

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА СССР
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКОВ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКОВ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

МОСКВА

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

УДК 621.316.176.016.25.075.125.001.24

Управление статическим тиристорным компенсатором для линий электропередач

ЧУПРИКОВ В. С., канд. техн. наук

Введение. Широкое внедрение статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности (СТК) в энергосистемах позволяет повысить устойчивость и пропускную способность ЛЭП, стабилизировать напряжение на шинах подстанции, ограничить уровень внутренних перенапряжений и уменьшить потери электроэнергии в ЛЭП. За счет своей высокой эффективности и надежности, а также простоты обслуживания СТК за рубежом практически вытеснили в новых проектах такое традиционное средство компенсации реактивной мощности как синхронный компенсатор. По данным фирмы АСЕА (Швеция) сроки окупаемости СТК составляют 1—3 года, при этом увеличение пропускной способности передачи достигает 1—2 МВт на 1 Мвар установленной мощности СТК [1].

Отличительной особенностью применения СТК на ЛЭП сверхвысокого напряжения является необходимость его подключения непосредственно к линии с целью выполнения функций шунтирующего реактора (ШР) — снижения перенапряжений, причем не только коммутационных, что рассмотрено в [2], но и при включении холостой линии, а также компенсации тока подпитки дуги в паузу ОАПВ [3].

Проведенные на математической модели линии переменного тока и вставки постоянного тока исследования показали высокую эффективность СТК

при одно- и трехфазных к. з. на линии переменного тока и при внезапных отключениях инвертора [4]. Там же обосновывается выбор схемы СТК в виде тиристорно-реакторной группы (ТРГ) — регулируемых с помощью тиристорных реакторов, как обладающей наилучшими характеристиками по скорости и гибкости управления и возможности практического изготовления аппаратов большой мощности.

Аналогичный вывод сделан в [3] на основании сравнения характеристик различных схем СТК.

В данной статье приводятся результаты исследований быстродействия СТК и его работы в режиме ограничения внутренних перенапряжений на трехфазной физической модели ВЭИ им. В. И. Ленина*.

Физическая модель. Однолинейная схема модели приведена на рис. 1. Она состоит из вставки постоянного тока (ВПТ), одноцепной линии переменного тока напряжением 500 кВ длиной 800 км и СТК. Сопротивления короткого замыкания передающей и приемной энергосистем моделируются буферными реакторами $BR1$ и $BR2$, величины напряжений на передающем и приемном концах задаются автотрансформаторами $AT1$ и $AT2$. К концу линии на стороне инвертора подключены ШР и СТК, состоящие из одинаковых ТРГ.

* Автор выражает благодарность Н. С. Лазареву и И. И. Школьной за обеспечение работы силовой части модели.

