

УДК 621.382.233:621.316.543.001.4

УПРАВЛЕНИЕ ТИРИСТОРАМИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ОТВЕТВЛЕНИЙ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В. И. ГУРЕВИЧ, инж., П. И. САВЧЕНКО, канд. техн. наук,
А. М. БАЛАХОНОВ, инж.

Для регулирования напряжения в электрических сетях широкое распространение получили механические устройства переключения ответвлений силовых трансформаторов. Однако, как показал опыт эксплуатации этих устройств [Л. 1, 2], они не всегда могут обеспечить достаточную надежность работы и в 66% всех случаев выхода трансформатора из строя являются причиной их повреждения. В этой связи более перспективными оказываются бесконтактные тиристорные переключатели. В [Л. 3] рассмотрены основные вопросы построения силовой части высоковольтных тиристорных переключателей (ВТП).

В данной работе рассматриваются вопросы построения системы управления ВТП и предложены новые решения двух проблем: передачи сигналов управления от заземленных блоков управления на тиристоры, находящиеся под потенциалом высоковольтной обмотки и к. э. одной из секций высоковольтной обмотки, возникающего при переключении ответвлений трансформатора. В принципе, для ВТП возможно использование любого из известных способов передачи сигналов управления, применяемых в высоковольтных тиристорных преобразователях. Однако реальная конструкция переключателя окажется слишком дорогостоящей, поскольку в высоковольтных тиристорных преобразователях система управления должна обеспечивать передачу импульсов со строго заданными параметрами, следующими с большой частотой, а в ВТП тиристоры работают в ином, более простом режиме, часто при более низких напряжениях (6, 10, 35 кВ). Поэтому копирование известных принципов приведет к неоправданному усложнению и удорожанию устройства.

Авторами разработана простая и достаточно надежная система управления ВТП, выполненная на ином принципе. Основой системы являются высоковольтные модули 1

(рис. 1), один выход которых соединен низковольтными кабелями 2 с блоком управления 3, а другой выход — управляющими электродами тиристоров. Высоковольтный модуль выполнен в виде цилиндрического корпуса, в средней части которого установлен изоляционный экран (диск) из материала, выдерживающего полное рабочее напряжение установки. На одной поверхности экрана укреплен герметизированный магнитоуправляемый контакт с ферромагнитными пружинами (геркон), а на другой — обмотка возбуждения с магнитопроводом.

Экспериментальный образец высоковольтного модуля класса 35 кВ (рис. 2) выполнен из отрезка винилпластовой трубки длиной 130 мм и диаметром 53 мм с толщиной стенки 3 мм. Изоляционный экран имеет толщину 4 мм и выполнен из политетрафторэтилена с электрической прочностью 25—27 кВ/мм. В качестве обмотки возбуждения использовалась катушка миниатюрного электромагнитного реле типа РЭС-22. Геркон типа КЭМ-3. Все детали модуля залиты эпоксидным компаундом ЭЗК-10. Модуль испытывался на электрическую прочность при напряжении 85 кВ. Пробоя изоляции и коронирования элементов не наблюдалось. Надежное срабатывание геркона происходит при подаче на обмотку возбуждения мощности около 1,5 Вт. В настоящее время разработан и испытан высоковольтный модуль на рабочее напряжение 110 кВ, который снабжен алюминиевыми экранами для выравнивания электрического поля, ферромагнитными экранами для защиты от внешних магнитных полей и другими вспомогательными элементами. Разрабатывается герконовый модуль с изолирующей вакуумной камерой.

Схема подключения геркона к тиристорам показана на рис. 3. Тиристоры отпираются при замкнутых контактах геркона импульсами тока смещения, формирующегося из их анодного напряжения. Этот ток ответвляется в управляющие переходы тиристоров через контакты геркона и ограничительный резистор R в начале каждого полупериода напряжения сети. Тиристор $T1$ включается током, протекающим через переход «катод — управляющий электрод» $T2$, контакты геркона, резистор R и переход «управляющий электрод — катод» $T1$. При отпирании тиристора $T1$ сигнал управления с него автоматически снимается, так как падение напряжения на отпертом тиристоре не превышает 1 В. При переходе тока через нуль $T1$ запирается. С началом следующей полуволны аналогично отпирается $T2$. Для предотвращения протекания

