

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ "ПРИПАСОВУВАННЯ ІНТЕРВАЛІВ" ПРИ АНАЛІЗІ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ З ВЕНТИЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Кудря Є.А., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Майкович І.В., Наухацька Т.А., студенти

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. Робота усіх сучасних потужних перетворювачів електричної енергії з виходом на постійному струмі (випрямлячів) базується на трифазній системі напруг і основу їх схемного вирішення складає елементарна трифазна схема випрямлення. Вона складається з трифазного трансформатора і трифазної вентильної групи (рис. 1).

Підвищення енергетичних характеристик такого перетворювача може бути досягнуто за рахунок комплектації його зовнішнім компенсуючим пристроєм, яким може слугувати конденсаторна батарея, тиристорний компенсатор реактивної потужності чи інший пристрій, або за рахунок переведення перетворювача у компенсаційний режим роботи. Останнє може мати різні способи технічної реалізації, один з яких показано на рис. 2 і полягає у введенні в контур комутації додаткової ЕРС, роль якої відіграє напруга комутуючих конденсаторів, які перезаряджаються складовими струму навантаження.

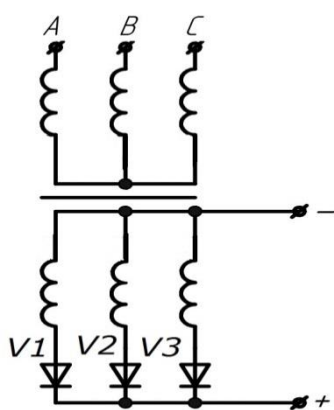


Рисунок 1 – Схема елементарного трифазного випрямляча

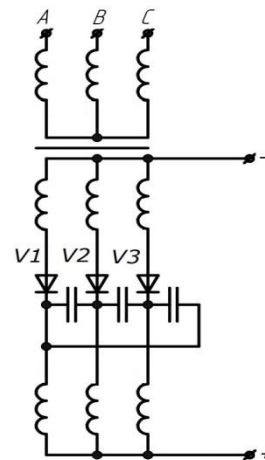


Рисунок 2 – Схема компенсаційного трифазного випрямляча

Розробка таких перетворювачів здійснена на кафедрі теоретичної електротехніки НТУУ "КПІ". Вони знайшли своє впровадження на заводах кольорової металургії, хімічних підприємствах та тягових підстанціях електрифікованих залізниць. Перші розробки цих перетворювачів мали потужність до 10 МВт на агрегат; аналіз їх робочих режимів базувався на спрощеній апроксимації закону зміни струму в контурі комутації. Такий підхід давав можливість отримати нескладні рішення рівнянь електромагнітних процесів для всіх ланок перетворювача з подальшою реалізацією цих рішень при розробці проектної документації.

Метою роботи є удосконалення методу аналізу електромагнітних процесів у компенсаційному перетворювачі за рахунок розв'язку диференціальних рівнянь, які описують електромагнітні процеси у різних режимах його роботи [1, 2].

Результати досліджень. Об'єктом досліджень прийнято перетворювач електричного струму за подвійною трифазною схемою нульового типу з додатковою ланкою комутації у вигляді трифазної батареї конденсаторів і зрівнювального реактора (рис 3). Диференційне рівняння кола для інтервалу комутації струму, наприклад, з вентиля $V1$ на вентиль $V3$, має вигляд:

$$2X_a \frac{d^2 i_k}{d\vartheta^2} + 2X_c i_k = \frac{du_{BC}}{d\vartheta} + I_d X_c \quad (1)$$

Тут:

X_a – індуктивний опір фази трансформатора, приведений до його вторинної обмотки;

X_c – реактивний опір фази комутуючих конденсаторів (при з'єднанні «зіркою»);

i_k – струм вентиля, що вступає в роботу;

I_d – половина струму навантаження, вважається незмінним у часі;

u_{BC} – лінійна напруга мережі комутуючих фаз, приведена до вторинної обмотки трансформатора перетворювача: $u_{BC} = \sqrt{6}U_2 \sin \vartheta$.

