

УДК 621.316.543:621.382.233.001.4

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТИРИСТОРНЫХ РПН

В. И. ГУРЕВИЧ, инж.

Харьковский институт механизации и электрификации
сельского хозяйства

Недостатки механических устройств РПН, с одной стороны, и успехи в развитии силовой полупроводниковой техники, с другой, — обусловили интенсивные научно-исследовательские работы по созданию устройств бесконтактного переключения под нагрузкой ответвлений мощных силовых трансформаторов на стороне 10—35 кВ [Л. 1—3]. Одним из основных препятствий, сдерживающих широкое применение этих устройств, является их высокая стоимость, поэтому вопросам оптимизации трансформаторно-тиристорных структур уделяется серьезное внимание.

Для оценки эффективности использования тиристоров в этих устройствах находят применение различные методики. Одна из них предназначена для низковольтных трансформаторно-тиристорных структур [Л. 4] и не учитывает ряда ограничений по току и напряжению, накладываемых на схему силовой части в высоковольтных РПН. Другая [Л. 6] обладает недостаточной информативностью для оценки различных вариантов, что может привести к необоснованным выводам.

Для сравнительной оценки сложных систем (каковыми являются и тиристорные РПН), характеризуемых многими частными показателями (надежность, масса, габариты, стоимость и т. п.), более целесообразным представляется использование обобщенного показателя оптимальности, представляющего собой линейную функцию частных показателей [Л. 7],

$$\eta = \frac{b_1 y_1 + b_2 y_2 + \dots + b_n y_n}{c}, \quad (1)$$

где $b_1—b_n$ — весовые коэффициенты частных показателей $y_1—y_n$; c — стоимость системы.

Функция η может не иметь экстремумов, соответствующих оптимуму (при ограничении показателей по техническим требованиям, например, при дискретности показателей). В этом случае под оптимальной системой подразумевается лучшая при наличии ограничений на современном уровне развития техники.

По условиям работы в электрических сетях, ко всем тиристорным РПН предъявляются фиксированные требования в части надежности, износостойкости, диапазона регулирования, количества ступеней и т. п., чем обусловлены очень ограниченные вариации этих частных показателей. В то же время различные варианты тиристорных РПН, удовлетворяющих предъявляемым техническим требованиям, могут иметь существенно отличающуюся стоимость. Поэтому при условии обязательного соблюдения ряда технических требований стоимость может быть основным обобщенным показателем эффективности тиристорных РПН, учитывающим количество тиристорных, их тип, выбранный по условиям работы, и прикладываемое в конкретной схеме напряжение.

Определение стоимости связано со значительными трудностями ввиду условности и приблизительности исходных данных и элементов расчета. Поэтому на стадии проектирования при выборе вариантов допускается [Л. 8] приближенное определение стоимости по средней стоимости функциональных элементов (без расчета составляющих основных материальных и трудовых затрат на изготовление). Хотя устройства РПН являются изделиями с высокой трудоемкостью изготовления, такое приближение можно допустить, так как сравниваются однотипные аппараты примерно равного уровня трудоемкости. При этом погрешность такого метода сравнения вариантов не превышает 10% [Л. 8]. Стоимость сложной системы, состоящей из множества сгруппированных по классам однородных элементов, определяется из выражения

$$C = \sum_{i=1}^m n_i c_i \quad (2)$$

где n_i — число элементов одного класса; m — число различных классов в данной системе; c_i — удельные стоимости элементов.

Проведенный анализ показал, что стоимость элементов (тиристорных) тиристорных РПН является линейной функцией ряда параметров (рис. 1)

$$c_{i\tau} = c_0 + \alpha (U_{\tau} k_a - 0,1), \quad (3)$$

где c_0 — начальная стоимость при минимальном классе тиристорных по повторяемому напряжению ($U_{\min} = 0,1$ кВ), руб.; α — коэффициент стоимости (10—100 руб/кВ) для тиристорных выбранного типа; k_a — коэффициент запаса по напряжению ($k_a \approx 3-4$) и вводится для повышения устойчивости к коммутационным перенапряжениям, кратным 3—4; U_{τ} — напряжение, прикладываемое к одному тиристорному, кВ.