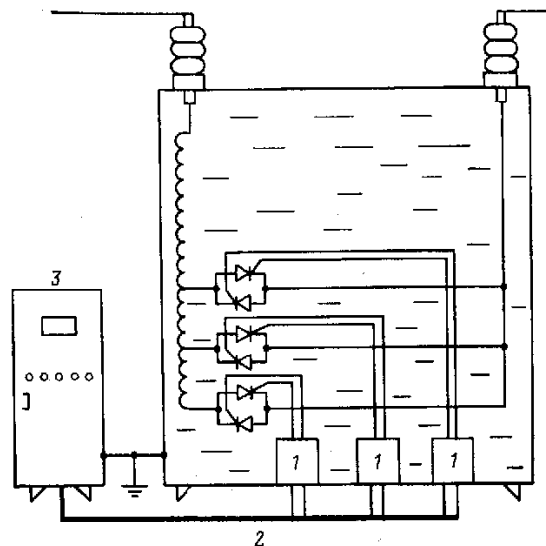
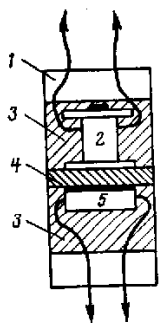


Рис. 1. Система управления ВТП на базе высоковольтных модулей.

Рис. 2. Экспериментальный герконо-
вый модуль на 35 кВ.

1 — корпус; 2 — обмотка возбуждения; 3 — герметизирующий диэлектрик; 4 — высоко-
вольтный экран; 5 — геркон.



импульсов обратного тока через управ-
ляющие переходы, они могут быть
зашунтированы диодами.

Таким образом, при замкнутых
контактах геркона импульсы управ-
ления поступают на тиристоры син-
хронно с током сети в начале каждо-
го полупериода. При работе на ак-

тивно-индуктивную нагрузку для обеспечения синусоидальной
формы тока угол отпирания тиристоров должен быть близким
к критическому, т. е. сигналы на управляющие электроды
должны подаваться со сдвигом по фазе, равным фазовому
углу нагрузки φ .

$$\alpha = \varphi = \arctg(\omega L_n / R_n).$$

Для обеспечения этого условия при изменении параме-
тров нагрузки обычно применяют датчики тока в цепи на-
грузки, воздействующие на систему управления. В разрабо-
танном устройстве параметры импульсов управления устанав-
ливаются автоматически, в зависимости от изменения тока
нагрузки и ее характера, что по существу является решением
проблемы обеспечения синусоидальности выходного напря-
жения. Исследования описанного метода управления, прове-
денные на тиристорах типа ТД250 с нормируемым током
управления до 0,6 А, показали, что ток, проходящий через
геркон, имеет характер одиночных импульсов треугольной
формы небольшой длительности, возникающих в начале
каждого полупериода. Поэтому при расчете мощности герко-
на следует учитывать не нормируемое значение тока управ-
ления, а некоторый эквивалентный ток в повторно-кратковре-
менном режиме, величина которого в соответствии с [Л. 5]
может быть рассчитана из следующего выражения

$$I_{\text{экв.г}} = I_D \sqrt{\frac{1 - \exp\left(-\frac{t_n}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_n + t_p}{\tau}\right)}},$$

где I_D — реальный кратковременный ток; t_n — длительность
протекания тока I_D ; t_p — длительность паузы между импуль-
сами; τ — постоянная нагрева геркона.

Поскольку импульс тока I_D имеет форму, отличную от
прямоугольной, его значение не может быть непосредственно
подставлено в предыдущее выражение. Величиной, харак-
теризующей импульсы тока треугольной формы, может слу-
жить некоторый эквивалентный ток $I'_{\text{э}}$, который в общем
случае равен

$$I'_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_0^{t_i} i^2 dt}.$$

Допуская для упрощения, что величина тока в импульсе
меняется по закону прямой $I = at$, где $a = I_y / t = \text{const}$; I_y —
нормируемый ток управления, получаем:

$$I'_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t a^2 t^2 dt} = \frac{at}{\sqrt{3}} = \frac{I_y}{\sqrt{3}}.$$

Тогда окончательно

$$I_{\text{э.г}} = \frac{I_y}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1 - \exp\left(-\frac{t_n}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_n + t_p}{\tau}\right)}}.$$

Непосредственно измеренное среднее значение тока в це-
пи геркона составило 15—20 мА. В разомкнутом состоянии
к контактам геркона будет прикладываться напряжение одной
тиристорной ячейки (т. е. по существу одной ступени транс-
форматора), поэтому они должны быть рассчитаны на ком-
мутацию напряжения порядка 500—2000 В.

