

РОЗДІЛ 8. ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

ФОРМУВАННЯ КОМУТАЦІЙНОЇ НАПРУГИ У ТРИФАЗНОМУ МОСТОВОМУ КОМПЕНСАЦІЙНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Бойко В.С., д.т.н., проф., Шкардун О.В., аспірант, Дзигуненко І.О., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Більшість сучасних потужних перетворювачів електричної енергії є трифазними і основу їх схемної реалізації складає трифазний мостовий перетворювач (схема рис. 1). Він містить трифазний перетворювальний трансформатор, первинна і вторинна обмотки якого з'єднані за схемою зірки чи трикутника. До трифазної вторинної обмотки перетворювального трансформатора підключені дві трифазні групи електричних вентилів. У однієї трифазної групи вентилів, яка називається анодною, у спільну точку з'єднані їх аноди. У іншій трифазній групі вентилів у спільну точку з'єднані їх катоди і її називають катодною. Спільні точки електричних вентилів анодної і катодної груп є виводами трифазного мостового випрямляча, до яких підключається його навантаження.

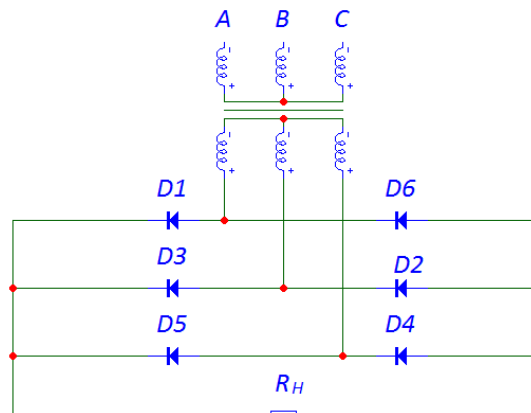


Рисунок 1 – Схема трифазного мостового перетворювача

Не буде перебільшенням вважати, що ця схема є найбільш уживаною при реалізації пристроїв силової перетворювальної техніки, через переваги порівняно з іншими відомими схемами трифазних перетворювачів. Але трифазний мостовий перетворювач має і недоліки. До них відносяться низький коефіцієнт потужності при діодній реалізації через наявність некомпенсованої реактивної потужності електромагнітного процесу комутації і також низький коефіцієнт потужності при тиристорній реалізації за рахунок наявності некомпенсованої реактивної потужності електромагнітного процесу комутації та неактивної потужності зсуву.

Мета роботи. Дослідити процес формування комутаційної напруги у компенсаційному перетворювачі, який разом з перевагами трифазного

мостового перетворювача, здатний компенсувати власну реактивну потужність, що забезпечує його більш високі енергетичні показники.

Результати досліджень. Досліджується трифазний мостовий компенсаційний перетворювач з однією групою комутуючих конденсаторів. Технічне рішення, схема якого наведена на рис. 2, захищене патентом України на корисну модель [1].

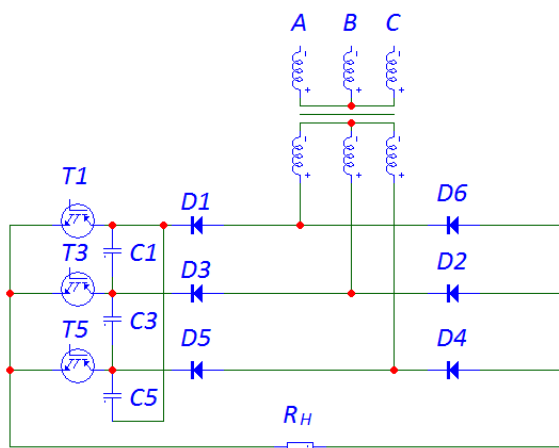


Рисунок 2 – Схема трифазного мостового компенсаційного перетворювача

Зі схеми рис.2 випливає, що комутуюча ланка перетворювача, яка складається з трифазної конденсаторної батареї (C1, C2, C3) та трифазної групи повністю керованих приладів (наприклад, IGBT – транзисторів T1, T3, T5) підімкнена до діодів катодної групи (D1, D3, D5). Можливе підключення і до діодів анодної групи. Це кардинально змінює характер електромагнітних процесів у них, оскільки у комутаційному процесі, окрім напруги вторинної обмотки трансформатора, буде задіяна напруга конденсаторів комутуючої ланки. Характер електромагнітних процесів у діодах анодної групи залишаться такими ж, як і у трифазному мостовому перетворювачі (схема, рис. 1).