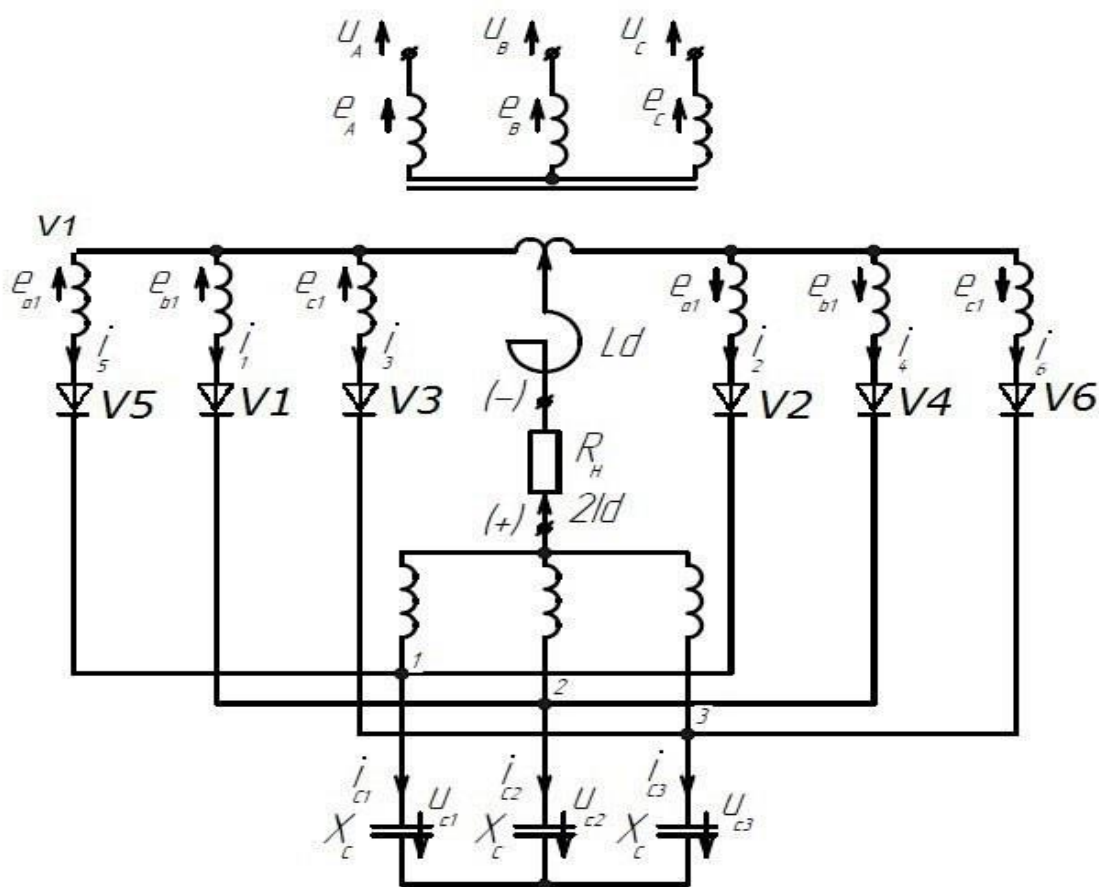


Рисунок 3 – Компенсаційний перетворювач за подвійною трифазною схемою

Комутація струму з вентиля $V1$ на $V3$ починається в прийнятій системі відліку при $\vartheta = \omega t = -\alpha$ (рис. 4в).

