

Исследование работы встречно-параллельно включенных тиристоров с самоуправлением

Гуревич В. И., Покатаев А. И., Савченко П. И.

Рассматривается работа в ключевом режиме встречно-параллельно соединенных тиристоров с самоуправлением (импульсы управления формируются автоматически из анодного напряжения) в области малых токов нагрузки (рис. 1). Такой метод управления, несмотря на некоторые его недостатки, нашел применение в низковольтной бесконтактной коммутационной аппаратуре, выпускаемой саранским заводом «Электровыпрямитель», например, в тиристорных пускателях типа ПТ и др. [4]. Особые преимущества имеет такое управление тиристорами в высоковольтных переключателях ответвлений силовых трансформаторов [2].

По сравнению с другими методами управления (например, фазоимпульсным) схема самоуправления гораздо проще; обеспечивает непрерывность тока в нагрузке практически в течение всего полупериода; осуществляет автоматическую синхронизацию импульсов управления с током при изменении параметров нагрузки; позволяет достаточно простыми средствами (высоковольтными герконовыми реле) осуществить передачу команд с заземленного блока управления на тиристоры, находящиеся под потенциалом 35—110 кВ.

Сущность метода самоуправления заключается в том, что при замыкании пускового контакта S появляется ток в цепи управления того тиристора, полярность включения которого совпадает с полярностью полуволны приложенного напряжения. Поскольку ток управления в то же время является и током нагрузки, то по достижении последним определенного значения тиристор (например, $V1$) открывается, шунтируя практически на весь полупериод прямой проводимости цепь управления. При смене полярности полуволны приложенного напряжения описанный процесс повторяется в цепи второго тиристора. Для предохранения управляющих переходов от перегрузки большими токами за время от момента замыкания контакта S до момента отпирания одного из тиристоров в цепь управления введено ограничительное сопротивление R .

Однако комплектация коммутационной аппаратуры тиристорами производится без учета разброса параметров тиристоров одного типа и класса напряжения, например, совершенно не учитывается конкретное значение тока управления и тока удержания каждого экземпляра. В технической документации указываются обычно предельные значения токов управления I_y и удержания $I_{yд}$ и совершенно отсутствует информация об отклонениях фактических I_y и $I_{yд}$ от их предельных значений.

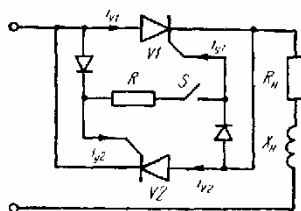


Рис. 1

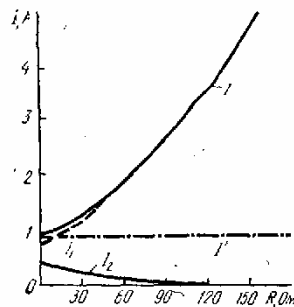


Рис. 2

Имеются лишь самые общие сведения о том, что тиристоры одного и того же типа имеют значительный разброс параметров [5].

Такое положение требует подробного рассмотрения явлений, сопровождающих работу встречно-параллельно включенных тиристоров с разбросом параметров.

Ток управления до момента отпирания тиристоров изменяется по закону:

$$i_y = \frac{U_m}{Z_y} \sin(\omega t - \varphi_y), \quad (1)$$

где $Z_y = \sqrt{(R_n + R + R_y)^2 + X_n^2}$; R_n и X_n — активная и индуктивная составляющие сопротивления нагрузки; R_y — сопротивление перехода управляющий электрод — катод; $\varphi_y = \arcsin \frac{X_n}{Z_y}$ — фаза тока по отношению к приложенному напряжению.