При аналізі електромагнітних процесів умовним початком відліку прийнято початок комутації у вентилі D1 при переході струму з вентиля D5 на вентиль D1. При цьому трифазну напругу вторинної обмотки перетворювального трансформатора запишемо так:

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

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

Для контуру комутації діодів анодної групи, які складають некомпенсаційну частину перетворювача, запишемо:

$$e_A - x_\gamma \frac{di_6}{d\vartheta} - e_C + x_\gamma \frac{di_4}{d\vartheta} = 0 \quad (2)$$

де x_γ – індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, зведений до його вторинної обмотки

Врахуємо, що струм вентиля, який вступає в роботу, є струмом комутації i_k , тобто $i_6 = i_k$, а струм вентиля, який виходить з роботи $i_4 = I_d - i_k$. Враховуючи викладене, рівняння (2) запишемо так:

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

Враховуючи, що струм вентиля у позакомутаційний проміжок часу є ідеально згладженим і дорівнює випрямленому струму I_d , то

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

Останнє є відомим рівнянням комутації некомпенсаційного трифазного перетворювача [2]. Якщо він реалізований на некерованих вентилях (діодах), то $\psi = 0$.

Міркування щодо процесу комутації у некомпенсаційному трифазному перетворювачі справедливі і для компенсаційного, але у рівняння комутації (3) потрібно ввести величину комутуючої напруги фази конденсаторної батареї. Тож рівняння комутації діодів компенсаційної (катодної, на рис.2) групи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, має вигляд:

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} - u_C = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi) \quad (4)$$

Напруга фази комутуючих конденсаторів u_C створюється фазним струмом i_C , який є сукупністю струмів навантаження та комутації [3]. Співвідношення цих струмів у фазному струмі комутуючих конденсаторів залежить від режиму роботи перетворювача та умов перезаряду конденсаторної батареї, які створюються сукупністю факторів. Основними з них є: зсув за фазою між моментом вступу в роботу діодів компенсаційної частини перетворювача і транзисторів, протяжність роботи останніх, частоти та амплітуди імпульсів керування транзисторами.

Таким чином загальне рівняння напруги фази (комутуючої напруги) батареї комутуючих конденсаторів, з'єднаної за схемою "трикутника", має вигляд:

$$u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\vartheta} i_c d\vartheta + u_c(0) \quad (5)$$

Що ж стосується закономірності зміни ємнісного струму, то вона залежить від викладених вище факторів.

Комутуюча напруга є одним з найважливіших факторів, що забезпечує енергетичні показники компенсаційного перетворювача. Умови створення величини і форми цієї напруги є завданням серйозного наукового дослідження.

Розглянемо один з можливих режимів роботи перетворювача, коли початок формування кривої комутуючої напруги збігається з комутацією струму силовими вентилями. Важливо, що незалежно від режиму роботи перетворювача, крива фазного струму комутуючих конденсаторів та, відповідно, і комутуючої напруги, мають на періоді частоти мережі живлення дев'ять ділянок: три по три. Це обумовлено тим, що перетворювач є трифазним, а комутуюча ланка містить одну трифазну групу повністю керованих приладів, які забезпечують перезаряд конденсаторної батареї.

Використовуючи (5), проведемо розрахунок комутуючої напруги у зазначеному режимі. Деталі розрахунку в публікації не наводяться з причини їх великого обсягу. Результати розрахунку зведено у таблицю.

