комутуючої напруги у момент комутації не залежить від величини β . Зміна цієї величини при регулюванні робочого режиму роботи перетворювача здійснюється регулюванням моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки.

Це новий науковий результат, оскільки іншими дослідженнями компенсаційних перетворювачів нового покоління подібних властивостей не було виявлено. Разом з тим, зміна форми кривої комутуючої напруги при зміні моменту подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки, результатами досліджень, представленими у поточній публікації, підтверджується. Досить звернути увагу на закономірність зміни кривої комутуючої напруги на окремих інтервалах, представлених вище. Як бачимо, у всі вираз входить величина β .

Будь-який новий науковий результат потребує підтвердження і верифікації. Змоделюємо у системі схемотехнічного моделювання Micro Cap 12 усі три випадки, досліджені аналітично у першій половині публікації. Відповідно до схеми рис. 1 досліджуваного трифазного двомостового компенсаційного перетворювача, на рис. 3 наведена його схемотехнічна модель, на якій зазначені параметри елементів моделі і струми її віток.

Складові моделі досліджуваного компенсаційного перетворювача.

1. Перетворювальний трифазний трансформатор. Ним моделюється трифазна система ЕРС прямого чергування фаз:

$$\begin{aligned} e_A &= 57.8 \sin(\vartheta + 0.523); \\ e_B &= 57.8 \sin(\vartheta - 1.57); \\ e_C &= 57.8 \sin(\vartheta + 2.618). \end{aligned} \tag{15}$$

Методика дослідження основного питання публікації полягає у наступному. Установлюються параметри елементів моделі, відповідно даних робочого режиму, що моделюється. Результати моделювання представляються у графічній формі і необхідні для аналізу дані роздруковуються. З аналізу даних моделювання робиться висновок щодо питання, яке досліджується.

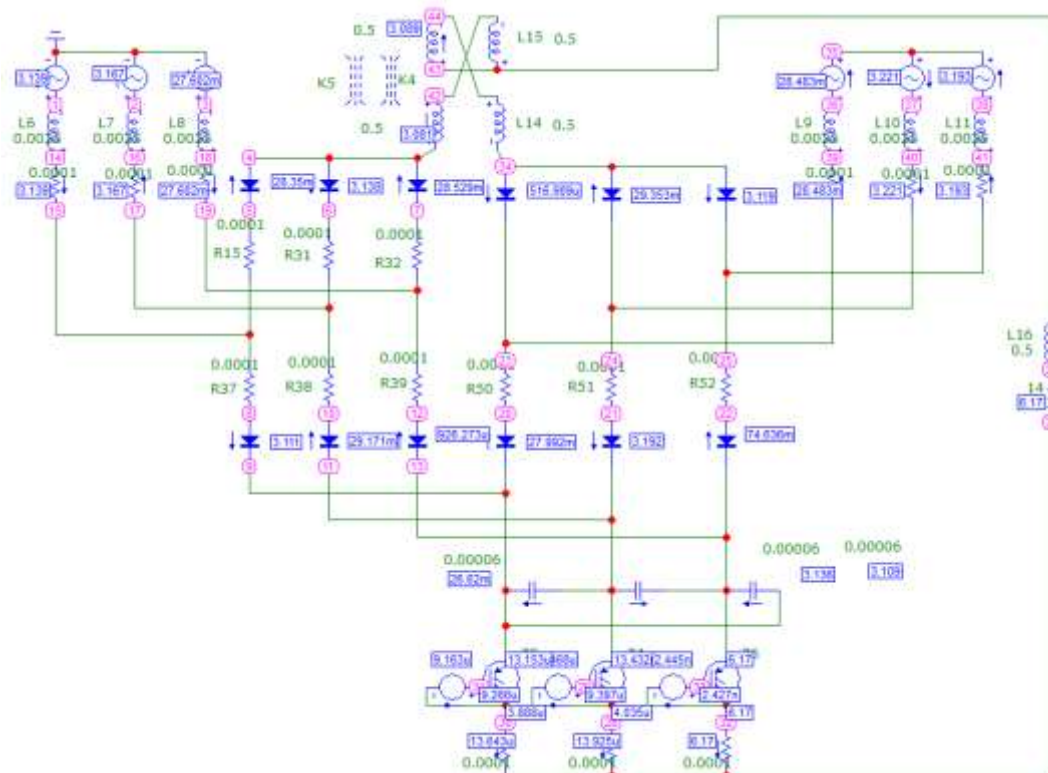


Рисунок 3 – Схематехнічна модель трифазного двомостового компенсаційного перетворювача

Як бачимо, амплітудне значення фазної ЕРС трансформатора дорівнює 57.8 В.

