

ПРИМЕНЕНИЕ ТИРИСТОРОВ ДЛЯ КОММУТАЦИИ ОТВЕТВЛЕНИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Канд. техн. наук П. И. САВЧЕНКО, В. И. ГУРЕВИЧ

Механические переключающие устройства с электронными блоками управления, выполняющие коммутацию ответвлений силовых трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой, сложны в наладке механизмов и не надежны в эксплуатации. Аварийность трансформаторов из-за повреждения переключающих устройств по данным [1, 2] достигает 66% от общего числа повреждений трансформаторов.

Применение тиристоров в устройствах переключения ответвлений силовых трансформаторов позволяет повысить надежность их работы при условии соответствия основных параметров тиристоров (тока, напряжения) условиям работы в переключающем устройстве, предотвращения вынужденного намагничивания сердечника трансформатора постоянной составляющей тока, решения вопросов конструкции, относящихся к размещению блока тиристоров, его охлаждению.

Наиболее простая схема переключающего устройства на тиристорах показана на рис. 1, а. Поскольку в современных трансформаторах регулирование напряжения производится в пределах 15—20% номинального напряжения, при работе регулятора на ступени I к ячейке тиристоров ступени IV будет прикладываться суммар-

ное напряжение всех ступеней регулирования (т. е. около 20 кВ для трансформаторов класса 110 кВ).

Высокое напряжение будет возникать также и на тиристорах других ступеней, в то время как большинство серийно выпускаемых силовых тиристоров рассчитаны на напряжения до 1,2 кВ. Поэтому схему на рис. 1, а можно применить для коммутации ответвлений на потребительских трансформаторах, например, на трансформаторах с ПБВ, имеющих диапазон регулирования напряжения $\pm 5\%$, как предложено в [3].

При использовании регуляторов на трансформаторах с первичным напряжением выше 10 кВ необходимо устанавливать на каждой ступени последовательные цепочки тиристоров. Общее число ячеек тиристоров при такой схеме переключающего устройства

$$N_1 = \frac{U_n \cdot D\% \cdot n}{100 U_{р\tau}}, \quad (1)$$

где U_n — номинальное напряжение обмотки трансформатора, на которой производится регулирование;

$D\%$ — диапазон изменения напряжения при регулировании, %;

n — число ступеней регулирования;

$U_{р\tau}$ — допустимое рабочее напряжение одной ячейки тиристоров.

Для приведения всех рассматриваемых схем к общим условиям и для упрощения расчетов по оценке эффективности различных схем применяются средние значения величин: $D = 20\%$, $n = 20$, $U_{р\tau} = 1,0$ кВ.

При этом выражение (1) будет иметь вид

$$N_1 = 4U_n.$$

Для трансформаторов с первичным напряжением 35 кВ потребуется 140 ячеек (или 280 тиристоров). Поэтому применять такой регулятор на напряжении 35 кВ и выше экономически нецелесообразно вследствие высокой стоимости такого регулятора. Необходимо разработать специальные схемы, в которых число тиристоров будет значительно меньше.

В [4, 5] описаны комбинированные переключающие устройства, объединяющие в своей конструкции быстродействующие разъединители и тиристорные ячейки, шунтирующие разъединители в момент переключения, однако это является частичным решением вопроса, поскольку применяются недостаточно надежные подвижные механические аппараты.

Рассматривается устройство, выполненное полностью на тиристорах (рис. 1, б).