Для выбора типа тиристорных определяют их оптимальную токовую нагрузку в соответствии с методикой [Л. 9] для нескольких типов тиристорных, предполагаемых к использованию в РПН:

$$I_{c.p.o} = 8,45 \sqrt{\frac{C_n K}{C_n R_B}}, \quad (4)$$

где C_n — стоимость одного тиристора, руб.; $K \approx 1,5$ — коэффициент, учитывающий стоимость предохранителя, охладителя и других элементов; C_n — удельные годовые затраты, связанные с покрытием потерь в тиристорах, руб/(кВт·год); R_B — сопротивление ветви, Ом ($R_B = R_d + R_n + R_m$); R_d — динамическое сопротивление тиристорных; R_n, R_m — сопротивления предохранителя и соединительных шин.

Анализ результатов расчета по выражению (4) для тиристорных различных типов, а также рекомендации [Л. 5] показали, что с достаточной точностью ($\pm 5\%$) значение токовой нагрузки тиристорных может быть определено по упрощенной зависимости

$$I_{c.p.o} \approx 0,6 I_{n,\tau}, \quad (5)$$

где $I_{n,\tau}$ — паспортное значение предельного прямого тока для тиристорных данного типа.

Тогда тип тиристорных выбирают таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$I_{c.p.o} \approx I_{n,\tau}, \quad (6)$$

где $I_{n,\tau}$ — среднее значение тока в коммутируемой цепи РПН.

После этого стоимость одного тиристора выбранного типа может быть определена по выражению (3) или из прейскурантов. При этом класс тиристора по повторяемому напряжению с учетом (3) определяют из выражения

$$U_{kl} = U_{\tau} k_a \approx 3 U_{\tau}.$$

Рассмотрим применение предложенного метода оценки эффективности РПН на напряжение 35 кВ на некоторых конкретных примерах. Для упрощения примем одинаковый тип тиристорных во всех вариантах, например ТД500.

Пример 1. В схеме силовой части РПН (рис. 2,а) напряжение, прикладываемое к одному тиристорному ключу, может

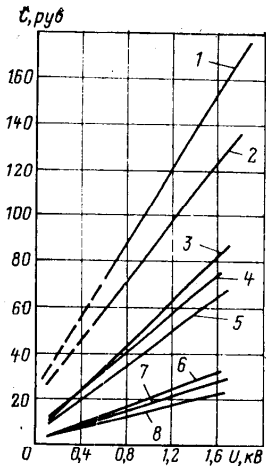


Рис. 1. Зависимость стоимости тиристорных различных типов от класса напряжения.

1 — Т1000; 2 — Т800; 3 — ТД500; 4 — ТЛ250; 5 — ТД320; 6 — ТБ200; 7 — Т160; 8 — Т100.

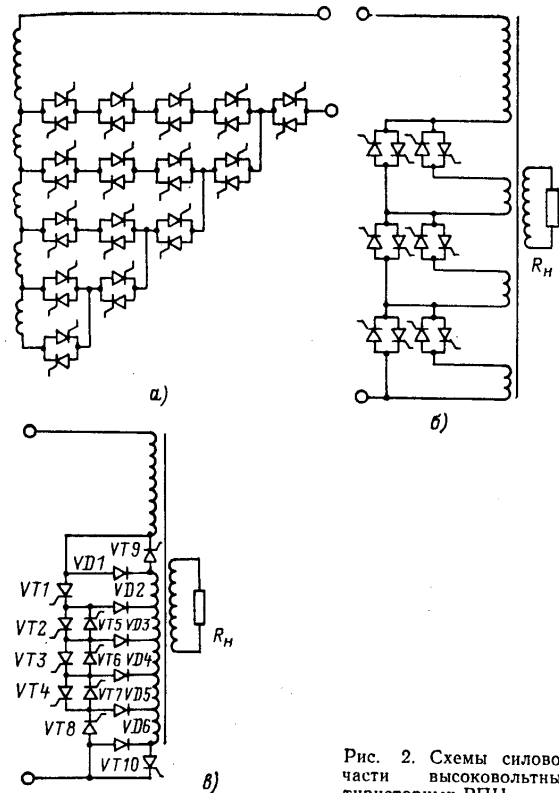


Рис. 2. Схемы силовой части высоковольтных тиристорных РПН.

