

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОМПЕНСАЦІЙНОГО ВИПРЯМЛЯЧА ПРИ ПОВТОРНІЙ РОБОТІ ВЕНТИЛІВ

Кудря Є.А., к.т.н., доцент, Шуляк А.А., ст. викладач

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Мудрик В.І., Паканич С.І., студенти

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. Дослідження компенсаційних випрямлячів, в яких використані некеровані вентиля (діоди) чи керовані (тиристори) показали, що, починаючи з певних значень струму навантаження, енергетичні характеристики таких пристроїв можуть суттєво відрізнятись. Відмінності в електрофізичних показниках пристроїв, в яких використані вентиля з різними властивостями (керовані тиристори чи некеровані діоди) обумовлені особливостями комутаційних процесів цих пристроїв: виникнення режимів переривистих струмів в діодному компенсаційному випрямлячі і можливістю виключення цього режиму в пристрої на тиристорах.

Мета роботи. Знайти аналітичні вирази для струмів вентилів, струмів і напруг комутуючих конденсаторів та інших елементів діодного компенсаційного випрямляча на основі рішень диференціальних рівнянь, складених для контурів комутації пристрою при різних режимах його роботи.

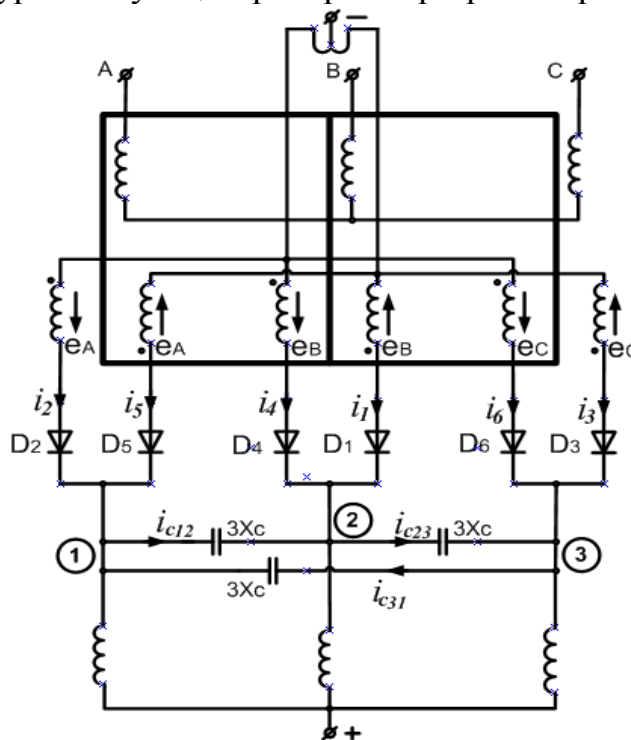


Рисунок 1 – Схема 6-пульсного компенсаційного випрямляча

Результати досліджень. Будь-який з режимів роботи шестипульсного компенсаційного випрямляча на діодах (рис.1) при значному діапазоні регулювання струму навантаження може розглядатись як сукупність одночасної роботи його вентилів групами по 2,3 чи 4. На інтервалах роботи двох вентилів їх струми вважаються незмінними в часі і дорівнюють:

$i_{\text{вент}} = I_d$. Інтервал одночасної роботи трьох вентилів досліджувався раніше в роботах [1,2]. Авторами було отримане диференційне рівняння для контуру комутації і знайдене його рішення. Це рішення для струму вентиля, який вступає в роботу (вентиль D3, рис.1), можна записати таким чином:

$$i_3^l = D \sin \xi(\nu - \delta + \psi) + \frac{\sqrt{6} \cdot U_2}{2X_a(\xi^2 - 1)} \cos \nu + \frac{I_d}{2} \quad (1)$$

Тут: D, ψ - постійні інтегрування, їх значення залежать від того, який режим передував трьох-вентильній роботі випрямляча;

U_2 - фазна напруга мережі, приведена до вторинної обмотки трансформатора перетворювача;

X_a - приведений індуктивний опір фази трансформатора;

I_d - половина струму навантаження;

$\xi^2 = X_c / X_a$, X_c - реактивний опір фази комутуючих конденсаторів на частоті мережі;

δ значення змінної $\nu = \omega t$ в момент початку трьох-вентильної роботи випрямляча.