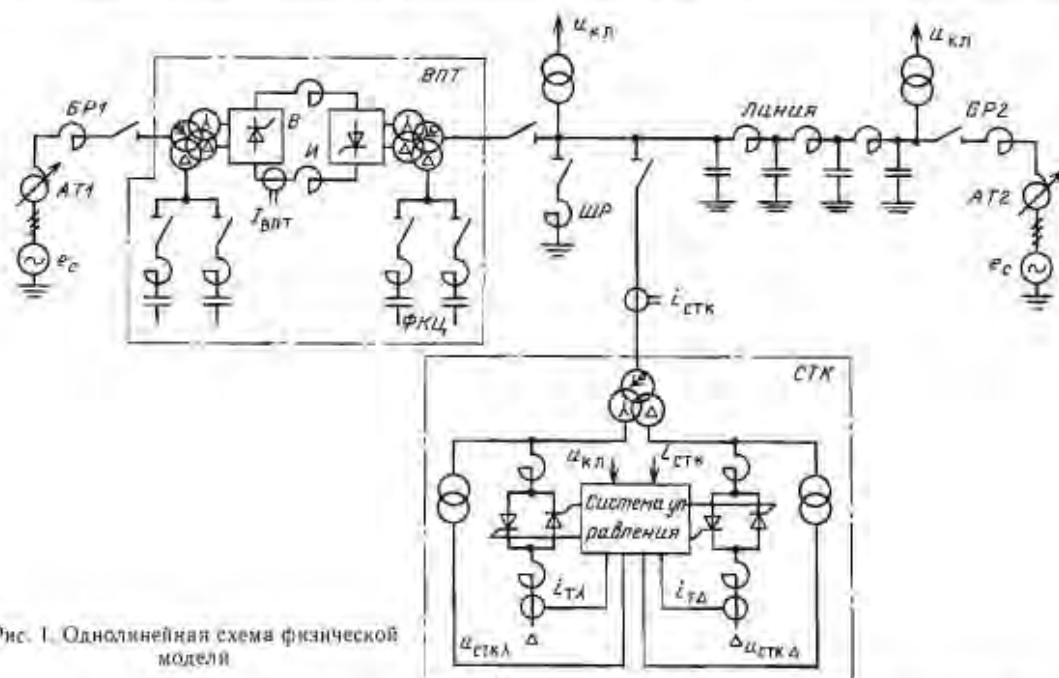


Рис. 1. Однолинейная схема физической модели

включенных по двенадцатипульсовой схеме. Линия замещается тремя П-образными ячейками, моделирующими индуктивности фаз линии и земли, емкости фаз на землю и междуфазные емкости, равные соответственно 14,5 мГн, 6,7 мГн, 53,4 мкФ и 6,5 мкФ; масштаб по напряжению — 2272, масштаб по сопротивлению 17. Номинальное напряжение модели 220 В, номинальный ток 5 А. Поток активной мощности по линии задается режимом ВПТ.

Отношение мощности к. з. (в конце линии) $S_{к.з.л.}$, определяемой как U^2/X_{Σ} (где X_{Σ} — суммарное индуктивное сопротивление автотрансформатора, буферного реактора и линии на частоте сети), к номинальной мощности ВПТ, отражающее уровень возмущений, вызываемых в линии резким изменением режима ВПТ или аварийной коммутацией, мало и составляет 1,64. Мощности элементов модели, выраженные через мощность $S_{к.з.л.}$ в относительных единицах, равны:

- мощность ВПТ — $P_{ВПТ} = 0,61$ о. е.;
- мощность ФКЦ — $Q_{Ф} = 0,37$ о. е.;
- мощность СТК — $Q_{СТК} = 0,37$ о. е.;
- мощность ШР — $Q_{ШР} = 0,15$ о. е.

Система управления СТК. Управление работой СТК на модели осуществлялось специально разработанным аппаратным вариантом системы управления, структурная схема которого приведена на рис. 2. Она состоит из автоматического регулятора напряжения (АРН) и устройства фазоимпульсного управления (УФИУ). Датчики входных сигналов системы управления приведены на схеме модели (рис. 1).

АРН имеет замкнутый астатический контур

регулирования напряжения линии $U_{кл}$ в точке подключения СТК, т. е. в пределах своего регулировочного диапазона СТК поддерживает это напряжение равным напряжению уставки. Датчик напряжения (ДН) — двенадцатипульсный измеритель среднего значения напряжения линии; его выходной сигнал подается на инерционное звено первого порядка с постоянной времени τ_n , которое обеспечивает снижение уровня пульсаций средневыпрямленного напряжения линии $U_{св}$. Напряжение разбаланса $\Delta U = U_{св} - U_{уст}$ поступает на вход интегратора с постоянной времени τ_i , выходное напряжение которого U_i направляется в УФИУ. Для обеспечения возможности введения статизма регулировочной характеристики СТК регулятор дополнен замкнутым контуром по реактивному току СТК — датчик реактивного тока ДРТ формирует сигнал U_r , пропорциональный среднему реактивному току трёх фаз СТК, который проходит через инерционное звено с постоянной времени τ_r и коэффициентом усиления K_r и в виде напряжения U_r' поступает на сумматор. Параметры схемы выбраны таким образом, что при номинальном напряжении $U_{кл}$ и номинальном токе СТК значения напряжений $U_{св}$ и U_r равны, поэтому статизм регулировочной характеристики СТК равен величине коэффициента K_r . Подобная схема регулятора рассмотрена в [5] и нашла широкое применение в СТК для эсэнергии.

Устройство фазоимпульсного управления предназначено для динамического регулировочной характеристики ТРГ в формировании импульсов управления ТРГ с углами α , соответствующими текущему значению напряжения $U_{св}$. Работа УФИУ поясняется временными диаграммами

