

В. И. ГУРЕВИЧ

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ СПОСОБА
РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
ТИРИСТОРНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ РПН

В связи с многочисленными недостатками механических устройств для переключения ответвлений силовых трансформаторов под нагрузкой в последнее время интенсивно разрабатываются тиристорные РПН. ВИТ и ВИЭСХ уже разработали тиристорные РПН класса 10 кВ для трансформаторов мощностью 1000 кВА [1, 5]. Выполненные в ХИМЭСХ работы показали возможность и перспективность установки тиристорного РПН также и на стороне 35 кВ силового трансформатора мощностью до 6300 кВА [3, 4, 7].

Конструирование таких устройств возможно по двум принципам регулирования: дискретного (переключением ответвлений трансформатора тиристорными ключами) и плавного (изменением в пределах полупериода момента переключения с нижней ступени на верхнюю).

Поскольку нет единого мнения о целесообразности выбора того или иного принципа, разработка тиристорных РПН продолжается рядом организаций (ВИТ, ВИЭСХ, ХИМЭСХ, Институт электродинамики АН УССР, Горьковский политехнический институт, Уральский электромеханический институт инженеров транспорта, ПО «Уралэлектротяжмаш» и др.) с использованием обоих принципов.

Для оценки эффективности использования тиристорных устройств применяют несколько методик. Одна из них, разрабатываемая в ИЭД АН УССР, основана на поиске оптимальных соотношений между числом ключей и диапазоном работы. При этом эффективность схемы определяется числом тиристорных ключей, требуемых для обеспечения заданного диапазона [6]. Эта методика не учитывает ограничений, накладываемых тиристорами в высоковольтных схемах РПН и пригодна только для вторичных источников питания низкого напряжения. Более приемлемым для силовых РПН является метод, основанный на расчетах суммарной установленной мощности тиристорных ключей РПН [2]

$$P_y = \sum_{i=2}^n U_{T_i} I_{T_i}, \quad (1)$$

где U_T — напряжение, прикладываемое в схеме к одному тиристорному ключу; I_T — ток в цепи тиристорных; n — количество тиристорных ключей. Пусть, например, в простейшем случае необходимо сравнивать две схемы с одинаковым количеством ключей $n_1 = n_2 = n$ и токами $I_{T_1} = I_{T_2}$, но при $U_{T_1} = 100$ В, а $U_{T_2} = 500$ В.

Тогда, согласно этой методике, получим

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{P_{y_2}}{P_{y_1}} = \frac{U_{T_2}}{U_{T_1}} = 5. \quad (2)$$

То есть вторая схема в пять раз «менее эффективна», чем первая, по суммарной установленной мощности тиристоров. Однако этот показатель не является достаточно информативным для оценки различных вариантов и может привести к необоснованным выводам. В то же время использование общепринятого в энергетике критерия оценки эффективности применения тех или иных устройств по приведенным затратам вызывает необходимость привязки к конкретным сетям и потребителям с учетом значительного количества технических и экономических показателей, кото-

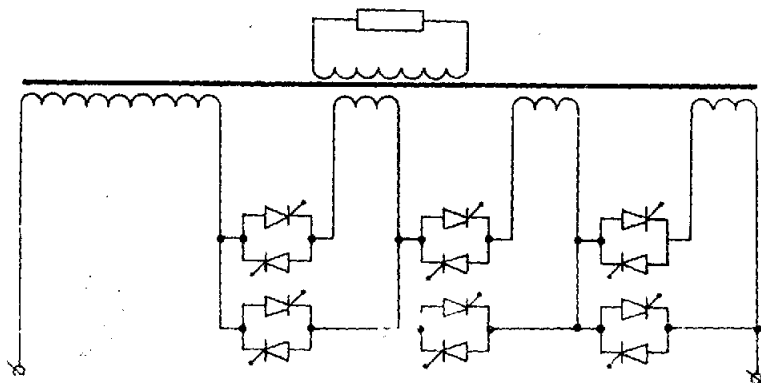


Рис. 1. Схема дискретного регулирования напряжения.

рые к моменту выбора того или иного принципа построения тиристорного РПН в начале проектирования в большинстве своем не известны.