Приведене значення індуктивності кола змінного струму по фазам моделюється елементами L6, L7, L8, L9, L10, L11, числові значення яких однакове і дорівнює 0.0025 Гн.

2. Чотири трифазні групи силових електричних вентилів. Усі вони є діодами типу MPN3700. Їх характеристика запозичена з бібліотеки компонентів.

3. Трифазна конденсаторна батарея. Ємність усіх фаз батареї (С) однакова. У базовому режимі роботи дорівнює 0.00006 Ф.

4. Трифазна група транзисторів IGBT. У моделі використана характеристика транзисторів IGBT з бібліотеки компонентів типу IXGT40N60C2.

5. Джерела для формування імпульсів керування. Ці джерела застосовуються для формування імпульсів керування IGBT комутуючої ланки. Вони реалізовані компонентом «PULSE SOURCE» і генерують імпульси практично прямокутної форми з амплітудою 10 В.

6. Двофазний зрівноважувальний реактор. Моделюється чотирма індуктивностями по 0.5 Гн зі зв'язком між ними K4 та K5 по 0.99 Гн.

7. Коло навантаження моделі. Складається з активного опору величиною 14 Ом і згладжуючого дроселя індуктивністю 0.5 Гн.

Змодельовано усі три випадки робочого режиму. За зазначених числових даних цього режиму, наведених вище, власна частота контуру комутації згідно [2], складає:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_\gamma C}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0.0025 \cdot 0.00006}} = 1490.7 \text{ рад}.$$

Нормоване значення цієї частоти $\omega_{0*} = 1490.7 / 314 = 4.75$.

Також урахуємо, що базисний струм розраховується як $I_\sigma = \sqrt{3}E_m / 2x_\gamma$, де x_γ - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, приведене до його вторинної обмотки, то його числове значення у моделі трифазного двомостового компенсаційного перетворювача складає $I_\sigma = 100 / 1.57 = 63.69 \text{ А}$.

Комутуюча напруга є найважливішою характеристикою електромагнітного і енергетичного процесу компенсаційного перетворювача електричної енергії. Її величина і форма залежить від низки факторів: величини випрямленого струму перетворювача, ємності фази комутуючих конденсаторів та моменту подачі імпульсу керування на транзистори комутуючої ланки. Точніше, від величини затримки Θ подачі імпульсів керування на транзистори комутуючої ланки. Тому крива комутуючої напруги входить до

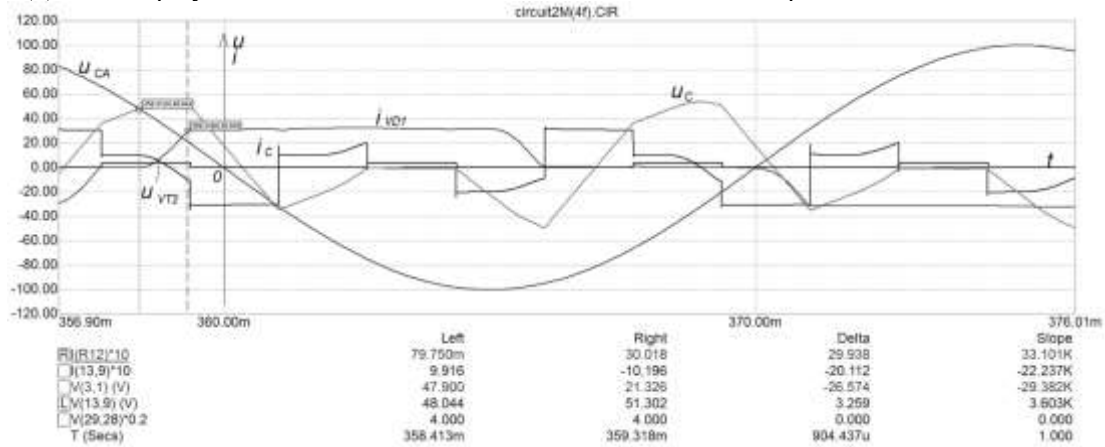
переліку тих характеристик, які мають бути відображеними у результатах моделювання досліджуваних у роботі випадках робочого режиму компенсаційного перетворювача.