Герконы с повышенной коммутационной способностью раз-
работаны и выпускаются рядом зарубежных фирм, например
«Hamlin», Inc (США); «Schrack» (Австрия). Широко извест-
ны герконы Паурид фирмы «Brockhirst Irganig» (Англия),
снабженные магнитной цепью с двумя зазорами. По свиде-
тельству [Л. 6] такая система дает возможность реализовать
конструкцию геркона с двумя последовательными разрывами
контактов, что может значительно повысить коммутационную
способность аппарата.

В СССР также проведены исследования [Л. 4] и выпол-
нены конструктивные разработки в области высоковольтных
магнитоуправляемых контактов. Промышленностью освоены
высоковольтные герконы, например, типа «Южанин», комму-
тирующие напряжения порядка 3000 В. Эти герконы имеют
диаметр колбы 5,4 мм при длине 52 мм.

Управление тиристорными ключами с помощью герконов
приводит к возникновению к. з. одной или нескольких ступе-
ней трансформатора. При естественной коммутации на пере-
менном токе тиристоры, как известно, запираются при при-
ближении синусоиды тока к нулевому значению, независимо
от наличия или отсутствия сигнала на управляющем электро-
де. В то же время отпирание тиристора происходит в течение
очень малого времени (порядка 20 мкс) практически в любой
момент синусоиды. Поэтому в момент коммутации тиристоры
последующей ступени успевают отпереться до того, как за-
прутся тиристоры предыдущей ступени. В результате этого
в течение некоторого времени

$$t_{\text{к.з}} = \frac{1}{2\pi f} (t_1 + t_r + t_T),$$

где t_1 — момент подачи команды на переключение; t_r — время
срабатывания геркона; t_T — время отпирания тиристоров; при
 $f=50$ Гц будет к. з. ступени силового трансформатора. При
этом из-за малости значений t_r (1,0 мс) и t_T (0,02 мс) время
существования к. з. в основном зависит от момента коммута-
ции t_1 . При поступлении команды на переключение в началь-
ном участке синусоиды (наиболее неблагоприятный случай)
время существования к. з. приближается к половине периода,
а амплитуда импульса тока в секции обмотки трансформа-
тора достигает существенной величины.

Значительные амплитуда и длительность импульса тока
к. з. требуют учитывать его влияние на элементы высоко-
вольтного переключателя, и в
первую очередь на тиристоры.
Для тиристоров, например, ти-
па ТВ800 критическая скорость
(di/dt) нормируется значением
70—100 А/мкс.

Анализ полученных осцил-
лограмм показывает, что им-
пульс тока к. з. имеет значи-
тельную крутизну переднего
фронта, что обуславливает
большую величину di/dt , рав-
ную приблизительно 1,4 А/мкс.

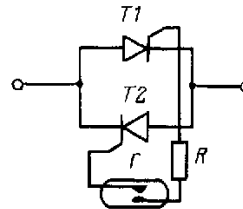


Рис. 3. Схема подключения
геркона к тиристорам ключа.

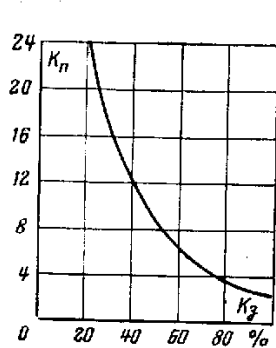


Рис. 4. Зависимость кратности рабочей перегрузки от коэффициента предварительной загрузки тиристора типа ТВ-800 при $t=0,01$ с.

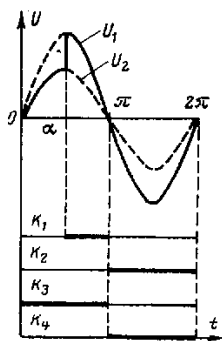


Рис. 5. Осциллограмма изменения напряжения на нагрузке.

Это, однако, не превышает допустимых для тиристорov значений.