Таблиця

№ діл	Струм $i_{C\Delta^*}$	Інтервал	Вираз $u_{C\Delta^*(k)}$ на ділянці	Вираз $u_{C\Delta^*(k)K}$ в кінці ділянки
1	$-\frac{2}{3}i_{k^*}$	$0 \leq \vartheta \leq \gamma$	$-x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta + u_{C^*}(0)$	$-x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta + u_{C^*}(0)$
2	$-\frac{2}{3}$	$0 \leq \vartheta \leq \theta$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\vartheta - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\theta - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$
3	0	$0 \leq \vartheta \leq (\frac{2\pi}{3} - \theta - \gamma)$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\theta - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\theta - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$
4	$\frac{1}{3}i_{k^*}$	$0 \leq \vartheta \leq \gamma$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\theta + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta) - \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta + u_{C^*}(0)$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\theta - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$
5	$\frac{1}{3}$	$0 \leq \vartheta \leq \theta$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (\frac{\vartheta}{2} - \theta - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$
6	0	$0 \leq \vartheta \leq (\frac{2\pi}{3} - \theta - \gamma)$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta) + u_{C^*}(0)$
7	$\frac{1}{3}i_{k^*}$	$0 \leq \vartheta \leq \gamma$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 (-\frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta} i_{k^*} d\vartheta) - \frac{1}{2} \int_0^{\gamma} i_{k^*} d\vartheta + u_{C^*}(0)$	$-x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \cdot \frac{\theta}{2} + u_{C^*}(0)$
8	$\frac{1}{3}$	$0 \leq \vartheta \leq \theta$	$x_{\gamma^*}\omega_{0^*}^2 \cdot \frac{\vartheta - \theta}{2} + u_{C^*}(0)$	$u_{C^*}(0)$
9	0	$0 \leq \vartheta \leq (\frac{2\pi}{3} - \theta - \gamma)$	$u_{C^*}(0)$	$u_{C^*}(0)$

Уві наведені у таблиці вирази нормовані за наступними значеннями базових величин:

- базисна напруга : $U_o = \sqrt{3}E_m$;
- базисний струм: $I_o = \sqrt{3}E_m / 2x_\gamma$, де x_γ - індуктивний опір фази перетворювального трансформатора, зведений до його вторинної обмотки;
- базисна частота: $\omega_o = \omega = 314$;
- базисна реактивність кола змінного струму: $x_o = \sqrt{3}E_m / 2I_o$.

Наведені далі рисунки отримані в результаті схемотехнічного моделювання режиму роботи трифазного мостового компенсаційного перетворювача, розрахунок комутуючої напруги якого представлений таблицею. На рис. 3, який ілюструє початок робочого режиму, що досліджується. На ньому зображені два періоди кривих фазної напруги перетворювального трансформатора u_ϕ та струму і напруги фази комутуючих конденсаторів.

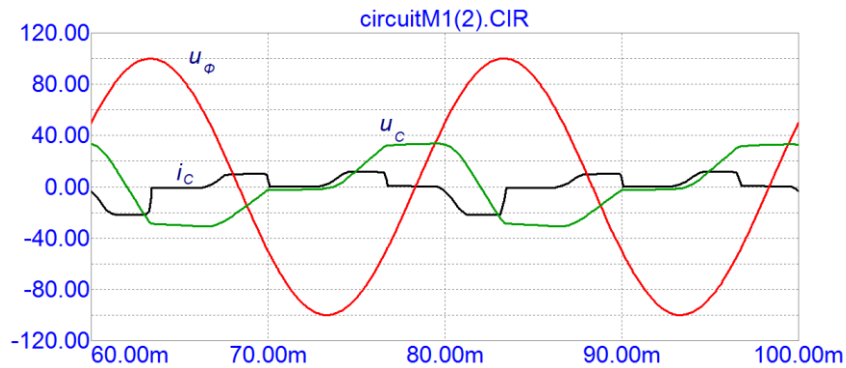


Рисунок 3 – Початок режиму при мінімальному зсуву початку вступу в роботу транзисторів відносно діодів

Якщо зсув між моментом вступу в роботу діодів і транзисторів збільшується (рис. 4), це призводить до росту величини комутуючої напруги і зміни її форми.