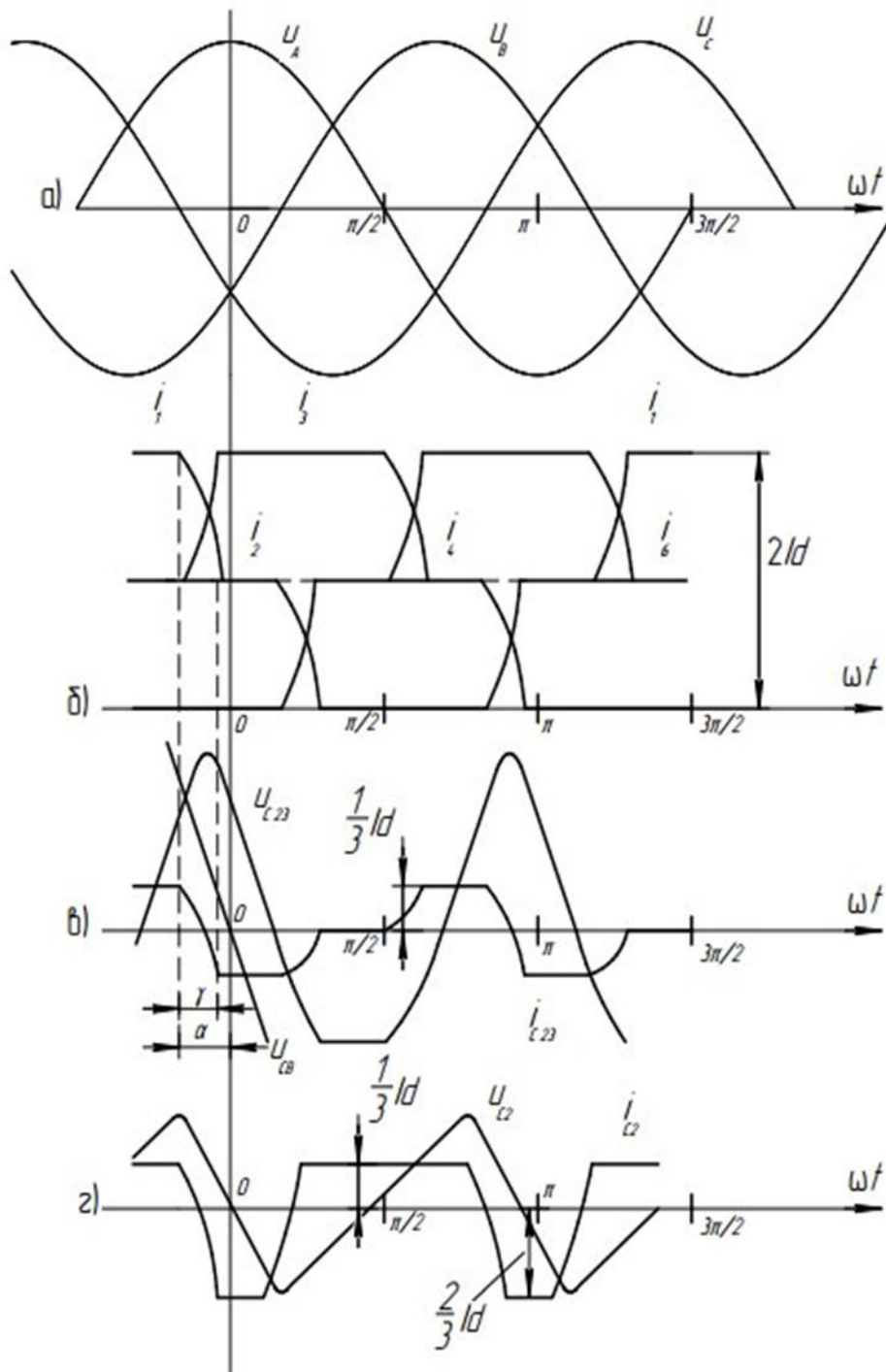


Рисунок 4 – Часові графіки струмів і напруг компенсаційного випрямляча:
 а) фазні напруги мережі; б) струми вентилів; в) струм і напруга конденсаторів при з'єднанні «трикутником»; г) струм і напруга конденсаторів при з'єднанні «зіркою».