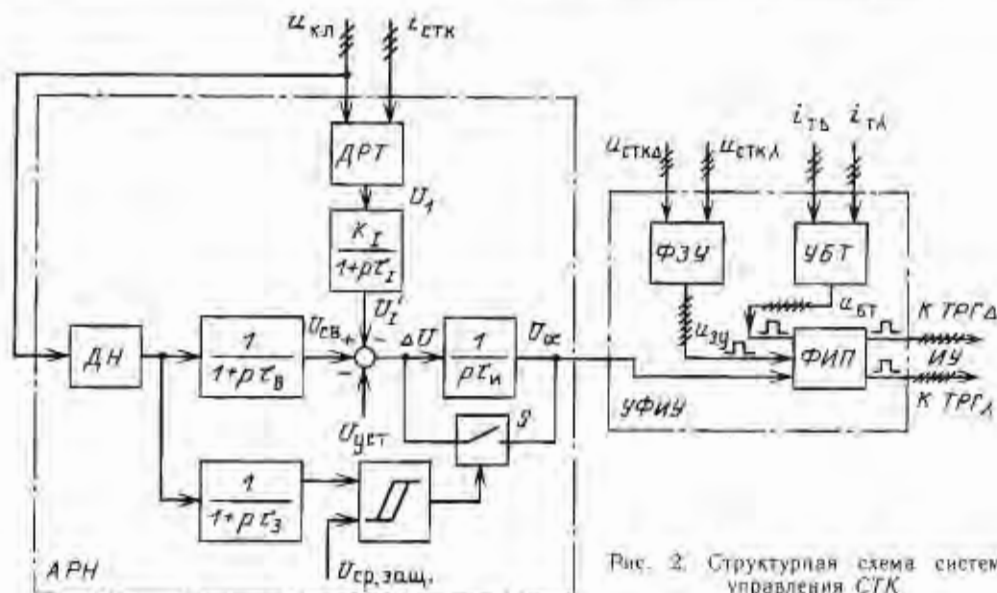


Рис. 2. Структурная схема системы управления СТК

(рис. 3). Формирователь зон управления (ФЗУ) для каждой ветви ТРГ в каждый период частоты сети по синхронизирующему напряжению $u_{стк}$ формирует два сигнала зоны управления $u_{3,y}$ — для положительной и отрицательной полярности тиристорного вентиля. Ширина зоны — 90° ; она соответствует допустимой зоне изменения углов управления ТРГ.

Фазо-импульсный преобразователь (ФИП) по сигналам $u_{3,y}$ формирует опорное напряжение $u_{оп}$, форма которого обеспечивает линеаризацию нелинейной зависимости тока ТРГ от угла управления. В момент равенства мгновенных значений U_α и $u_{оп}$ ФИП выдает импульс управления (ИУ) соответствующей фазы ТРГ.

Зависимость действующего значения тока первой гармоники ТРГ от угла управления α выражается следующим соотношением:

$$I_1(\alpha) = \frac{I_{ном}}{\pi} (\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha), \quad (1)$$

где α изменяется от 0 до 90° ; $I_{ном}$ — номинальный ток ТРГ, т. е. ток при $\alpha = 0$.

Требуемая характеристика зависимости тока ТРГ от напряжения управления U_α имеет вид:

$$\frac{I_1(U_\alpha)}{I_{ном}} = 1 - \frac{U_\alpha}{U_{зам}}, \quad (2)$$

где $U_{зам}$ — максимальное значение напряжения U_α , соответствующее полному запирающему тиристорам.

Из выражений (1) и (2) определяем требуемую форму опорного напряжения:

$$u_{оп}(\varphi) = \frac{U_{зам}}{\pi} (2\varphi + \sin 2\varphi), \quad (3)$$

где $\varphi = \omega t$ — текущее значение угла, отсчитываемое от момента, соответствующего началу зоны управления.

Необходимо отметить, что продолжительность зоны управления ограничивается моментом, в который мгновенное напряжение на фазе ТРГ снижается до минимального допустимого напряжения включения тиристоров $U_{мин доп}$ (рис. 3). Обычно продолжительность зоны составляет $75-80^\circ$, минимальное значение тока ТРГ при этом составляет менее $1,5\%$ номинального значения.

В стационарных режимах передачи, с целью снижения уровня высших гармонических, генерируемых СТК, целесообразно ввести принудительное симметрирование импульсов с помощью автоматического симметрирующего устройства. При максимальной несимметрии импульсов управления