Ячейки тиристоров в этой схеме открываются следующим образом: на

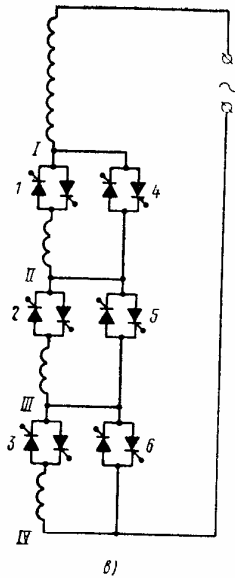
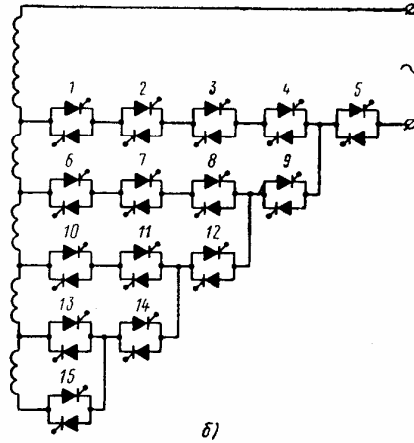
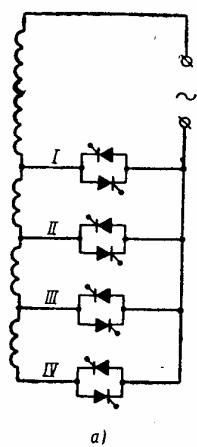


Рис. 1. Схемы тиристорных переключающих устройств

первой ступени открыты ячейки 1, 2, 3, 4 и 5, на второй — 6, 7, 8, 9 и 5, на третьей 10, 11, 12, 9 и 5 и т. д.

Схема построена таким образом, что на любом ответвлении работает одинаковое количество последовательно соединенных ячеек, при этом их общее число будет приближенно определяться выражением

$$N_3 = \frac{1}{2} \frac{U_n D \%}{U_{рт}} \times \left(\frac{U_n \cdot D \%}{U_{рт}} + 1 \right) \quad (2)$$

при условии, что среднее напряжение одной ступени не должно превышать $U_{рт}$.

При использовании средних значений входящих величин $N_2 = 0,8 U_n$, т. е. для напряжения 35 кВ — 28 ячеек (или 56 тиристоров).

Схема регулятора, предложенного авторами (рис. 1, в) позволяет значительно сократить число тиристоров. Порядок отпирания ячеек тиристоров в этой схеме следующий: на первой ступени открыты ячейки 4, 5 и 6, на второй — 1, 5 и 6, на третьей — 1, 2 и 6 и т. д.

К каждой ячейке тиристоров прикладывается напряжение только одной ступени, а при увеличении числа включенных ступеней возрастает также и число последовательно соединенных ячеек, которое определяется аналогично

$$N_3 = 2 \left(\frac{U_n D \%}{U_{рт}} - 1 \right) \quad (3)$$

или

$$N_3 = 0,4 U_n - 2.$$

Таким образом, для трансформатора с первичным напряжением 35 кВ число ячеек составит 12 (или 24 тиристора), что почти в 2,2 раза меньше, чем в предыдущей схеме. Этот вариант переключающего устройства наиболее эффективен.

При использовании для бесконтактной коммутации ответвлений ячеек встречно-параллельно включенных тиристоров появляется опасность вынужденного намагничивания трансформатора постоянной составляющей тока, величина которого определяется

$$I_{п} = \frac{2U_m}{\pi R_n} k, \quad (4)$$

где k — коэффициент, определяемый углами отпирания и запирания тиристоров одной ячейки.

Форма напряжения на нагрузке при полностью открытой ячейке тиристоров показана на рис. 2.

Появление углов α_1 и α_2 , вызывающих запаздывание при включении тиристоров, обуславливается необходимостью нарастания напряжения питания до величины $U_{вкл.}$, при которой ток нагрузки становится больше тока удержания и тиристор отпирается. Углы β_1 и β_2 , характеризующие опережение при выключении тиристоров, обуславливаются уменьшением тока нагрузки до значения тока удержания, при котором тиристоры запираются.

