

ШЕСТИФАЗНЫЕ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Нестеров С. А.

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева

Тел.: (8342) 290–605, e-mail: nesterov@mrsu.ru

Аннотация. В статье описаны шестифазные схемы выпрямления трехфазного тока «треугольник — шестифазная звезда» и «звезда — двойной зигзаг». Предложено простое и понятное графическое изображение схемы «звезда — двойной зигзаг» и рассмотрены особенности коммутации токов вентилях в ней.

Ключевые слова: выпрямление трехфазного переменного тока, шестифазные схемы выпрямления, звезда — двойной зигзаг, коммутация токов вентилях.

Простые шестифазные классические схемы выпрямления в современной технической литературе не упоминаются. Однако специалистам в области преобразовательной техники необходимо эти схемы знать. Целью настоящей статьи является восполнение этого пробела.

Простая шестифазная схема выпрямления при соединении первичной обмотки трансформатора в треугольник показана на рис.1. Временные диаграммы работы схемы приведены на рис. 2. В каждый момент времени работает вентиль, имеющий наиболее высокий анодный потенциал. Угол проводимости вентиля равен $\lambda = \pi/3$. Кривая выпрямленного напряжения представляет собой огибающую положительных полуволн шестифазной системы напряжений вторичной обмотки. Нумерация вентилях соответствует порядку их работы. Среднее значение выпрямленного напряжения определяется по общей формуле при подстановке в нее $m = 6$:

$$U_d = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 1,35 U_2.$$

Действующие значения токов вентилях и фаз вторичной обмотки равны

$$I_v = I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{m}} = \frac{I_d}{\sqrt{6}} \approx 0,408 I_d.$$

Фазы вторичной обмотки, расположенные на одном стержне, создают симметричные МДС, не содержащие постоянных составляющих, поэтому их токи полностью передаются в соответствующую фазу первичной обмотки. Действующие значения токов фаз первичной обмотки равны

$$I_1 = \frac{1}{k_T} \cdot \frac{I_d}{\sqrt{3}} \approx 0,577 \frac{I_d}{k_T}.$$

В идеализированном трансформаторе токи нулевой последовательности в первичной обмотке отсутствуют, поэтому отсутствует и вынужденное подмагничивание трансформатора. В реальном трансформаторе, однако, за счет падения напряжения на сопротивлении первичной обмотки, по которой протекает ток, равновесие напряжений в треугольнике нарушается и по нему протекает небольшой ток нулевой последовательности, создающий знакопеременную МДС вынужденного подмагничивания. Но эта МДС весьма невелика и ее влиянием на режим работы схемы можно пренебречь.

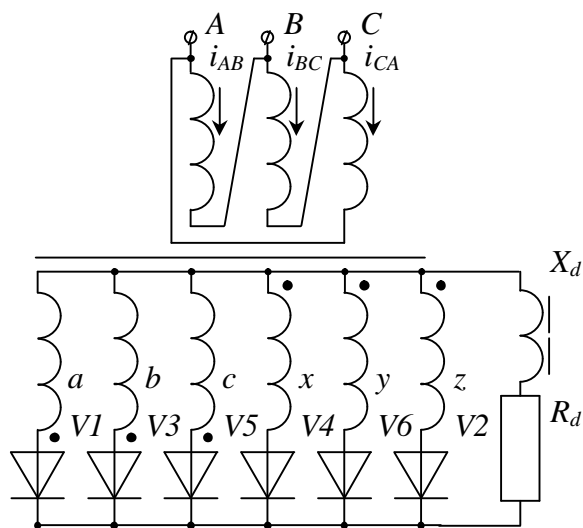


Рис. 1

Обратное напряжение на запорном вентиле определяется как разность потенциала его анода, который равен напряжению в соответствующей фазе, и потенциала его катода, который равен мгновенному значению выпрямленного напряжения. Из рис.1 видно, что максимальное обратное напряжение на вентиле равно

$$U_{vm} = 2\sqrt{2}U_2 = \frac{2\pi}{3}U_d \approx 2,09U_d.$$

Расчетные мощности обмоток равны:

$$S_2 = 6U_2I_2 = 6\frac{\pi}{3\sqrt{2}}U_d\frac{I_d}{\sqrt{6}} = \frac{\pi}{\sqrt{3}}P_d \approx 1,81P_d;$$

$$S_1 = 3U_1I_1 = 3k_T\frac{\pi}{3\sqrt{2}}U_d\frac{I_d}{k_T\sqrt{3}} = \frac{\pi}{\sqrt{6}}P_d \approx 1,28P_d;$$