Початок відліку змінної ν у рішенні (1) і в усіх наступних часових виразах фіксований і співпадає з моментом проходження лінійної напруги $u_{BC} = \sqrt{6} \cdot U_2 \cdot \sin \nu$ через нульове значення.

Маючи вираз (1) для струму вентиля, який вступає в роботу, можемо отримати рішення для лінійних і фазних напруг конденсаторів, а також інших елементів випрямляча. Так для напруги u_{C23} на конденсаторах, які знаходяться між комутуючими фазами, отримуємо:

$$u_{C23}^l = 2D \cdot \xi \cdot X_a \cdot \cos \xi(\nu - \delta + \psi) - \frac{\sqrt{6} \cdot U_2 \cdot \xi^2}{\xi^2 - 1} \sin \nu \quad (2)$$

Рішення для напруг і струмів інших елементів випрямляча в цьому режимі не приведено у зв'язку з обмеженим змістом аналізу.

Режим роботи компенсаційного шестипульсного випрямляча з некерованими вентилями (діодами), коли вентиля проводять струм групами по 2 і 3, має місце при невеликих відносних значеннях струму навантаження

$\left(I_d^* = \frac{2I_d X_a}{\sqrt{6} \cdot U_2} \leq 0,15 \right)$. При подальшому зростанні струму навантаження

виникають режими переривистих струмів вентилів, коли діод, незабаром після виходу з роботи, знову проводить струм. Це повторне включення вентиля спочатку короткочасне, але при зростанні струму навантаження часовий інтервал роботи діода розширюється. При подальшому рості струму інтервал повторної роботи розширюється і випрямляч переходить в режим, коли його вентиля будуть проводити струм групами по 4 і 3.

Розглянемо цей режим більш детально. Нехай струм одночасно проводять вентиля D_1, D_2, D_3, D_6 , причому комутація відбувається з вентиля D_1 на D_3 , (основна комутація), а вентиль D_6 вступає в роботу повторно. Тоді для контурів із струмами i_3, i_6 , можемо скласти такі диференційні рівняння:

$$3 \frac{d^2}{dv^2} (i_3 - i_6) + \frac{X_c}{X_a} (i_3 - i_6) = \frac{3}{X_a} \sqrt{2} U_2 \cos(v + \pi/6) \quad (3)$$

$$\frac{d^2}{dv^2} (i_3 + i_6) + \frac{3X_c}{X_a} (i_3 + i_6) = \frac{2X_c}{X_a} I_d + \frac{\sqrt{6}}{X_a} U_2 \sin(v + \pi/6) \quad (4)$$

В рівняннях (3) та (4) прийнято, що індуктивності розсіювання повністю зосереджені в первинних обмотках. Для коренів диференційного рівняння (3) маємо $p' = \pm j \cdot \xi_1$; для коренів рівняння (4): $p'' = \pm j \cdot \xi_2$ (відповідно $\xi_1 = \xi / \sqrt{3}$, $\xi_2 = \xi \cdot \sqrt{3}$). Із сумісного розв'язку рівнянь (3) та (4) для струму i_3 вентиля, який вступає в основну комутацію, отримуємо:

$$i_3 = D_1 \cdot \sin \xi_1 (v + \alpha + \psi_1) + D_2 \cdot \sin \xi_2 (v + \alpha + \psi_2) + \frac{I_d}{3} + \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2X_a (\xi_1^2 - 1)} \cos(v + \pi/6) + \frac{\sqrt{6} \cdot U_2}{2X_a (\xi_2^2 - 1)} \sin(v + \pi/6) \quad (5)$$