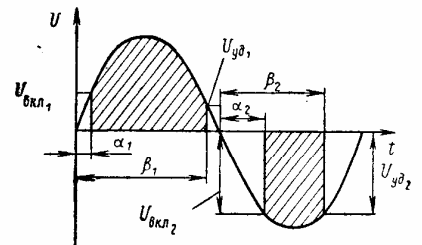


Рис. 2. Форма напряжения на нагрузке при полностью открытой ячейке встречно-параллельно включенных тиристоров

Зависимость коэффициента k в (4) от углов α и β имеет вид

$$k = \sin \alpha_{cp} \sin \frac{\Delta \alpha}{2} + \sin \beta_{cp} \sin \frac{\Delta \beta}{2}, \quad (5)$$

где $\alpha_{cp} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$; $\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1$;

$$\beta_{cp} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}; \Delta \beta = \beta_2 - \beta_1.$$

Экспериментальные исследования показали, что при различиях в углах менее $0,5-1,0^\circ$ постоянная составляющая не превышает нескольких десятых долей амплитуды тока холостого хода и вынужденное намагничивание трансформатора не оказывает заметного влияния. Однако при возрастании величин $\Delta \alpha$ и $\Delta \beta$ до 9° постоян-

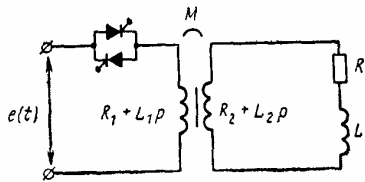


Рис. 3. Схема цепи, для которой определяется критический угол отпирания тиристоров

ная составляющая увеличивается уже на целый порядок, что значительно снижает технико-экономические показатели трансформатора.

Исходя из этого, максимально допустимую величину углов $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ целесообразно ограничить значением $0,5-1,0^\circ$. Практически это условие может быть выполнено, с одной стороны, применением общей системы управления обоими тиристорами ячейки, что позволяет до минимума снизить разбаланс углов регулирования и, с другой стороны, включением в ячейки тиристоров с возможно меньшими разбросами углов α и β .

Не менее важной задачей при построении тиристорных регуляторов напряжения является устранение искажений формы кривой тока. Этот вопрос рассмотрен в [6], где на основе анализа цепи (рис. 3) методом Ф-функций и методом сопряженных комплексных амплитуд показано, что для обеспечения в нагрузке синусоидальной формы тока с наименьшими искажениями тиристоры должны работать при определенной величине угла отпирания, связанного с параметрами трансформатора следующим образом

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{X_2 R_1 + X_1 R_2}{R_1 R_2 - \sigma X_1 X_2} - \arctg \frac{X_2}{R_2}, \quad (6)$$

где X_1, X_2 — индуктивные сопротивления соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора;

R_1, R_2 — активные сопротивления обмоток

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2};$$

$$I_n = \frac{\sqrt{U_0^2 + 4\kappa_\phi^2 R_x} \frac{[\theta_{pn}] - [\theta_m]}{R_B + R_{BP} + R_P} - U_0}{2\kappa_\phi^2 R_d}$$

L_1, L_2 — индуктивности обмоток;

M — коэффициент взаимной индукции.

При работе трансформатора на разветвленную сеть со значительными изменениями режима работы будет изменяться также и магнитное состояние трансформатора, что может повлечь за собой искажение кривой тока. Для компенсации влияния нагрузки на форму тока необходимо предусмотреть введение в блок управления тиристоров функциональной схемы, контролирующей ток нагрузки и изменяющей в соответствии с этим угол отпирания тиристоров. Таким образом, может быть решена задача устранения искажений формы тока при коммутации ответвлений трансформатора тиристорами.

При практической разработке реальных переключающих устройств на тиристорах для силовых трансформаторов необходимо решить вопросы размещения блока тиристоров, их охлаждения, подключения к выводам трансформатора, изоляции от заземленных частей конструкций и др. Наиболее рационально их можно решить путем размещения блока тиристоров непосредственно в баке трансформатора, для чего потребуется несколько изменить его форму и размеры. Тогда просто осуществить подключение тиристоров к ответвлениям трансформатора, изоляцию блока тиристоров и другие вопросы. Температура масла в современных силовых трансформаторах с принудительным охлаждением достигает приблизительно 80°C .