и типовая (расчетная) мощность трансформатора равна

$$S_T = \frac{1}{2}(S_1 + S_2) \approx 1,55P_d.$$

Очевидно, что типовая мощность трансформатора очень велика. Это обусловлено плохой формой фазных токов первичной обмотки и соответственно ее высокой расчетной мощностью. И хотя форма линейных первичных токов является оптимальной для схем с фазностью выпрямления $m = 6$, расчетная мощность обмотки определяется именно фазными

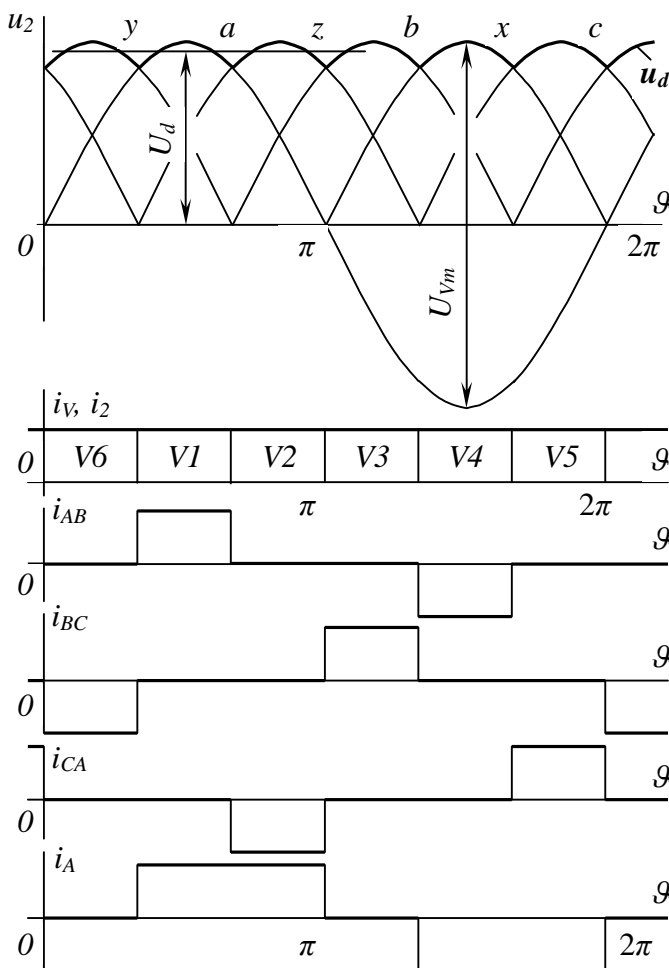


Рис. 2

токами. Этот недостаток и явился препятствием для практического применения данной схемы.

При включении первичной обмотки трансформатора простой шестифазной схемы выпрямления в звезду первичные токи оказываются связанными и могут быть определены методом баланса МДС. При работе фаз a, b и c вторичной обмотки ток фазы первичной обмотки, находящейся на активном стержне (то есть на том стержне, фаза вторичной обмотки которого находится под током) равен

$$I_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{I_d}{k_T},$$

а токи двух других фаз равны

$$I_1 = -\frac{1}{3} \cdot \frac{I_d}{k_T}.$$

Легко видеть, что на всех трех стержнях создаются одинаковые по величине и направлению МДС вынужденного подмагничивания, равные

$$F_0 = -\frac{1}{3}I_d w_2.$$

При работе фаз x, y и z вторичной обмотки мы получаем аналогичные результаты, но с противоположными знаками.

Таким образом, при соединении первичной обмотки трансформатора в звезду в стержнях трансформатора создаются значительные по величине знакопеременные МДС вы-

нужденного подмагничивания, которые имеют тройную частоту по отношению к частоте питающей сети. Эти МДС создают потоки вынужденного подмагничивания, которые вызывают дополнительные потери в сердечнике и металлоконструкциях трансформатора, искажают вторичные напряжения, делая схему практически неработоспособной.