Однако специфика сравнения различных вариантов тиристорных РПН заключается в том, что они являются устройствами одинакового функционального назначения с одинаковой трудоемкостью изготовления и затратами на установку и эксплуатацию в сетях, а их применение в сетях создает одинаковую экономию уменьшения потерь электроэнергии, повышения производительности и увеличения срока службы электрооборудования.

В этой связи появилась возможность производить сравнение эффективности тиристорных РПН по их стоимости, а точнее — по стоимости совокупности образующих их элементов, т. е. тиристоров. Обратившись к прейскурантам на силовые тиристоры, например типа ТД500, обнаружим, что в рассмотренном выше примере отношение стоимостей блоков тиристоров РПН равно

$$\frac{C_{\text{РПН}_2}}{C_{\text{РПН}_1}} = \frac{n C_{500}}{n C_{100}} = \frac{29_{\text{руб}}}{10_{\text{руб}}} = 2,9, \quad (3)$$

где C_{500} и C_{100} — стоимости одного тиристора ТД500 соответственно 5-го и 1-го классов, что существенно отличается от полученного выше результата. Кроме того, известные методы оценки не позволяют сравнивать экономическую эффективность плавно регулируемого РПН с дискретным.

Рассмотрим использование предлагаемого метода оценки на конкретных примерах. В устройстве РПН с плавным регулирова-

нием, разработанном лабораторией электроснабжения ВИЭСХ (10 кВ, 1000 кВА) [1] применены тиристоры типа ТД500 16—18-го классов, по 14 шт. на фазу. Максимальное напряжение на тиристорах высшей ступени составляет [1]

$$U_{T_n} = 1,15 U_n \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{W_1 - W_2}{W_1} = 2560 \text{ В}, \quad (4)$$

а на тиристорах низшей ступени — 2200 В. При этом стоимость блока тиристоров равна (на одну фазу)

$$\begin{aligned} C_{рпн_n} &= c_i n = 81 \times 14 = \\ &= 1134 \text{ руб.}, \quad (5) \end{aligned}$$

где c_i — стоимость одного тиристора; n — количество тиристоров.

При использовании дискретного регулирования в тех же пределах ($\pm 15\%$) со ступенью $1,5\%$ по схеме рис. 1, максимальное напряжение на тиристорах каждой ступени составит

$$U_{T_d} = 0,015 U_n \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}. \quad (6)$$

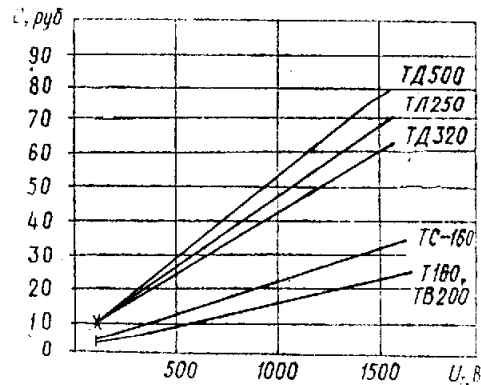


Рис. 2. Стоимость тиристоров в зависимости от их класса.

Столь низкое напряжение ступени позволяет использовать при дискретном регулировании тиристоры более низкого класса. Известно, что стоимость тиристоров даже одного типа существенно зависит от их класса (рис. 2) и может быть представлена в виде

$$c_i = c_0 + \alpha (U_T k_3 - U_0), \quad (7)$$

где c_0 — начальная стоимость при минимальном классе; α — коэффициент стоимости (10...60 руб./кВ для тиристоров различных типов); U_0 — минимальный класс напряжения (для силовых тиристоров $U_0=100$ В); k_3 — коэффициент запаса по напряжению (обычно $k_3=3...4$). Для тиристоров ТД500 в данной схеме получим

$$c_i = 10 + 50 (3,5 \times 0,127 - 0,1) \approx 27 \text{ руб.}$$

Ближайшая преysкурантная стоимость — 29 руб. Количество тиристоров может быть рассчитано по формуле

$$n = 2 \frac{U_n D \%}{U_{T_d}} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} K_{сх} = 80, \quad (8)$$

где $U_n=10,4$ кВ; $D\%$ — диапазон регулирования ($\pm 15\%$); $K_{сх}$ — коэффициент схемы ($K_{сх}=4$).