Окрім кривої комутуючої напруги, для аналізу потрібно мати криву струму фази конденсаторної батареї, для підтвердження результатів її графічної побудови, наведеної на рис. 2.

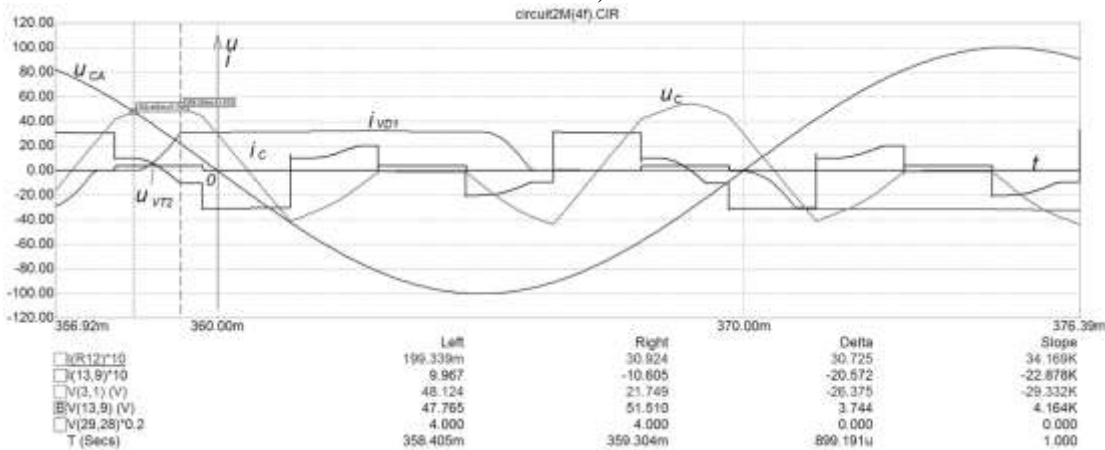
У публікації, за момент початку відліку при аналізі електромагнітних процесів, прийнято момент переходу лінійної напруги вторинної обмотки перетворювального трансформатора через нульове значення. Тому у роздруківці кінцевого результату схемотехнічного моделювання, має бути крива u_{CA} .

Наявність у роздруківці напруги на транзисторі комутуючої ланки u_{VT2} і струму силового електричного вентиля i_{VD1} потрібна для інформації щодо величини випереджаючого кута регулювання α , кута комутації γ та проміжку часу, протягом якого відбувається комутація.

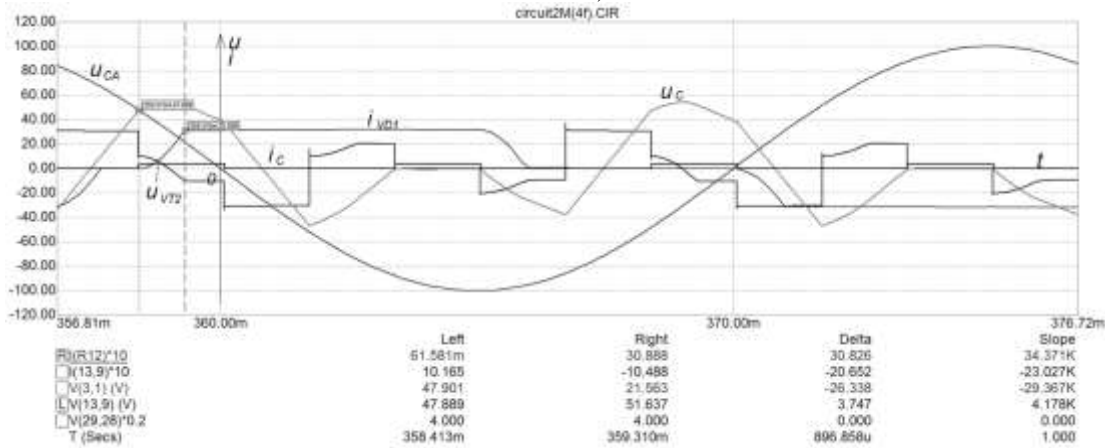
Дані щодо результатів схемотехнічного моделювання наведені на рис. 4.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Результати моделювання