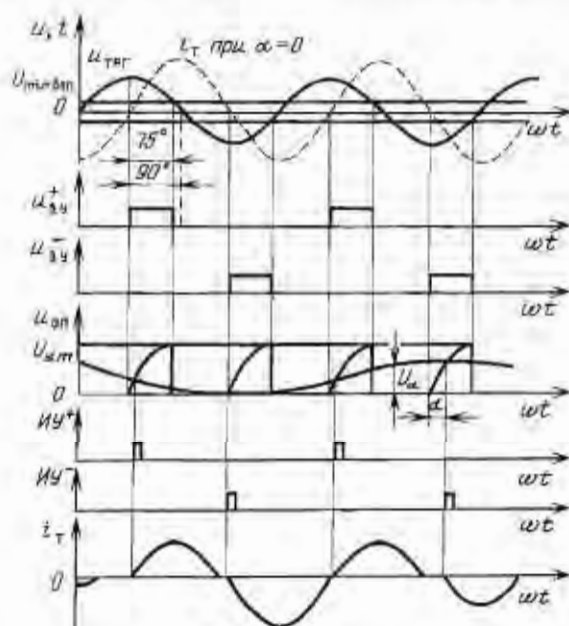


Рис. 3. Временные диаграммы работы УФНУ

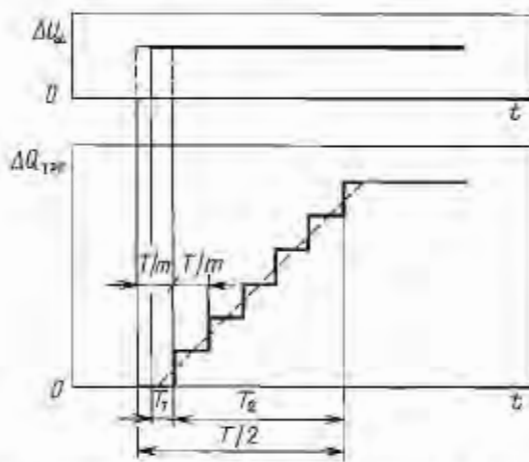


Рис. 4. Реакция m -пульсной ТРГ на ступенчатое изменение напряжения U_{α}

$\pm 0,5^\circ$ уровень высших гармоник в токе двенадцатипульсного СТК не превышает 1,5 % номинального тока без применения специальных фильтров.

Рассмотренное УФИУ имеет следующие особенности:

1. Каналы формирования углов управления различных фаз ТРГ независимы, что позволяет в случае необходимости перейти к пофазному управлению СТК.

2. Отсчет углов управления α ведется не от момента перехода через нуль напряжения на ТРГ (или ортогонального к нему), как это обычно делается, а от некоего момента, соответствующего переходу через нуль тока реактора, если на него подать это напряжение (на рис. 3 этот ток показан пунктиром). При чисто синусоидальной форме напряжения сети и отсутствии несимметрии между фазами этот способ ничем не лучше традиционных. Его преимущество проявляется в переходных режимах, когда нарушаются симметрия и форма напряжений и понятие фазы (угла) вообще теряет первоначальный смысл. В этих случаях рассматриваемое УФИУ при переходе в режим $\alpha=0$ (при $U_{\alpha}=0$) обеспечивает полное открытие тиристоров, т. е. непрерывный ток в фазах ТРГ без постоянной составляющей.

3. Формирование очередной зоны управления производится по сигналу напряжения фазы ТРГ только текущего периода, т. е. практически безынерционно. Это особенно важно в режимах, связанных с временным отсутствием синхронизирующего напряжения, — при к. з. на линии и при ее первом включении.

Ниже приводятся результаты исследования СТК и его системы управления на модели.

Режим регулирования напряжения. Передаточная характеристика регулятора $W_p(p)$ при разомкнутом контуре регулирования и отсутствии статизма ($K_f=0$) согласно рис. 2 имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{1}{p\tau_r(1+p\tau_r)} \quad (5)$$

Параметры регулятора для приведенного соотношения величин $S_{к.з.}$ и $Q_{СТК}$ рассчитаны таким образом, что статические коэффициенты передачи всех звеньев, включая ТРГ, учтены в постоянную времени интегратора τ_r . Это означает, что время отработки регулятором скачка напряжения при $\tau_r=0$ равно τ_r .

Однако кроме регулятора определенную задержку вносит ТРГ за счет дискретности моментов включения тиристоров. Для оценки инерционности ТРГ рассмотрим приведенную на рис. 4 временную зависимость приращения суммарной мощности m -пульсного СТК ($m=6$ для трехфазной ТРГ и $m=12$ для двух одинаковых ТРГ, подключенных к обмоткам «звезда» и «треугольник» трансформатора СТК) при ступенчатом изменении напряжения U_{α} . Очевидно, что время задержки T_d включения первой фазы ТРГ с новым значением угла управления может иметь любое значение в диапазоне от 0 до T/m , где T — период частоты сети. Каждая следующая фаза ТРГ включается с задержкой, равной T/m . Таким образом, задержку, вносимую ТРГ, можно выразить функцией вида

$$W_T(p) = \frac{2}{m} e^{-T_d p} \sum_{k=0}^{m-1} e^{-\frac{kT}{m} p} \quad (6)$$

где $0 \leq T_d \leq T/m$.

Более удобна для расчетов упрощенная функция

$$W_T(p) = \frac{1}{1+p\tau_r} \quad (7)$$

где $\tau_r = T_{1cp} + \frac{T_d}{2} = \frac{T}{4}$.

Здесь ТРГ замещается инерционным звеном первого порядка с постоянной времени τ_r , равной 5 мс.