Тогда стоимость всего блока тиристоров составит в соответствии с (5) 2320 руб. Таким образом, при напряжении 10 кВ дискретный РПН, выполненный по рассмотренной схеме, примерно на 1000 руб. дороже РПН с плавным регулированием и не может конкурировать с ним. Однако в настоящее время в ХИМЭСХе разработана более совершенная конструкция РПН, содержащая вдвое меньше тиристоров (рис. 3, схема изображена в сокращенном виде для меньшего числа ступеней), для которой

$$C'_{\text{РПН}_d} = C_{\text{РПН}_d}^T + C_{\text{РПН}_d}^D = 1160 + 200 = 1360 \text{ руб.}, \quad (9)$$

где $C_{\text{РПН}_d}^T$ и $C_{\text{РПН}_d}^D$ — соответственно стоимости блока тиристоров и диодов. (Работа схемы проверена экспериментально и в статье

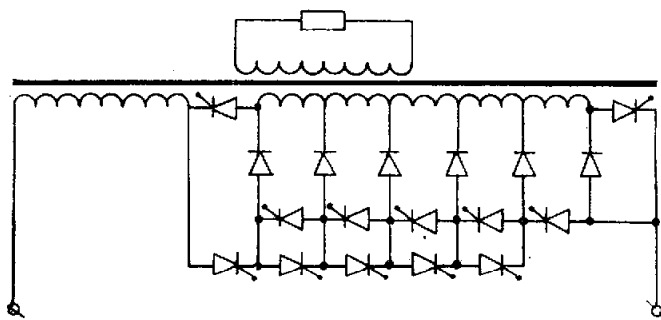


Рис. 3. Схема тиристорного РПН, разработанного в ХИМЭСХе.

не рассматривается). При этом оба принципа можно считать практически равноценными.

При переходе к напряжению 35 кВ положение меняется. Расчеты по формулам (6), (7), (8) и (9) дают следующие результаты для схемы рис. 3: $U_T = 427 \text{ В}$; $c_i = 70 \text{ руб}$; $n = 40 \text{ шт}$; $C_{\text{РПН}_d} \approx 3000 \text{ руб}$.

В то время как для схемы с плавным регулированием, в которой применяются тиристоры максимального (18-го) класса, перевод на 35 кВ возможен лишь за счет увеличения последовательно соединенных тиристоров в K раз, где $K = \frac{U_1}{U_{11}} = \frac{35 \text{ кВ}}{20 \text{ кВ}} = 3,5$,

что приведет к пропорциональному увеличению стоимости, т. е. $C_{\text{РПН}_d} = 1134 \times 3,5 \approx 4000 \text{ руб}$. При этом существенно усложняется передача сигналов управления с потенциала земли на потенциал тиристоров (для дискретного РПН эта задача решена простыми средствами [4]), усложняется управление последовательно соединенными тиристорами, значительно увеличивается ущерб от искажения формы напряжения.

Все это позволяет сделать вывод о нецелесообразности применения РПН с плавным регулированием при напряжении 35 кВ.

Список литературы: 1. Быковский В. И., Рослов Ю. А., Цагарейшвили С. А. Система бесконтактного регулирования напряжения трансформаторов 35/10 кВ для сельского хозяйства. — В кн.: Повышение качества электроснабжения сель-

лер Я. Л. А. с. 570035 (СССР). Регулятор напряжения переменного тока. — Оpubл. в Б. И. 1977, № 31. 3. Гуревич В. И. Перспективы применения тиристорных устройств РПН в сельских электрических сетях. — Электротехника, 1980, № 9. 4. Гуревич В. И., Савченко П. И., Балахонов А. М. Управление тиристорами переключателя ответвлений силового трансформатора. — Электротехника, 1980, № 7. 5. Дудин В. П., Пироженко А. Н. Бесконтактное тиристорное переключающее устройство ступенчатого регулирования напряжения трансформаторов для питания крупных сельскохозяйственных комплексов. — Труды ВИЭСХ, 1978, т. 45. 6. Липковский К. А., Озерянский А. А. Пути повышения эффективности использования ключевых элементов в трансформаторно-тиристорных стабилизаторах и регуляторах с исполнительными органами дискретного действия. — В кн.: Повышение эффективности устройств преобразовательной техники, 1972, № 1. 7. Савченко П. И., Гуревич В. И. Применение тиристоров для коммутации ответвлений силовых трансформаторов. — Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1979, вып. 2 (109).

Статья поступила в редколлегию 18. 10. 81