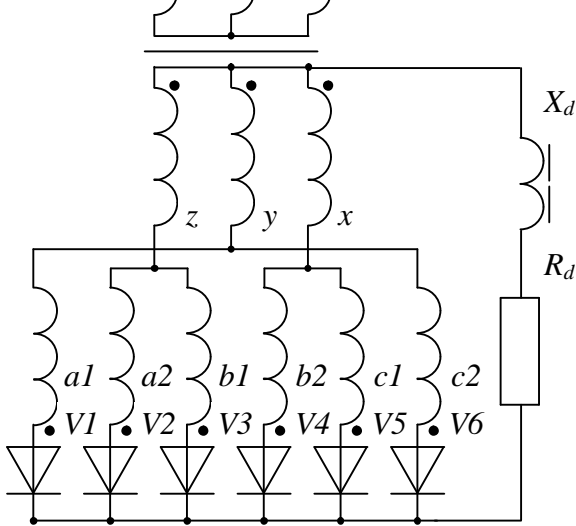


Рис. 3

Чтобы исключить вынужденное подмагничивание трансформатора, вторичную обмотку трансформатора соединяют в двойной зигзаг. Шестифазная схема выпрямления «звезда — двойной зигзаг» показана на рис.3. Обратите внимание, что с целью упрощения топологии схемы фазы x и z внутренней звезды вторичной обмотки переставлены местами. Формирование результирующих вторичных напряжений поясняется векторной диаграммой на рис.4, из которой видно, что вторичные обмотки создают симметричную шестифазную систему ЭДС с прямым порядком чередования фаз. Работа схемы поясняется временными диаграммами на рис.5.

Чтобы действующие значения результирующих напряжений оставались такими же, как и

в предыдущей схеме, напряжение каждой и девяти фаз вторичной обмотки следует принять равным

$$U_2' = \frac{U_2}{\sqrt{3}}.$$

Соответственно изменится коэффициент трансформации:

$$k_T' = \sqrt{3}k_T$$

Тогда выражения для U_d , I_V , и U_{Vm} останутся теми же самыми, что и в предыдущей схеме.

Действующие значения фазных токов внутренней звезды вторичной обмотки равны

$$I_{2x} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \approx 0,577I_d,$$

а действующие значения фазных токов внешних секций зигзага равны

$$I_{2a} = \frac{I_d}{\sqrt{6}} \approx 0,408I_d.$$

Форма токов первичной обмотки существенно улучшается. Действующие значения токов первичной обмотки равны

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{I_d}{k_T'} \approx 0,471 \frac{I_d}{k_T'}.$$

Расчетные мощности вторичной и первичной обмоток равны соответственно:

$$S_2 = 6U_2'I_{2a} + 3U_2'I_{2x} = 6 \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_d \frac{I_d}{\sqrt{6}} + 3 \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_d \frac{I_d}{\sqrt{3}} \approx 1,79P_d;$$

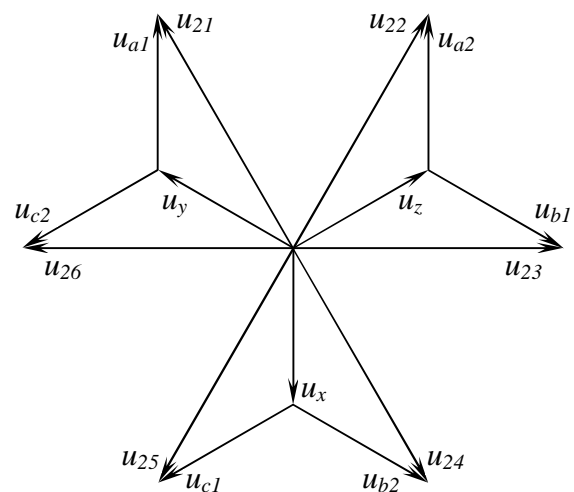


Рис. 4

$$S_1 = 3U_1 I_1 = 3k_T \frac{\pi}{3\sqrt{2}} U_d \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{I_d}{k_T} = \frac{\pi}{3} P_d \approx 1,05 P_d;$$

и типовая (расчетная) мощность трансформатора составляет

$$S_T = \frac{1}{2} (S_1 + S_2) \approx 1,42 P_d.$$

Таким образом, за счет улучшения формы первичных токов в этой схеме удастся существенно снизить типовую мощность трансформатора.