С учетом (7) передаточная функция разомкнутого контура регулирования принимает вид:

$$W_p(p) = \frac{1}{p\tau_r(1+p\tau_r)(1+p\tau_r)} \quad (8)$$

откуда передаточная функция замкнутого контура

$$W_s(p) = \frac{W_p(p)}{1+W_p(p)} = \frac{1}{1+p\tau_r(1+p\tau_r)(1+p\tau_r)} \quad (9)$$

Для оценки быстродействия регулятора в линейной зоне регулирования на модели были проведены опыты со ступенчатым изменением контролируемого параметра — напряжения на линии — путем отключения части фильтров ВПТ мощностью 0,12 о. е. Осциллограммы процессов приведены на рис. 5, причем рис. 5, а соответствует опыту при отключенной ВПТ ($I_{ВПТ}=0$), в остальных опытах $I_{ВПТ}=0,8$ о. е. Результаты опытов приведены ниже, где T_d — время запаздывания (реакции), T_y — время установления, K_n — коэффициент перерегулирования (определение этих параметров поясняется на рис. 6):

Рис. 5. Фильтр в кон. значен. Не рис. 1, 2, 3, 4, 5, 6. Дс. позво. вост. при п. ральн. вноси. устойч. удовл. увелич. СТК.) терист

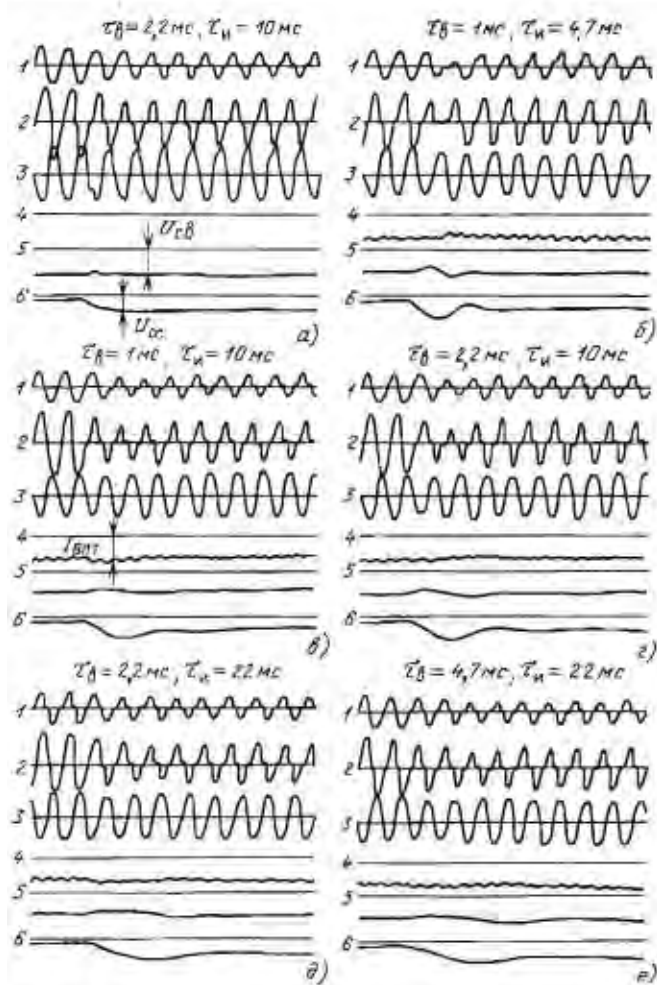


Рис. 5. Осциллограммы процессов при отключении части фильтров ВПТ: 1, 2 — токи в фазах ТРГ; 3 — напряжение в конце линии; 4 — ток ВПТ; 5 — средневыврявленное значение напряжения в конце линии; 6 — выходное напряжение регулятора

Номер рисунка	5, а	5, б	5, в	5, г	5, д	5, е
$\tau_{в}$, мс	2,2	1,0	1,0	2,2	2,2	4,7
$\tau_{н}$, мс	10	4,7	10	10	22	22
ВПТ	откл.	вкл.	вкл.	вкл.	вкл.	вкл.
T_3 , мс	14	7	12	11	24	24
T_{γ} , мс	50	72	80	110	94	130
K_n	1,1	2,5	1,5	1,8	1,3	1,5

Достигнутое быстродействие СТК (рис. 5, а) позволяет, согласно [3, 6], обеспечить устойчивость линии электропередачи длиной до 1500 км при передаче по ней мощности, близкой к натуральной. Включение ВПТ со своим регулятором вносит добавочную инерционность и ухудшает устойчивость системы в целом; для получения удовлетворительных характеристик необходимо увеличить постоянную времени τ_n регулятора СТК. При оптимальной форме переходной характеристики (рис. 5, б) $T_3=24$ мс и $T_{\gamma}=94$ мс.