Отпирание вентиля происходит в момент, когда $i_y \geq I_y$. Фаза включения первого вентиля (V1) может быть представлена в виде

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{X_n}{Z_{y1}} + \arcsin \frac{I_{y1} Z_{y1}}{U_m}. \quad (2)$$

Аналогично для второго вентиля (V2)

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{X_n}{Z_{y2}} + \arcsin \frac{I_{y2} Z_{y2}}{U_m}. \quad (3)$$

Запирание вентиля происходит в момент, когда через вентиль протекает ток

$$i_p = \frac{U_m}{Z_n} \sin(\omega t - \varphi_n) \leq I_{yn}, \quad (4)$$

где $\varphi_n = \arcsin \frac{X_n}{Z_n}$ — фаза тока нагрузки относительно приложенного напряжения (сопротивление перехода анод-катод не учитывается). Тогда фазы выключения (запирания) вентиля имеют следующий вид:

$$\beta_1 = \arcsin \varphi_n - \arcsin \frac{I_{yд1} Z_n}{U_m} + \pi; \quad (5)$$

$$\beta_2 = \arcsin \varphi_n - \arcsin \frac{I_{yд2} Z_n}{U_m} + \pi. \quad (6)$$

В импульсных схемах управления несимметрия токов нагрузки обусловлена несимметрией углов управления ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) и углов запираания ($\beta_1 \neq \beta_2$ из-за различия токов удержания).

В рассматриваемой схеме цепь управления тиристоров постоянно включена последовательно с нагрузкой. В период проводимости тиристоров $\alpha < \omega t < \beta$, когда ток, протекающий через тиристоры, определяется выражением (4), цепь управления зашунтирована низким прямым сопротивлением открытых вентилях. Однако в момент $\omega t = \beta$ цепь управления дешунтируется, и через нагрузку протекает ток

$$i_n = i_y \frac{U_m}{Z_y} \sin \omega t, \quad (7)$$

где $\beta \leq \omega t \leq \pi + \varphi_y$. В указанный период после запираания вентилях ток в нагрузке сохраняет значение, близкое к тому, которое обеспечивает идеальный вентиль ($I_{уд} = 0$). По этой причине схема с самоуправлением оказывается нечувствительной к разбросу значений удерживающих токов, и наличие $\Delta\beta$ можно в дальнейшем не учитывать.

Тогда, вычитая выражение (3) из (2), получаем выражение для углов рассогласования:

$$\Delta\alpha = \arcsin \frac{X_n}{Z_{y1}} - \arcsin \frac{X_n}{Z_{y2}} + \arcsin \frac{I_{y1} Z_{y1}}{U_m} - \arcsin \frac{I_{y2} Z_{y2}}{U_m}. \quad (8)$$

Анализ этого выражения показывает, что полностью симметричная работа вентилях со схемой самоуправления возможна только при соблюдении условий $I_{y1} = I_{y2}$ и $Z_{y1} = Z_{y2}$.

Принимая $R_y \ll R + R_n$, можем считать, что $Z_{y1} = Z_{y2} = Z_y$. С учетом этого обстоятельства выражение (8) принимает вид

$$\Delta\alpha = \arcsin \frac{I_{y1} Z_y}{U_m} - \arcsin \frac{I_{y2} Z_y}{U_m}. \quad (9)$$

Пренебрегая падением напряжения на открытом вентиле, считаем

$$U_m = I_n Z_n = \sqrt{2} I_n Z_n, \quad (10)$$

где I_n — действующее значение тока нагрузки, которое имело бы место при угле проводимости $\gamma = \pi$.

Тогда

$$\Delta\alpha = \arcsin \frac{I_{y1} Z_y}{\sqrt{2} I_n Z_n} - \arcsin \frac{I_{y2} Z_y}{\sqrt{2} I_n Z_n}. \quad (11)$$

Воспользовавшись формулой для преобразования разности двух арксинусов и заменив в ней подкоренное выражение биномиальным рядом, найдем (ограничиваясь с достаточной для практических нужд точностью двумя первыми членами ряда), что

$$\Delta\alpha = \arcsin K_z \frac{\Delta I_y}{\sqrt{2} I_n} \left[1 + \frac{1}{4} K_z^2 \frac{I_{y1} I_{y2}}{I_n^2} \right], \quad (12)$$