На рис. 4 ліва суцільна вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу. У цей момент лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівнюється з комутуючою напругою.

Числові дані режимів роботи перетворювача, які моделюються, знаходяться у колонках даних під Left та Right. Відлік часу здійснюється у мілісекундах. Значення цього моменту – нижній рядок T(Secs) колонки даних. Інші числові дані:

$R(12)*10$ – величина струму силового електричного вентиля VD1 (A), помножена на 10;

$I(13,9)(V)*10$ – струм фази конденсаторної батареї (A);

$V(3,1)(V)$ – лінійна напруга u_{CA} вторинної обмотки трансформатора(B);

$V(13,9)(V)$ – величина комутуючої напруги конденсаторів u_C (B);

$V(29,28)(V)$ – імпульс керування транзистором VT2 комутуючої ланки.

На рис. 4 ліва суцільна вертикальна лінія позначає момент початку комутаційного процесу. Для усіх досліджених у роботі варіантів цей момент дорівнює 358,4 мс. У цей момент лінійна напруга вторинної обмотки перетворювального трансформатора зрівнюється з комутуючою напругою, яка дорівнює практично 48 В. Отриманий результат підтверджує висновок, який випливає із співвідношення (14), про те, що початкове значення комутуючої напруги не залежить від β .

У кінці комутаційного процесу струм комутації досягає свого максимального значення. Цей момент часу позначений правою пунктирною вертикальною лінією. Числова характеристика моменту знаходиться під Right і для усіх досліджених у роботі варіантів дорівнює 358,4 мс. Різниця часу Delta складає 0.9 мс. Ураховавши, що одній мілісекунді на рис.4 відповідають 18^0 , розрахуємо кут комутації електричних вентилів катодної частини досліджуваного перетворювача: $\gamma = 0.9 \cdot 18 = 16.2^0$.

Виходить, що від β не залежить не лише початкове значення комутуючої напруги, а й кут комутації γ . Принагідно також зазначимо, що у компенсаційних перетворювачах $u_{C*}(0) = \sin \alpha$. Оскільки у досліджуваних варіантах робочого режиму двомостового компенсаційного перетворювача початкове значення комутуючої напруги однакове і є відомим, розрахуємо випереджаючий кут регулювання:

$$\alpha = \arcsin[u_{C*}(0)] = \arcsin(0.48) = 28.7^0.$$

Цю ж характеристику електромагнітного процесу можна розрахувати і іншим шляхом, виходячи з наступних міркувань. На рис. 4 момент $t = 0$ є точкою початку природної комутації. Вона відповідає 360.0 мс на роздруківках рис. 4. Як зазначено вище, у досліджуваному компенсаційному перетворювачі комутація у силовому електричному вентилі VD1 починається у момент часу 358.4 мс, тобто на 1.6 мс раніше точки природної комутації. Ураховавши, що одній мілісекунді на рис.4 відповідають 18^0 , випереджаючий кут регулювання $\alpha = 1.6 \cdot 18 = 28.8^0$. Отриманий результат збігається з попереднім розрахунком.