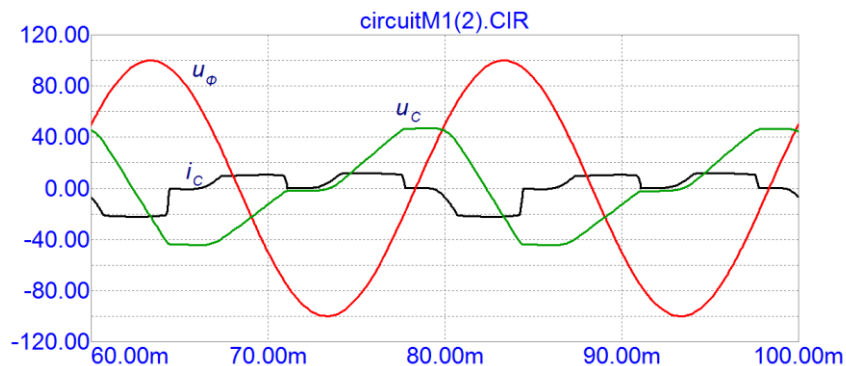


Рисунок 4 – Проміжний режим

На рис. 5 представлені результати моделювання граничного режиму роботи досліджуваного перетворювача. Звернімо увагу, що у цьому режимі протяжність третьої ділянки в усіх трьох інтервалах періоду, яка характеризується відсутністю струму через ємність, практично наближається до нуля. Це свідчить про перехід перетворювача у інший режим роботи.

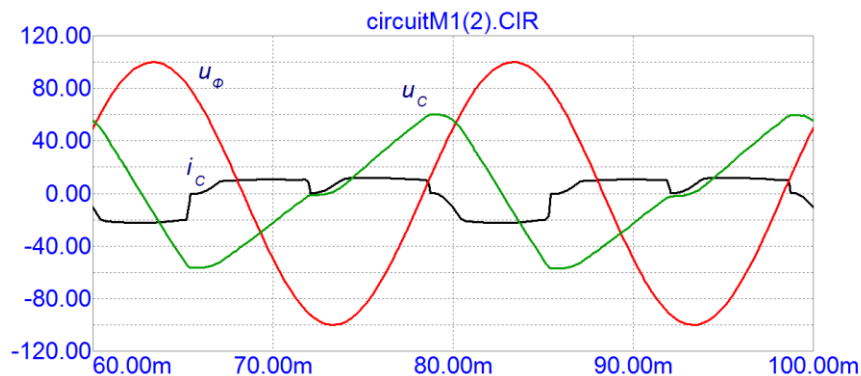


Рисунок 5 – Граничний режим

Як бачимо, зі збільшенням кута зсуву моменту комутації транзисторів відносно діодів, тенденція росту величини миттєвого значення комутуючої напруги і зміни її форми зберігається.

Висновки. 1. Проведені дослідження підтверджують факт залежності режиму роботи перетворювача від умов перезаряду конденсаторної батареї, які створюються сукупністю факторів, основними з них є зсув за фазою між моментом вступу в роботу діодів компенсаційної частини перетворювача і транзисторів, протяжність роботи останніх, частоти та амплітуди імпульсів керування транзисторами.

2. У роботі досліджується вплив лише одного із зазначених факторів у одному з можливих режимів роботи перетворювача. Останнє свідчить про широка перспективу подальших наукових досліджень електромагнітних процесів у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі.

3. В процесі досліджень виявилось, що властивість генерації додаткової реактивної енергії ємнісного характеру не слід приписувати будь-якому одному елементу перетворювача, оскільки вона є результатом спільної взаємодії складових останнього.

Перелік посилань

1. Патент України на корисну модель "Трифазний мостовий компенсаційний перетворювач": Патент UA № 142864, МПК H02B 3/22, 3/24. / Бойко В.С., - у 2020 01729. Заявл. 12.03.2020. Опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.

2. Руденко В.С., Сенько В.И., Чижено І.М. Основы преобразовательной техники: Учебник для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. школа, 1980. - 424 с., ил.

3. Бойко В.С., Сотник Н.И., Шуляк А.А. Сложная коммутация в компенсационных преобразовательных системах // Техн. электродинамика. - 2001. - №2. - С. 30-35.