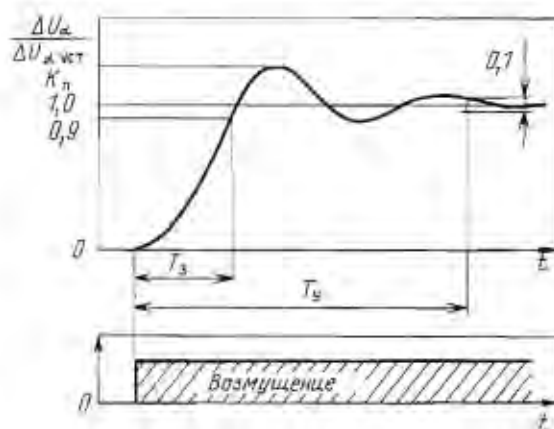


Рис. 6. Обработка СТК ступенчатого возмущения в линейной зоне регулирования

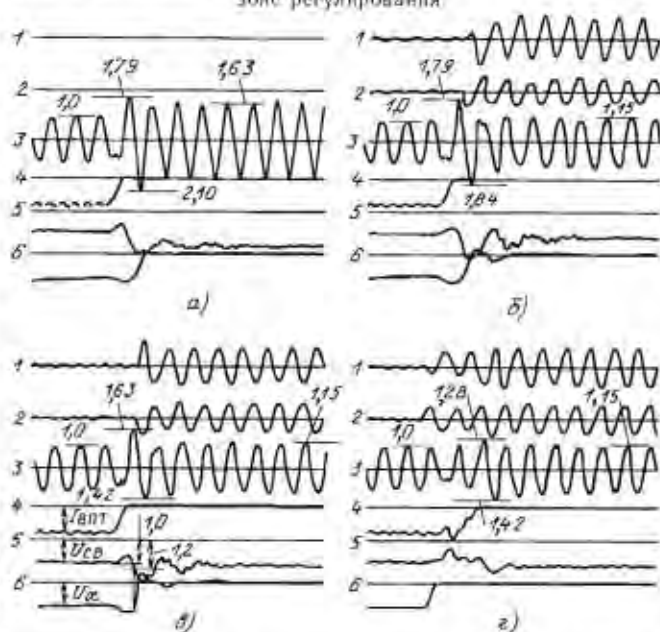


Рис. 7. Ограничение перенапряжений с помощью СТК при отключении ВПТ: 1, 2 — токи в фазах ТРГ; 3 — напряжение в конце линии; 4 — ток ВПТ; 5 — средневыврявленное значение напряжения в конце линии; 6 — выходное напряжение регулятора СТК

Режим ограничения внутренних перенапряжений. Оценка эффективности СТК как средства ограничения внутренних перенапряжений на линии проводилась в двух режимах. Первый — при отключении ВПТ путем перевода выпрямителя в инверторный режим, второй — при включении холостой линии.

На рис. 7 приведены осциллограммы процессов при отключении ВПТ. Исходный режим — включены ШР, СТК, ФКУ; $I_{ВПТ}=0,95$ о. е. Параметры регулятора СТК — $\tau_n=1$ мс, $\tau_n=15$ мс. В первом опыте (рис. 7, а) проверялась реакция энергосистемы и регулятора СТК при заблокированных импульсах управления СТК; максимальное перенапряжение составило $2,1U_{ном}$ при установив-