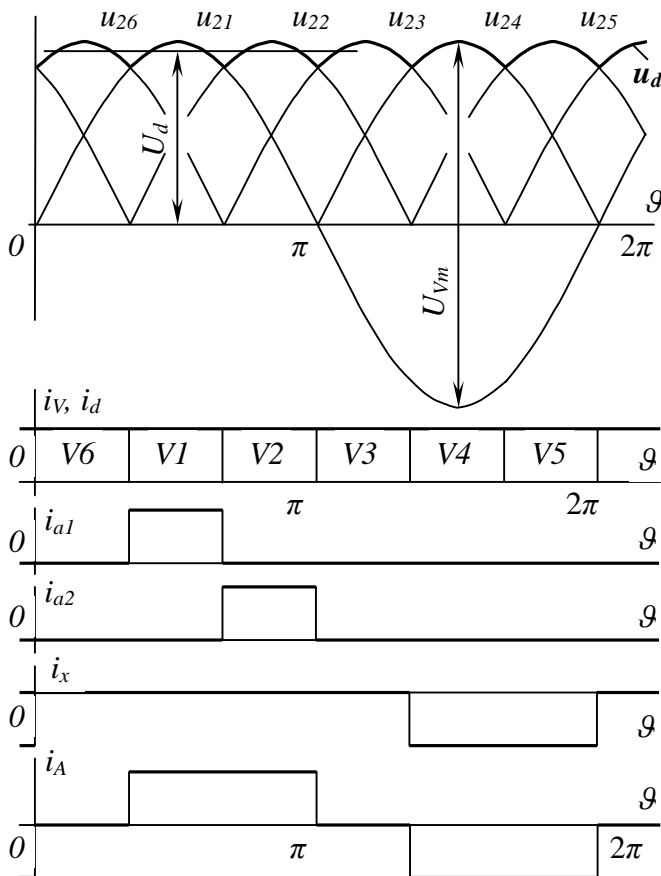


Рис. 5

Следовательно, процессы коммутации тока вентилях в данной схеме практически не отличаются от процессов коммутации в простой шестифазной схеме, рассмотренной выше, и выражение для среднего значения коммутационного падения напряжения можно получить из общего выражения путем подстановки туда $m = 6$:

$$\Delta U_x = \frac{m}{2\pi} X_a I_d = \frac{3}{\pi} X_a I_d,$$

где X_a — суммарное индуктивное сопротивление в анодной цепи вентиля.

Общим недостатком рассмотренных схем является плохое использование вентилях по току, что обусловлено высоким значением коэффициента формы тока $k_\phi = I_V / I_{Vcp} = \sqrt{6}$. Тем не менее шестифазная схема «звезда — двойной зигзаг» может успешно применяться в низковольтных выпрямителях малой мощности (десятки кВт).

Коммутация токов вентилях в схеме имеет некоторые особенности. Например, при коммутации тока с вентиля $V1$ на вентиль $V2$ в контур коммутации оказываются включенными фазы $a1, y, z, a2$, а при коммутации тока с вентиля $V2$ на вентиль $V3$ в контур коммутации включены только фазы $a2$ и $b1$. Может показаться, что суммарное индуктивное сопротивление фаз в первом случае вдвое больше, чем во втором. Однако обмотки фаз $a1$ и $a2$, одна из которых наматывается поверх другой, образуют бифилярную систему, в которой ЭДС самоиндукции одной из фаз компенсируется ЭДС взаимоиндукции другой фазы, поэтому результирующее индуктивное сопротивление такой системы близко к нулю. Таким образом, индуктивное сопротивление контуров коммутации в обоих случаях практически одно и то же. Как известно, на интервале коммутации мгновенное значение выпрямленного напряжения равно полусумме коммутируемых напряжений вторичной обмотки. Из векторной диаграммы на рис.4 видно, что эти полусуммы в обоих случаях