Другим, нормируемым для тиристорov параметром, является допустимая амплитуда тока рабочей перегрузки. Согласно системе предельных параметров, рекомендуемой в публикациях МЭК и материалах по стандартизации СЭВ, а также в соответствии с ГОСТ 14069-72 число рабочих перегрузок по току за время срока службы прибора при воздействии повторяющихся напряжений не ограничивается (в отличие от аварийных перегрузок). При анализе перегрузочной способности тиристора более удобно пользоваться не приводимой в справочных материалах зависимостью допустимой амплитуды тока рабочей перегрузки от длительности, а зависимостью допустимой кратности рабочей перегрузки $k_n = I_{пер} / I_{раб}$ от коэффициента предварительной загрузки $k_z = I_{раб} / I_{ном}$ для фиксированной длительности (рис. 4). Согласно этой зависимости для мощных тиристорov, например ТВ800, при условии его предварительной загрузки даже на 60% номинальной допустимая кратность амплитуды тока рабочей перегрузки не превышает 6 (при длительности $t=0,01$ с). В то же время кратность амплитуды импульса k_n даже для маломощного трансформатора, используемого в эксперименте,

$$k_n \approx I_{мина} / I_{раб} = 8,$$

что превышает допустимое для тиристорov значение.

Для обеспечения нормальной работы тиристорov необходимо либо уменьшать предварительную нагрузку тиристорov, что резко снизит технико-экономические показатели ВТП, либо применять специальные меры для устранения к. з. при переключениях. Такими мерами могут служить искусственная коммутация с принудительным запирающим тиристорov и использование специальных узлов, предотвращающих или ограничивающих ток к. з. Искусственная коммутация сложна и обладает низкой надежностью, поэтому вряд ли может считаться целесообразной в ВТП. Известные узлы синхронизации [Л. 7] из-за наличия непосредственных связей между силовыми цепями и блоком управления мало пригодны для высоковольтного ВТП.

В [Л. 8] показано, что тиристоры в схеме переключателя могут быть представлены в виде ключа с последовательно включенным идеальным вентиляем. Для такой схемы возможна коммутация, произведенная по диаграмме рис. 5. В начале положительного полупериода напряжения питания e замыкается ключ K_2 и в интервале $\theta=0 \rightarrow \alpha$ к нагрузке прикладывается напряжение

$$U = e(\omega_2 / \omega_1).$$

В момент времени $\theta = \alpha$ замыкается ключ K_1 и к вентилю D_2 прикладывается обратное напряжение

$$U_{D2} = e \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1},$$

которое запирает этот вентиль. В интервале $\alpha < \theta < \pi$ к нагрузке прикладывается напряжение $U = e$.

После перехода синусоиды через нулевое значение ключ K_3 размыкается, а K_2 — замыкается, при этом процесс перехода на следующую ступень заканчивается.

Этот же способ может быть использован и в реальной схеме ВТП, описанной в [Л. 3], в которой токораспределение в момент коммутации аналогично рассмотренному упрощенному варианту. Такой метод управления при применении его в ВТП требует индивидуального управления каждым отдельным тиристором, что, учитывая высоковольтность устройства и необходимость согласования сигналов управления с изменением параметров нагрузки, значительно усложнит и удорожает переключатель.

Более целесообразным представляется применение специального синхронизатора (рис. 6), представляющего собой схему, собранную на транзисторе и двух маломощных тиристорах, включаемую между каждым выходом блока управления (БО) и каждым высоковольтным модулем (точнее обмоткой возбуждения модуля). Принцип действия синхронизатора основан на шунтирующем действии отпертого транзистора ($V1, V'1$), задерживающего отпирание тиристора ($V2, V'2$) при наличии сигнала на управляющем электроде до окончания полупериода питающего напряжения, т. е. до выхода транзистора из состояния насыщения. Отпирание тиристора $V2$ или $V'2$ приводит к подаче питания на соответствующую обмотку возбуждения и включению соответствующей ступени трансформатора. Конденсатор $C1$ служит для сглаживания пульсаций на обмотке возбуждения геркона, а тиристор $V4$ — для своевременной разрядки конденсатора при снятии управляющего сигнала с данной ступени.

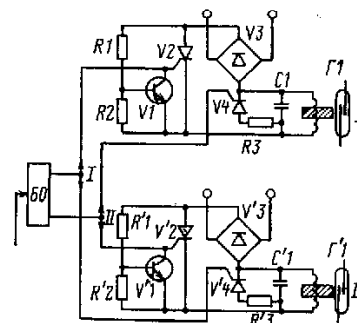


Рис. 6. Схема синхронизатора, предотвращающая образование контура к. з.

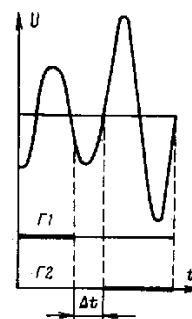


Рис. 7. Осциллограмма изменения напряжения на нагрузке и диаграмма переключения герконов, включенных через синхронизатор.

Δt — время задержки между отключением геркона $G1$ и включением геркона $G2$, обеспечиваемое синхронизатором.