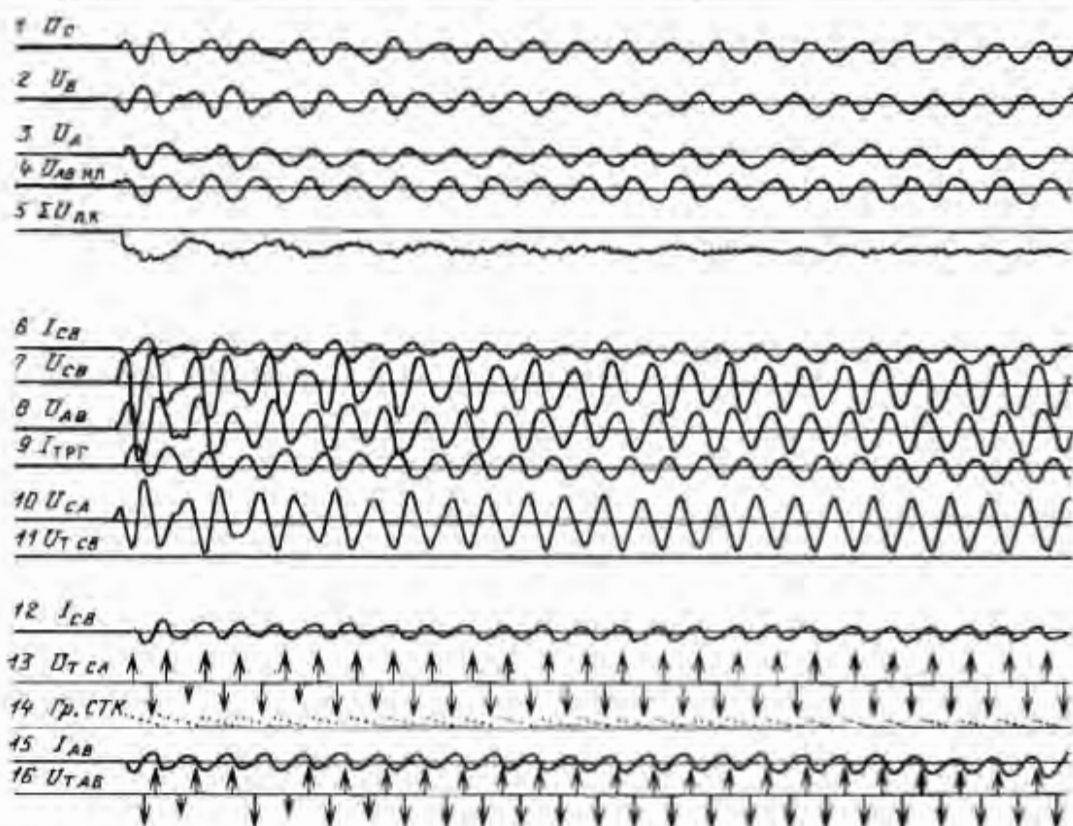


Рис. 8. Включение холостой линии с СТК: 1, 2, 3 — фазные напряжения на конце линии; 4 — линейное напряжение в начале линии; 5 — выпрямленное напряжение в конце линии; 6, 12, 15 — токи в фазах ТРГ; 7, 8, 10 — напряжения на фазах ТРГ; 9 — линейный ток ТРГ; 11, 13, 16 — напряжения на тиристорах; 14 — импульсы управления тиристоров

шемся значении 1,63. Во втором опыте (рис. 7, б) импульсы были деблокированы; регулятор СТК обеспечил снижение второго максимума до 1,84 при установившемся значении 1,15; время задержки перехода СТК в режим непрерывного тока по всем фазам составило примерно 10 мс. С целью повышения быстродействия СТК при перенапряжениях в регулятор была введена схема защиты от перенапряжений (рис. 2), состоящая из инерционного звена первого порядка с постоянной времени τ_2 , компаратора с регулируемым порогом срабатывания и управляемого ключа S . При превышении напряжением на линии порогового значения регулятора U_2 скачком снижается до нуля, обеспечивая тем самым перевод СТК в режим непрерывного тока. При снижении напряжения на линии ниже $U_{ср.заш}$ ключ замыкается и напряжение U_2 плавно выходит на требуемый уровень. При включении этой защиты с уровнем срабатывания $1,2U_{ном}$ и $\tau_2 = 1$ мс (рис. 7, в) СТК обеспечил снижение первого максимума до уровня 1,63 и второго — до 1,42. Еще больший эффект был получен при подаче в регулятор СТК от программного устройства, управляющего проведением опыта, упреждающего сигнала об отключении ВПТ, действующего также на замыкание ключа S и

переводящего СТК в режим непрерывного тока перед отключением ВПТ (рис. 7, г). Максимальное перенапряжение в этом случае составило 1,42.

Представляется целесообразным ввести вторую ступень защиты от перенапряжений, обеспечивающую при повышении мгновенного напряжения на ВЛ немедленное отпирание вентиля в соответствующей фазе ТРГ независимо от значения фазового угла и дальнейшую работу этой фазы ТРГ в режиме непрерывного тока.

Сравнение эффективности ограничения внутренних перенапряжений с помощью СТК и с помощью шунтирующего реактора той же мощности, подключенного к линии через искровой промежуток, по опыту электропередач 500 и 750 кВ, показывает:

а) время запаздывания включения ШР составляет 4—5 мс [6], что соответствует эквивалентной задержке включения ТРГ за счет дискретности моментов включения отдельных фаз (см. выше);

б) уровень срабатывания защиты от перенапряжений СТК может быть выбран значительно ниже уровня срабатывания искрового промежутка, составляющего $1,5U_{н.б} \pm 20\%$;

в) переход ТРГ в режим непрерывного тока и обратно в любую точку регулировочной характеристики происходит плавно и, в отличие от ком-

мутации ШР, не сопровождается высокочастотными колебаниями тока и перенапряжениями; кроме того, ресурс коммутаций ШР ограничен;

г) эффективность СТК как средства снижения коммутационных перенапряжений может быть повышена путем подачи в его регулятор упреждающих сигналов при коммутациях на линии.