Відповідно для струму i_6 вентиля, який вступає в роботу повторно:

$$i_6 = -D_1 \cdot \sin \xi_1 (v + \alpha + \psi_1) + D_2 \cdot \sin \xi_2 (v + \alpha + \psi_2) + \frac{I_d}{3} - \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2X_a (\xi_1^2 - 1)} \cos(v + \pi/6) + \frac{\sqrt{6} \cdot U_2}{2X_a (\xi_2^2 - 1)} \sin(v + \pi/6) \quad (6)$$

Для конденсаторів ланки комутації в цьому режимі маємо:

$$u_{C12} = -6 \cdot D_1 \cdot \xi_1 \cdot X_a \cos \xi_1 \cdot (v + \alpha + \psi_1) + \frac{3\sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \xi_1^2}{\xi_1^2 - 1} \sin(v + \pi/6) \quad (7)$$

$$u_{C23} = 3 \cdot D_1 \cdot \xi_1 \cdot X_a \cos \xi_1 \cdot (v + \alpha + \psi_1) + D_2 \cdot \xi_2 \cdot X_a \cos \xi_2 \cdot (v + \alpha + \psi_2) - \frac{3\sqrt{2} \cdot U_2}{2(\xi_1^2 - 1)} \sin(v + \pi/6) + \frac{\sqrt{6} \cdot U_2}{2(\xi_2^2 - 1)} \cos(v + \pi/6) - \sqrt{6} \cdot U_2 \sin(v) \quad (8)$$

$$u_{C31} = -(u_{C12} + u_{C23}) \quad (9)$$

В рішеннях (5, 6, 7, 8): D_1, D_2, ψ_1, ψ_2 – постійні інтегрування; α - кут, що відповідає моменту вступу в роботу вентилів D_3 і D_6 в роботу.

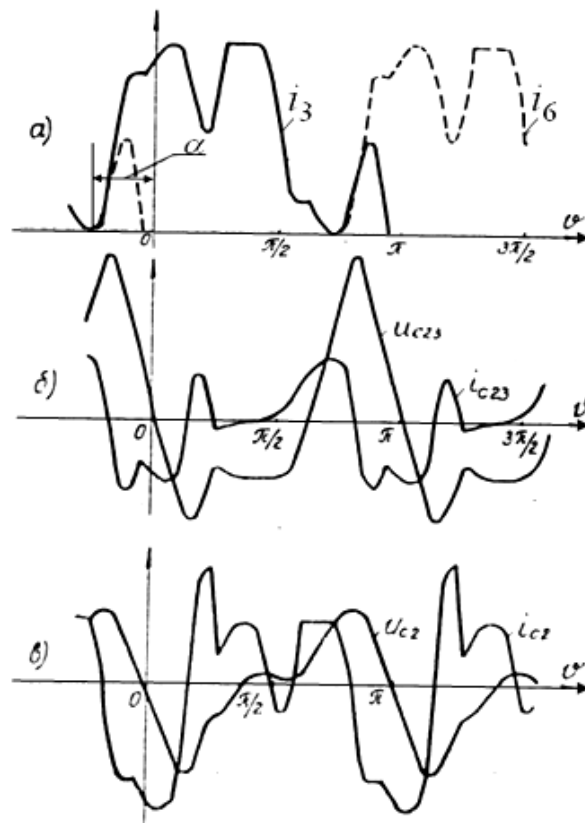


Рисунок 2 – Напруги і струми випрямляча при роботі вентилів групами по 4 і 3

Нехай інтервал одночасної роботи 4-х вентилів становить γ_1 . Тоді після виходу із роботи вентиля D_6 , рівняння для струму вентиля D_3 , який продовжує роботу, прийме вигляд рівняння (1) (рівняння $i_3^{(I)}$ для одночасної роботи 3-х вентилів). При цьому в рівнянні для $i_3^{(I)}$, а також для $u_{C23}^{(I)}$ маємо: $\delta = -\alpha + \gamma_1$.