Маємо такі початкові умови:

$$i_k(-\alpha) = 0; u_{c23}(-\alpha) = \sqrt{6}U_2 \sin \alpha \quad (2)$$

Крім рівнянь (2), можна ще скласти додаткові рівняння із умов «припасовування» кривої напруги конденсаторів на межах інтервалу повторювання, який для досліджуваного перетворювача становить $\Delta\vartheta = \pi/3$:

$$\begin{aligned} u_{c12}(-\alpha + \gamma) + I_d X_c \left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) &= u_{c23}(-\alpha), \\ u_{c31}(-\alpha + \gamma) &= u_{c12}(-\alpha). \end{aligned} \quad (3)$$

В рівняннях (3): γ – кут комутації вентилів.

З врахуванням приведених співвідношень (1), (2), (3) для струму вентиля, що вступає в роботу, отримуємо:

$$i_k = \frac{I_d}{2} - \left(\frac{I_d}{2} + \frac{\sqrt{6}U_2\xi^2}{(\xi^2 - 1)2X_c} \cos \alpha \right) \cos \xi(\vartheta + \alpha) - \frac{\xi\sqrt{6}U_2 \sin \alpha}{(\xi^2 - 1)2X_c} \sin \xi(\vartheta + \alpha) + \frac{\xi^2\sqrt{6}U_2}{(\xi^2 - 1)2X_c} \cos \vartheta. \quad (4)$$

В рівнянні (4): $\xi^2 = X_c/X_a$.

Рішення для i_k дає можливість уточнити розрахункові співвідношення всіх ланок досліджуваного перетворювача. Наприклад, напруга u_{c23} на конденсаторах, які знаходяться між комутуючими фазами, в інтервалі комутації дорівнює:

$$u_{c23} = \left(\frac{I_d}{\xi} X_c + \frac{\sqrt{6} U_2 \xi}{\xi^2 - 1} \cos \alpha \right) \sin \xi(\vartheta + \alpha) - \frac{\sqrt{6} U_2 \sin \alpha}{\xi^2 - 1} \cos \xi(\vartheta + \alpha) - \frac{\sqrt{6} U_2 \xi^2}{\xi^2 - 1} \sin \vartheta. \quad (5)$$

При з'єднанні конденсаторів «зіркою» для напруги u_{c3} фази, що вступає в роботу, маємо:

$$u_{c3} = -\frac{I_d}{6} X_c \vartheta - \left[\frac{I_d}{2\xi} X_c + \frac{\sqrt{6} U_2 \xi}{2(\xi^2 - 1)} \cos \alpha \right] \sin \xi(\vartheta + \alpha) + \frac{\sqrt{6} U_2}{6} \sin \alpha + \frac{\sqrt{6} U_2 \sin \alpha}{2(\xi^2 - 1)} \cos \xi(\vartheta + \alpha) + \frac{\sqrt{6} U_2 \xi^2}{2(\xi^2 - 1)} \sin \vartheta + \frac{I_d}{6} X_c \left(\frac{2\pi}{9} - \alpha \right). \quad (6)$$

На основі отриманих рішень розраховані і побудовані часові графіки струмів і напруг компенсаторного випрямляча (рис. 4).

Висновок. Отримані співвідношення та методика їх розв'язку покладені в основу уточненого аналізу електромагнітних процесів у компенсаційних перетворювачах не лише нульового типу, а й інших. Досягнутий результат має важливе як теоретичне значення, оскільки є подальшим розвитком існуючих спрощених методів аналізу електромагнітних процесів у компенсаційних перетворювачах, так і практичне, обумовлене можливістю більш точного визначення шляхів досягнення основних енергетичних характеристик перетворювача та за рахунок їх реалізації підвищити енергетичну ефективність його функціонування у різних робочих режимах.

Перелік посилань

1. Бойко В.С. Преобразовательные системы с одноступенчатой емкостной коммутацией: Автореф. дис. докт. техн. наук:05.09.12 / Ин-т электродинамики НАН Украины. – К., 1993. – 38 с.

2. Кудря Е.А. Исследование компенсирующих конденсаторных устройств в цепях с вентильными преобразователями. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – К., 1972. – 26 с.