Для сохранения допустимой температуры кристалла ($125-140^\circ\text{C}$) требуется применение специальных систем охлаждения, при которых температурный перепад от кристалла к охлаждающему агенту не превышал бы $25-30^\circ\text{C}$ при интенсивном тепловыделении, достигающим $1-1,5 \text{ Вт/см}^2$. Такие системы охлаждения, предусматривающие применение (для управляемых вентилях) специальных радиаторов описаны в [7]. Радиаторы специальной конструкции применяются также и в тиристорных ограничителях напряжения типа ТОН-1. В этих устройствах отсутствует принудительное охлаждение масла, но тиристоры допускают нагрузку до 60% номинальной. Величину предельного тока через тиристор с учетом температуры масла и конкретной конструкции радиатора можно определить

где U_0, R_d — пороговое напряжение и динамическое сопротивление предельной прямой вольт-амперной характеристики для приборов данного типа;

θ_{pn} — максимальная допустимая температура полупроводниковой структуры;

θ_m — температура масла в трансформаторе;

κ_ϕ — коэффициент формы тока;

R_B — максимально возможное значение внутреннего установившегося теплового сопротивления с учетом имеющегося разброса для данного типа тиристора;

R_{BP} — тепловое сопротивление контакта «прибор — радиатор»;

R_P — тепловое сопротивление радиатора для данных условий охлаждения.

В данном случае не должно превышать действующее значение предельного тока, которое обусловлено термической стойкостью элементов конструкции прибора и ориентировочно рассчитывается как произведение коэффициента 1,57 на предельный ток прибора.

Таким образом, возможно размещение тиристоров в баке трансформатора, при этом максимально допустимый ток тиристоров с использованием эффективных радиаторов составляет около 60% номинального тока. Опыт работы погруженных в масло полупроводниковых приборов [8-10] показал, что в этом случае изоляционные, тепловые и механические характеристики получаются оптимальными. Кроме того, погружение тиристорного переключающего устройства в масло позволяет снизить уровень радиопомех, исключить коррозирование элементов устройства и связанным с этим помехи в цепях управления тиристоров.

Значительным преимуществом подобного метода охлаждения тиристоров является резкое повышение их циклоустойчивости, так как при таком охлаждении температура тиристоров не будет опускаться ниже температуры масла (80°C). Это приведет к резкому уменьшению перепадов температуры и возрастанию срока службы тиристоров.

Кроме того, при охлаждении тиристоров трансформаторным маслом повышается предел импульсной токовой перегрузки, определяемый допустимыми механическими напряжениями, которые возникают как след-

ствии перепада температур в полупроводниковой структуре и прилегающих к ней деталях конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Йорданов Н.* Вопросы по качеству и эксплуатации на наших трансформаторах. — «Энергетика», 1968, т. 19, № 5—6, с. 41—44 (болг.).
2. *Bortlik Jan.* Повреждение трансформаторов в энергетике — причины и предложения по их устранению. — «Energetika», 1970, т. 20, № 10 (чех.).
3. *Гуревич В. И., Савченко П. И.* Устройство для автоматического переключения ответвлений первичных обмоток трансформаторов с ПБВ.— «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве». Сб. науч. трудов МИИСП, т. XIV, вып. 6, ч. II. М., 1977.
4. Тиристорный переключатель ступеней трансформатора с высоковольтным регулированием напряжения. «Локомотивостроение и вагоностроение», 1969, № 24.
5. *Stein W.* Stufenschalter mit Thyristor—lastumschalter für Wechselstrom—Triebfahrzeuge. — „Siemens-Zeitschrift“, 1965, № 4.
6. *Такеути Т.* Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей. Л., «Энергия», 1973.
7. *Мальцев В. В.* Исследование масляного охлаждения кремниевых вентилях. Труды ВНИИЭМ, 1969, т. 31.
8. *Hengsberger I., Wüthrich R., Sherbaum F.* An oil-cooled HVDC thyristor Valve for outdoor installation.— „CIGRE. Internat. Conf. Large High Tens. Syst., Paris. Session 1970—24 aug.—2 Sept.“, № 14—04, 1—8.
9. *Heyner G., Schneider H., Schraudolph M.* Technical and economic advantages of thyristor HVDC converters.— „Electr. Rev.“, 1969, 185, № 25, 907—910.
10. Solid-State Valve set for Channel Link.— „Electr. World“, 1970, Sept. 1, 40—41.