Наибольший интерес представляет решение новой для СТК задачи — обеспечения снижения перенапряжений на конце холостой линии при ее включении. Сложность задачи объясняется как необходимостью включения ТРГ в первый же полупериод появления напряжения, так и требованием поддержания непрерывного тока в ТРГ при условии, что форма напряжения на конце линии в первые периоды после включения существенно отличается от синусоидальной. Для получения удовлетворительной работы СТК в этом режиме потребовалось внести ряд дополнений в рассмотренную выше систему управления (рис. 2). Во-первых, для обеспечения включения ТРГ с углами управления $\alpha = 0$ на регулятор перед включением линии подавался сигнал, замыкающий ключ S ; при достижении напряжением $U_{с.в}$ значения $U_{уст}$ ключ размыкался. Во-вторых, ФЗУ был доработан с целью формирования зон управления в первый же полупериод появляющегося напряжения. В-третьих, для предотвращения пропусков включения тиристоров при возможных забросах углов управления, обусловленных несинусоидальностью напряжения на линии, в УФИУ было добавлено устройство блокировки по току (УБТ, рис. 2). Это устройство имитирует следящую систему реального тиристорного вентиля и обеспечивает поддержку формирования очередного импульса управления до момента окончания протекания тока в данной фазе ТРГ.

Исследования проводились при отключенной ВПТ, причем СТК в виде одной ТРГ подключался непосредственно к концу линии. При включении линии с заблокированными импульсами управления напряжение на конце линии относительно напряжения в начале линии составило 1,4 в установившемся режиме при максимальном перенапряжении 2,3. При закороченных тиристорах, т. е. в режиме включения с шунтирующими реакторами (в этом режиме включение холостой линии происходило при наличии на ее конце неуправляемых реакторов ТРГ, выполняющих в данном случае функции шунтирующих реакторов), максимальное перенапряжение составило 1,5 при установившемся значении 0,85 (мощность реакторов превышает зарядную мощность линии). При

работе СТК в режиме первого включения линии (рис. 8) величина перенапряжения составила также 1,5, установившееся значение равнялось 1,0 в соответствии с уставкой регулятора напряжения. Таким образом, показано, что при соответствующем управлении СТК может выполнять функции шунтирующего реактора с той же эффективностью. В целях повышения надежности работы реального СТК при первом включении линии целесообразно на этот период перевести все тиристорные вентили в так называемый диодный режим, при котором непрерывный ток в фазе ТРГ обеспечивается включением вентиля в каждый полупериод частоты сети по сигналу следящей системы, свидетельствующему о появлении напряжения на вентиле.

Выводы. 1. Разработана система фазоимпульсного управления СТК, обеспечивающая его эффективную работу в переходных режимах линии.

2. Время запаздывания (реакции) СТК при малых возмущениях может быть снижено до 15–20 мс, при больших возмущениях это время не превышает 10 мс.

3. С точки зрения снижения перенапряжений, в том числе при включении холостой линии, СТК дает тот же эффект, что и шунтирующий реактор, однако по сравнению с ШР с искровым присоединением СТК обладает рядом преимуществ, связанных с более низким уровнем срабатывания, неограниченным числом переходов из режима регулирования напряжения в режим полного тока и обратно и плавностью этих переходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aberg L. Static VAR compensation replaces 20 nuclear stations. — Modern Power System, 1986, vol. 6, № 7.
2. Hauth R. L., Miske S. A., Nozari F. The role and benefits of static var systems in high voltage power systems applications. — IEEE Trans. PAS, 1982, vol. PAS-101, № 10.
3. Статические тиристорные компенсаторы для энергосистем и сетей электроснабжения / И. М. Бортник, С. Ф. Буряк, М. В. Ольшванг, И. П. Таратута. — Электричество, 1985, № 2.
4. Takenaka K., Yoshida Y. Improvement in the operating characteristics of HVDC transmission system by a static reactive power compensator. — Intern. Power Electronics Conference, Tokyo, March 27–31, 1983, vol. 2.
5. Engberg K., Ivner S. Static var systems for voltage control during steady-state and transient conditions. — EPRI/HYDRO-QUEBEC Symposium on Controlled Reactive Compensation, Varennes, Quebec, Canada, Sept. 1979.
6. Крюков А. А., Либкина М. С., Сорокин В. М. Управление поперечная компенсация электропередачи переменного тока. — М.: Энергоиздат, 1981.