где

$$\Delta I_y = I_{y1} - I_{y2}; \quad (13)$$

$$K_z = \frac{Z_y}{Z_n} = \sqrt{\frac{(R + R_n)^2 + X_n^2}{R_n^2 + X_n^2}}. \quad (14)$$

Анализ полученных выражений позволяет установить следующие особенности работы встречно-параллельно включенных тиристоров с самоуправлением:

1. Угол рассогласования при включении вентилях ($\Delta\alpha$) тем больше, чем меньше ток нагрузки, особенно, когда он становится соизмеримым с токами управления. Например, подставив в выражение (12)

$I_{y1}=0,2$ А; $I_{y2}=0,1$ А ($\Delta I_y=0,1$ А), получим для токов нагрузки 6 А и 0,5 А углы рассогласования соответственно 1° и 8° .

2. Сильно выраженная асимметрия может иметь место и при токах нагрузки, существенно превышающих токи управления, если сопротивление нагрузки Z_{Π} соизмеримо со значением ограничительного сопро-

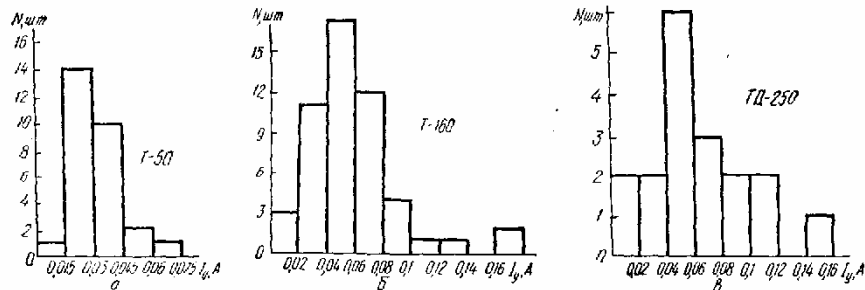


Рис. 3

тивления R в цепи управления. В этом случае коэффициент K_z становится заметно больше единицы, и его влияние на угол рассогласования существенно возрастает. Это положение иллюстрируется рис. 2, на котором показана экспериментально полученная зависимость действующих значений токов (I_1 и I_2), протекающих через тиристоры типа TD250 с токами управления $I_{y1}=0,11$ А; $I_{y2}=0,16$ А, включенных в общую пару, и суммарного тока I в первичной обмотке ненагруженного трансформатора от сопротивления в цепи управления. Ток I в первичной обмотке при закороченных вентилях составлял 0,84 А.

Из приведенной зависимости видно, что по мере увеличения ограничительного сопротивления асимметрия работы вентилях увеличивается. Этим, в частности, обусловлена необходимость выбора ограничительного сопротивления $R \ll Z_{\Pi}$, за счет чего $K_z \rightarrow 1$.

Практический интерес представляет определение диапазона токов нагрузки для тиристоров разных типов, в котором несимметрия не превосходит допустимого значения $\Delta \alpha = 1^\circ$ [5]. С учетом этого при $K_z = 1$ выражение (12) примет вид

$$\frac{\Delta I_y}{\sqrt{2} I_n} \left[1 + \frac{1}{4} \frac{I_{y1} I_{y2}}{I_n^2} \right] = 0,0175. \quad (15)$$

После ряда последовательных преобразований получим кубическое уравнение:

$$0,0175 I_n^3 - \frac{\Delta I_y}{2} I_n^2 - \frac{1}{4} I_{y1} I_{y2} \Delta I_y = 0, \quad (16)$$

решение которого в общем виде достаточно громоздко. Однако анализ гистограмм распределения токов управления тиристоров различных типов (рис. 3) показывает, что даже у мощных тиристоров токи управления обычно не превышают 0,2 А. Учитывая это обстоятельство, третьим членом в выражении (16) можно пренебречь ввиду его малости по сравнению с остальными членами.