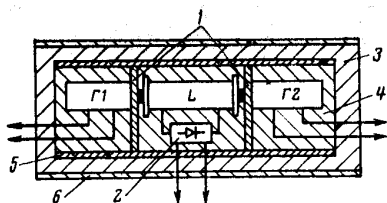


Рис. 8. Синхронизатор на герконе.

1 — изоляционные экраны; 2 — диодный выпрямительный мост; 3 — магнитодиэлектрик (для магнитного экранирования); 4 — эпоксидный компаунд; 5 — внутренний корпус; 6 — внешний корпус.

Синхронизаторы позволяют задержать включение последующей ступени до отключения предыдущей, т. е. до момента прохождения тока через нулевое значение. Таким образом, при подаче команды с блока управления (БО) на переключение ответвлений силового трансформатора в течение некоторого времени ($\Delta t \leq 0,01$ с) (рис. 7) трансформатор продолжает работать на прежней ступени, а с началом новой полуволны — уже на следующей ступени. При этом полностью исключается опасность возникновения к. з. ступени трансформатора.

В настоящее время разработаны синхронизаторы на логических элементах типа И—НЕ, а также на базе герконовых модулей (рис. 8). Обмотка L подключается параллельно ячейке встречно-параллельно соединенных тиристоров данной ступени через выпрямительный мост (последовательно с ограничивающим сопротивлением), а герконы $Г1$ и $Г2$ — к цепи управляющих электродов тиристоров соответственно предыдущей и последующей ступеней. При открытых тиристорах данной ступени напряжение на обмотке L близко к нулю, а герконы разрывают цепи управления тиристоров двух соседних ступеней. Сигнал с блока управления может поступить на тиристоры одной из этих ступеней только после запаривания тиристоров данной ступени.

Напряжение между элементами синхронизирующего модуля не превышает 3—4 кВ. Применяв в качестве изоляционных экранов диски толщиной 3—4 мм из политetraфторэтилена (каждый из которых длительно выдерживает напряжение порядка 80 кВ), можно получить электрическую прочность модуля с большим запасом, а вероятность пробоя — близкую к нулю. При этом конструкция синхронизатора получается проще и дешевле, чем при использовании полупроводниковых и логических элементов, включенных в низковольтные цепи.

Разработанная система управления тиристорами на базе высоковольтных герконовых модулей является одним из путей решения проблемы передачи команд с заземленных блоков управления на тиристоры высоковольтного переключателя, находящиеся под потенциалом 35—110 кВ. Анализ параметров современных герконов с повышенной коммутационной способностью и характера тока, протекающего через геркон, а также выполненные экспериментальные образцы высоковольтных герконовых модулей подтверждают возможность успешной реализации разработанной системы в ВТП класса 35 и 110 кВ.

Установлено, что при использовании высоковольтных герконовых модулей в момент переключения возникает импульс тока к. з., кратность амплитуды которого превышает допустимую для тиристоров кратность тока рабочей перегрузки. Разработаны устройства, предотвращающие возникновение к. з. и обеспечивающие синхронную работу переключателя.

Список литературы

1. Иорданов Н. Вопросы по качеству и эксплуатации на наших трансформаторах. — Энергетика, 1968, т. 19, № 5—6, с. 41—44.
2. Аберсон М. Л. Об опыте эксплуатации устройства РПН в городских сетях. — Научные труды Академии комму-

нального хозяйства им. К. Д. Панфилова, 1975, т. 111, с. 14—21.

3. Савченко П. И., Гуревич В. И. Применение тиристоров для коммутации ответвлений силовых трансформаторов. — В кн.: Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. М.: Информэлектро, 1979 вып. 2 (109), с. 22—25.

4. Сердобинцев Ю. С. Разработка и исследование высоковольтных вакуумных слаботочных коммутирующих устройств с магнитоуправляемыми контактами. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1971.

5. Таев И. С. Электрические аппараты. Общая теория. М.: Энергия, 1977. 272 с.

6. К выбору базовых конструкций герконов повышенной мощности / Б. К. Буль и др. — Труды МЭИ, 1975, вып. 220, с. 152.

7. Трансформаторные и трансформаторно-тиристорные регуляторы-стабилизаторы напряжения / С. С. Окунь и др. М.: Энергия, 1969.

8. Иванчук Б. Н., Липман Р. А., Рувинов Б. Я. Тиристорные и магнитные стабилизаторы напряжения. М.: Энергия, 1968, 112 с.

Поступила 6.12.79