Здійснимо верифікацію отриманих вище числових характеристик енергетичного процесу досліджуваного перетворювача. Використаємо нормований вираз струму комутації силових електричних вентилів (12) при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами комутуючої ланки у досліджуваному режимі роботи компенсаційного перетворювача. При цьому ураховуємо, що в кінці комутаційного процесу, при $\mathcal{S} = \gamma$, числове значення виразу (12) має дорівнювати 1. Перевіримо.

$$i_{k*(1)} = \frac{1}{2} + \frac{0.9763}{1.0416} - \left(\frac{1}{2} + \frac{0.8772}{1.0416}\right)0.2265 - \frac{0.4799}{4.9449}0.9740 = 1.0388. \quad (16)$$

Як бачимо, похибка розрахунку не перевищує 4%, що є цілком прийнятним, ураховуючи застосовану методику верифікації.

Висновки. З наведеного у публікації аналізу енергетичних процесів у досліджуваному трифазному двомостовому компенсаційному перетворювачі, з урахуванням алгоритму комутації силових електричних вентилів та транзисторів комутуючої ланки при чотирикратній частоті імпульсів керування транзисторами, випливають наступні висновки:

- коли комутаційний процес у силовому електричному вентилі однієї фази, відбувається в інтервалі роботи транзистора комутуючої ланки наступної фази, величина комутуючої напруги у момент комутації не залежить від величини β , яка фактично є показником затримки подачі імпульсів керування на транзистори;

- попередній висновок також свідчить про те, що незалежними від величини затримки є основні характеристики енергетичного процесу перетворювача, а саме: випереджаючий кут регулювання і кут комутації силових електричних вентилів компенсаційної частини перетворювача;

- у досліджуваному режимі розбіжність між результатами аналітичного розрахунку та схемотехнічного моделювання основних енергетичних характеристик перетворювача, не перевищує 4%, тобто, застосована методику аналізу роботи компенсаційного перетворювача шляхом схемотехнічного моделювання є адекватною і цілком прийнятною.

Список використаної літератури

1. Бойко В.С. Трифазний двомостовий компенсаційний перетворювач паралельного типу. Патент України на корисну модель № 147874, 2021.
2. Бойко, В. 2024. Комутуюча напруга трифазного двомостового компенсаційного перетворювача. Технічна електродинаміка. 3 (Трав 2024), 025. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. с.25-35.
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), 2019, p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.
4. 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.
5. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.
6. 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), 30 March 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.

V. Boiko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-1018-0642

O. Shkardun¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7980-8114

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**COMMUTATING PROCESS IN A THREE-PHASE TWO-BRIDGE
COMPENSATION CONVERTER**

The article presents the results of the analysis of energy processes in the studied compensating converter at a four-fold frequency of transistor control pulses. The presence of three operating modes differing in the pattern of change in the phase current of the capacitor battery is revealed. One of these modes is studied in detail. A new scientific result is obtained. It shows that in the case when the commutating process in the power electric valve of one phase occurs in the operating interval of the transistor of the commutating link of the next phase, the value of the commutating voltage at the moment of commutating does not depend on the delay in supplying control pulses to the transistors. To confirm and verify the obtained results, circuit simulation in the Micro Cap package is used. The modeling technique is described, its results are presented, and the results are analyzed. A comparative analysis of the numerical values of the characteristics of the energy processes of the studied converter obtained as a result of analytical calculation and circuit simulation showed that the discrepancy does not exceed 4%. This indicates the adequacy of the applied modeling technique and acceptable accuracy of the results of analytical calculations. Refer. 6, fig. 4.

Keywords: capacitor battery, circuit model, commutating voltage, electric valve, commutating angle, regulation angle.

References

1. Boiko V.S. Three-phase double-bridge parallel type compensation converter: Patent UA for utility model № 147874, 2021. (Ukr).
2. Boiko, V. 2024. Commutating voltage of the three-phase double-bridge compensating converter. Tekhnichna Elektrodynamika. 3 (May, 2024), 025. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2024.03.025>. с.25-35.
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), 2019, p. p. 261-266, <http://dx.doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>. (Ukr).
4. Butkevych O.F., Chyzenko 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.
5. David Trainer, Alvaston (GB); Ruchira Withanage, Stafford (GB); Robert Whitehouse, Stafford (GB); Andrew Cross, Great Haywood (GB). Multilevel voltage source converter. Patent No.: US 8,879,291 B2, 2014.
6. 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), 30 March 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.

Надійшла: 27.01.2025

Received: 27.01.2025