быть найдено по формуле, кВ

$$U_{p,r} = \frac{U_{нд} S}{100} = 0,31,$$

где $U_{нд} = 35/\sqrt{3} \approx 20,6$ кВ — действующее значение номинального фазного напряжения; $\Delta S = 1,5\%$ — степень регулирования напряжения.

Класс тиристоров по повторяющемуся напряжению, В

$$U_{кл} = \sqrt{2} U_{p,r} k_3 \approx 1300.$$

Количество тиристоров в этой схеме может быть рассчитано по формуле (для трехфазного варианта)

$$N = 3 \frac{D}{\Delta S} \left(1 + \frac{U_{нд} D}{100 U_{p,r}} \right) \approx 468,$$

где $D = \pm 9\%$ (18%) — диапазон регулирования напряжения. Тогда стоимость РПН, тыс. руб.

$$C_{РПН} = c_i N = 3 \frac{D}{\Delta S} [c_0 + \alpha (U_{p,r} k_3 - U_0)] \left(1 + \frac{U_{нд} D}{100 U_{p,r}} \right) \approx 70 \times 468 \approx 33.$$

Практическая реализация РПН с такой высокой стоимостью вряд ли целесообразна.

Пример 2. Для РПН, выполненного по схеме рис. 2,б, аналогично имеем: $U_{p,r} = 0,31$ кВ; $U_{кл} = 1300$ В.

Количество тиристоров

$$N = 12D/\Delta S = 144,$$

а стоимость, руб.

$$C_{РПН} = c_i N \approx 70 \times 144 \approx 10\,000.$$

Сравним полученные значения с аналогичными параметрами плавнорегулируемого РПН, работающего на принципе изменения один раз в полупериод момента переключения с нижнего ответвления на верхнее. Такие устройства РПН нашли применение в основном для регулирования напряжения в технологических установках промышленных предприятий, где использование дискретных РПН не всегда позволяет получить столь же высокий эффект. Однако в ВИЭСХ выполнен цикл НИР и ОКР, в котором обосновывается целесообразность применения плавнорегулируемых РПН в сельских распределительных сетях, причем преимущество таких РПН усматривается [Л. 2] в их более низкой стоимости по сравнению с дискретным РПН. В связи с этим представляет интерес сравнение этих вариантов тиристорных РПН по предложенной методике.

В реальном устройстве РПН с плавным регулированием, разработанном ВИЭСХ (10 кВ, 1000 кВ·А [Л. 2]), применены тиристоры типа ТД500 16—18 классов по 14 штук на фазу. При этом стоимость силовой части этого РПН равна, тыс. руб.: $C_{РПН-10} = c_i N \approx 90 \times 3 \times 14 \approx 3,8$.

Однако при переходе на напряжение 35 кВ стоимость РПН возрастет за счет увеличения числа последовательно соединенных тиристоров как минимум в 3,5 раза и составит, тыс. руб.: $C_{РПН-35} \approx 3,5 C_{РПН-10} = 13,3$.

Таким образом, при напряжении 35 кВ дискретный РПН, выполненный по схеме рис. 2,б, является более эффективным вариантом, чем плавнорегулируемый.

Следует отметить, что при сравнении дискретного РПН с плавнорегулируемым необходимо учитывать ущерб, причиняемый несинусоидальностью в сети при плавном регулировании. Расчеты на ЭВМ, выполненные в Харьковском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (ХИМЭСХ), показали, что использование плавного регулирования напряжения на стороне 35 кВ силового трансформатора мощностью 6300 кВ·А приводит к возникновению на-

роднохозяйственного ущерба, соизмеримого со стоимостью самого тиристорного РПН.