Тогда, решая (16), приближенно получим

$$I_n \approx 40,3 \Delta I_y. \quad (17)$$

Подставив в выражение (17) вместо ΔI_y максимальную для исследованной выборки разность токов управления двух тиристоров одного типа, можно определить $I_{n,кр}$ и с достаточной степенью вероятности гарантировать симметричную работу всех тиристоров этого типа при условии, что $I_{\Pi} > I_{n,кр}$ (таблица).

Если это условие не выполняется, асимметрия может быть такой, что двухполупериодный режим превращается в однополупериодный (рис. 4).

На практике нельзя не считаться с этим отрицательным свойством схемы с самоуправлением в случае сброса нагрузки или работы на холостом ходу, особенно, если в качестве нагрузки выступают двигатели или трансформаторы. Известно, что у современных силовых трансформаторов класса 10—35 кВ ток холостого хода составляет доли

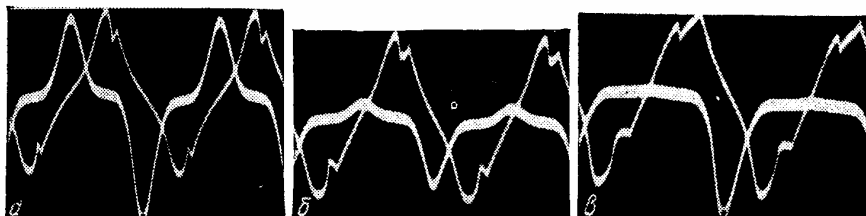


Рис. 4

ампера, и только у достаточно мощных трансформаторов он составляет один ампер и более, тогда как $I_{н.кр}$ у мощных тиристоров может достигать 5—7 А.

Несимметричная работа встречно-параллельно включенных вентилях при независимом (например, фазоимпульсном) управлении и раз-

Тип тиристоров	$\Delta I_{у\max}$, А	$I_{н.кр}$, А
Т-50	0,055	2,2
Т-160	0,16	6,5
ТД-250	0,14	5,6

личном характере нагрузки (в том числе и при включении в первичную обмотку трансформатора) обстоятельно рассмотрена в работах [1, 3, 6].

На основании этих исследований обосновывается требование к независимым системам управления, обеспечивающее разбаланс углов $\Delta\alpha \leq 1^\circ$. Однако на практике ограничить асимметрию импульсов управления величиной в один градус очень трудно. На основе проведенного в работе [3] анализа

можно найти, что только за счет влияния различных факторов на транзисторы системы импульсно-фазового управления суммарная асимметрия может достигнуть

$$\Delta\alpha = \sum_{i=1}^n \Delta\alpha_i \approx \Delta\alpha(\Delta U_{кэ}) + \Delta\alpha(\Delta I_{к0}) + \Delta\alpha(\Delta R_{об}) \approx 9^\circ,$$

где $\Delta\alpha(\Delta U_{кэ})$ — асимметрия за счет разброса падений напряжений между эмиттером и коллектором; $\Delta\alpha(\Delta I_{к0})$ — асимметрия за счет разброса обратных токов коллектора; $\Delta\alpha(\Delta R_{об})$ — асимметрия, вызванная разбросом входного сопротивления нуль-органов.

В рассматриваемой системе с самоуправлением автоматически обеспечивается симметричный режим работы даже с очень большим ΔI_y , если ток нагрузки $I_n > I_{н.кр}$. Автоматически возникает и асимметричный режим при меньших токах с неизбежно вытекающими отсюда последствиями.