В приведених рішеннях, для струмів і напруг 6 невідомих постійних інтегрування: $D_1, D_2, D, \psi_1, \psi_2, \psi$, а також кут початку комутації $\delta = -\alpha$ та інтервал γ_1 одночасної роботи чотирьох вентилів. Для знаходження цих величин завжди можна скласти необхідну кількість рівнянь із умов неперервності кривих струмів вентилів і напруг на конденсаторах:

а) для моменту вступу в роботу вентиля D_3 (струм будуть проводити вентилі $D_1, D_2, D_3, D_6, v = -\alpha$):

$$\begin{aligned}
 i_3(-\alpha) &= 0, \\
 i_6(-\alpha) &= I_d - i_3^1(-\alpha + \pi/3), \\
 u_{C12}(-\alpha) &= u_{C31}^1(-\alpha + \pi/3), \\
 u_{C23}(-\alpha) &= u_{C12}^1(-\alpha + \pi/3);
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

б) для моменту виходу із роботи вентиля D_6 (струм проводять 3 вентиля, $\nu = -\alpha + \gamma_1$)

$$\begin{aligned} \dot{i}_6(-\alpha + \gamma_1) &= 0, \\ \dot{i}_3(-\alpha + \gamma_1) &= \dot{i}_3^1(-\alpha + \gamma_1), \\ U_{C_{12}}(-\alpha + \gamma_1) &= U_{C_{12}}^1(-\alpha + \gamma_1), \\ U_{C_{23}}(-\alpha + \gamma_1) &= U_{C_{23}}^1(-\alpha + \gamma_1). \end{aligned} \quad (11)$$

В якості прикладу застосування результатів проведеного аналізу для компенсаційного випрямляча при відносному значенні струму навантаження $I_d^* = 0.18$ і $\xi^2 = x_c/x_a = 18.5$ ($\xi_1^2 \cong 6.167$, $\xi_2^2 = 55.5$) за рівняннями (10) і (11) було отримано:

- Кут одночасної роботи чотирьох вентилів $\gamma_1 = 35^\circ$;

- Кут випередження комутації $\alpha = 44^\circ$;

- Значення постійних інтегрування

$$D_1^* = 0.627, D_2^* = 0.299, D^* = 0.187;$$

$$\psi_1 = 104^\circ (1.815 \text{ рад}), \psi_2 = -11,83^\circ (-0.2064 \text{ рад}), \psi = 50^\circ (0,8727). \quad \text{Тут}$$

$$D_1^* = D_1/I_d \text{ і т. д.}$$

Приведені рішення використанні при побудові графіків часових функції струмів вентилів, напруг і струмів конденсаторів шестипульсного компенсаційного випрямляча в режимі роботи його вентилів групами по 4 і 3 (рис. 2).

Висновок. Отриманні в роботі рішення можуть бути використанні при аналізі електромагнітних процесів шестипульсного компенсаційного випрямляча не тільки в режимі роботи його вентилів групами по 3 і 2 чи 4 і 3, але і в інших режимах; наприклад, при одночасній роботі вентилів групами: 3-4-3-2, 4-3-2, 4-2. Ці рішення справедливі для всіх названих режимів, відмінності будуть тільки в значеннях постійних інтегрування. Рішення дають можливість уточнити, енергетичні характеристики діодного компенсаційного випрямляча при зміні струму навантаження в широких межах від режиму роботи вентилів групами 3-2 до режиму групами по 4-3, включно з режимом переривистих струмів.

Перелік посилань

1. Бойко В.С. Преобразовательные системы с одноступенчатой емкостной коммутацией. Автореферат диссертации доктора технических наук: 05.09.12 / Ин-т электродинамики НАН Украины. -К., 1993.-38с.

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