Пример 3. Несмотря на преимущества дискретного РПН, выполненного по схеме рис. 2,б, его стоимость существенно превышает стоимость механического РПН той же мощности (около 7,0 тыс. руб.). В связи с этим в ХИМЭСХ разработаны новые схемы силовой части РПН, одна из которых изображена на рис. 2,в. Схема работает следующим образом. На первой ступени все тиристоры, кроме $VT9$ и $VT10$, заперты. На второй ступени дополнительно отпираются тиристоры $VT1$ и $VT8$; на третьей — $VT9$, $VT10$, $VT1$, $VT8$ и $VT2$, $VT7$; на четвертой — дополнительно отпираются тиристоры $VT3$ и $VT6$ и т. д. На последней ступени открыты все тиристры. Наличие диодов $VD1$ и $VD6$ препятствует возникновению аварийных режимов даже при пробое тиристоров или сбоях в системе управления. Эта схема характеризуется следующими параметрами: $U_{p,r} = 0,31$ кВ; $U_{кл} = 1300$ В; $N = 6 D/\Delta S + 2 \approx 74$.

Стоимость этого варианта РПН, тыс. руб.

$$C_{РПН} = C_T + C_D = c_{iT} N + c_{iD} n \approx 6,$$

где c_{iD} — стоимость одного диода; n — количество диодов.

Таким образом, путем совершенствования схем силовой части тиристорных РПН возможно резкое уменьшение их стоимости и создание достаточно конкурентоспособных конструкций.

Выводы

1. В связи с большим разнообразием схемных построений тиристорных РПН приобретает актуальность задача оценки их эффективности для выбора наиболее целесообразного варианта.

2. Известные методы оценки эффективности тиристорных РПН не позволяют получить во всех случаях достаточно обоснованные выводы и имеют ограниченное применение.

3. Для оценки эффективности высоковольтных РПН предлагается метод, основанный на приближенных расчетах полной стоимости силовой части тиристорного РПН, учитывающий количество тиристоров, их тип и режимы работы в конкретных схемах.

Список литературы

1. Савченко П. И., Гуревич В. И. Применение тиристоров для коммутации ответвлений силовых трансформаторов. — Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. М.: Информэлектро, 1979, вып. 2, с. 22—25.
2. Быковский В. И., Рослов Д. А., Цагарейшвили С. А. Система бесконтактного регулирования напряжения трансформаторов 35/10 кВ для сельского хозяйства. — Тр. ВИЭСХ, 1978, т. 45, с. 77—85.
3. Гуревич В. И., Савченко П. И., Балахонов А. М. Управление тиристорами переключателя ответвлений силового трансформатора. — Электротехника, 1980, № 7, с. 28—31.
4. 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. Киев: Наукова думка, 1972, вып. 1, с. 225—237.
5. Гуревич В. И. Перспективы применения тиристорных устройств РПН в сельских электрических сетях. — Электротехника, 1980, № 9, с. 52—54.
6. А. с. 570035 (СССР). Регулятор напряжения переменного тока / М. В. Гельман, С. П. Лохов, А. И. Уткин, Я. Л. Фишлер. Оpubл. в Б. И., 1977, № 31.
7. Чумаков Н. М. Общие вопросы оптимизации автоматических систем летательных аппаратов. — Тр. НТК КВИАВУ, 1968, с. 12—18.
8. Чумаков Н. М., Серебряный Е. И. Оценка эффективности сложных технических устройств. М.: Сов. радио, 1980, 192 с.
9. Фридман Г. Б., Саньков С. А., Шакиров В. А. Оценка оптимальной токовой загрузки силовых полупроводниковых приборов. В кн.: — Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. М.: Информэлектро, 1980, № 6, с. 14—15.

Поступила 23.06.81