Появление постоянного тока в первичной обмотке трансформатора ведет к одностороннему подмагничиванию магнитопровода, сопро-

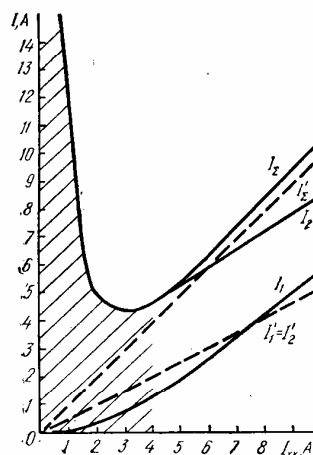


Рис. 5

вождающемуся резким увеличением амплитуды переменной составляющей намагничивающего тока за один полупериод и непропорциональным уменьшением ее за другой. При этом доля постоянной намагничивающей силы F_0 относительно амплитуды намагничивающей силы основной гармоники F_{m1} с зашунтированными вентилями может быть определена из выражения

$$K_{\mu} = \frac{F_0}{F_{m1}} = \frac{2Z_n}{\pi R_n} \sin\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \sin \frac{\Delta\alpha}{2}. \quad (8)$$

Эффект подмагничивания проявляется тем сильнее, чем меньше коэффициент мощности $\cos \varphi_n = \frac{R_n}{Z_n}$, а на холостом ходу он усиливается тем, что

вместо Z_n и R_n будет $Z_x \gg Z_n$ и $R_1 \ll R_n$, где R_1 — активное сопротивление первичной обмотки трансформатора. Тогда уже при малых значениях $\Delta\alpha = f(\Delta I_y, K_z)$ можно ожидать значительное подмагничивание магнитопровода. Это предположение подтверждается экспериментом.

На рис. 5 приведены зависимости токов, протекающих через тиристоры $V1 (I_1)$ и $V2 (I_2)$ типа Т-160, и их суммы I_{Σ} от тока холостого хода трансформатора; $I'_{\Sigma} = \sqrt{I_1'^2 + I_2'^2}$ — ток в обмотке трансформатора при идеально симметричной работе тиристоров; I_1', I_2' — токи, протекающие через тиристоры $V1$ и $V2$. Как видно из рис. 5, в области малых токов нагрузки при $I_{xx} < 4$ А (эта часть заштрихована) резко возрастает несимметрия токов вентилях и величина суммарного тока. Это обстоятельство накладывает ряд ограничений на практическое использование схемы с самоуправлением, например, на возможность отключения разъединителем трансформатора с тиристорным переключателем ответвлений в режиме холостого хода. Проведенные исследования позволили сделать ряд практических рекомендаций, позволяющих устранить отрицательные свойства схемы с самоуправлением:

а) при использовании встречно-параллельно включенных тиристоров в аппаратуре, для которой не исключена работа в области малых токов или на холостом ходу (при $I_n < I_{н.кр}$), целесообразно осуществлять подбор в общую пару тиристоров с минимальным разбросом токов управления;

б) в аппаратуре массового производства, где подбор тиристоров затруднителен, можно рекомендовать шунтирование ограничительного сопротивления в цепи управления после отпирания тиристоров;

в) в тиристорных переключателях ответвлений трансформаторов можно ограничиться подбором по току управления только пар одного ответвления, если предусмотреть автоматическое переключение на это ответвление при уменьшении тока нагрузки ниже $I_{н.кр}$.

1. Войтик М. С. Низковольтные тиристорные стабилизированные выпрямители. М.: Энергия, 1978. 72 с.
2. Гуревич В. И., Савченко П. И., Балахонов А. М. Управление тиристорами переключателя ответвлений силового трансформатора. — Электротехника, 1980, № 7, с. 28—31.
3. Кот Л. С. Анализ асимметрии импульсов многоканальных систем импульсно-фазового управления. — В кн.: Оптимизация устройств преобразовательной техники. Киев, 1977, с. 118—122.
4. Поскробко А. А., Братолобов В. Б. Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе. М.: Энергия, 1978. 192 с.
5. Ситник Н. Х. Силовая полупроводниковая техника. М.: Энергия, 1968. 320 с.
6. Чиженко И. М., Выдолоб Ю. Ф., Грудская В. П. Подключение к сети конечной мощности трансформатора с тиристорным регулятором на первичной стороне. — Пробл. техн. электродинамики, 1975, вып. 55, с. 60—64.

Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства

Поступила 15.X 1980 г.