

# Тиристорные коммутаторы КАТКА и основные проблемы их применения в системах компенсации

Milan BLEHA, KMB systems, s.r.o.

Фирма KMB systems, s.r.o., традиционный производитель регуляторов реактивной мощности, в прошлом году представила на рынок тиристорные коммутирующие модули КАТКА для быстрых систем компенсации. В статье рассматриваются с одной стороны, собственно сами модули, с другой стороны, приводится перечень основных проблем, возникших при их вводе в эксплуатацию. Пользователи, планирующие внедрение быстрых систем компенсации, могут найти здесь введение в проблематику вопроса, и ряд полезных советов, как избежать первых ошибок.

## Тиристорные коммутаторы КАТКА

Проектирование тиристорных коммутаторов было последовательным логическим шагом в процессе расширения ассортимента компонентов для компенсации. Целью было спроектировать простой и надежный коммутатор небольших размеров. Это удалось, в частности, благодаря применению новых типов тиристоров фирмы SEMIKRON в корпусе SEMITOP и низкопрофильного радиатора.



Рис. 1: Коммутаторы Katka-20, Katka-80

Были разработаны два модуля, которые отличаются максимальным рабочим током: КАТКА-20 и КАТКА-80. Оба модуля поставляются в двухфазном (тип „D“) или трехфазном (тип „Т“) исполнении.

Само собой разумеется, что модуль оснащен защитой от перенапряжения, и тепловой защитой, которая отключит его при превышении температурой радиатора

граничного значения.

Основные технические данные приведены в табл.1, более подробные можно найти на сайте [www.kmb.cz](http://www.kmb.cz).

## Основные проблемы при применении тиристорных коммутаторов в системах компенсации

### Соблюдение технических параметров коммутаторов

Надежность тиристоров зависит главным образом от соблюдения их предельных технических характеристик. В отличие от контактных аппаратов, и небольшое превышение предельного блокирующего напряжения, тока, или предельной скорости нарастания тока ( $di/dt$ ), может означать для тиристора его немедленное повреждение. Вдвойне важно это оказывается для систем компенсации, где коммутируемой нагрузкой является конденсатор. На рис.2 видно, что незначительные отклонения от синусоидальной формы напряжения могут вызвать многократное превышение допустимых параметров.

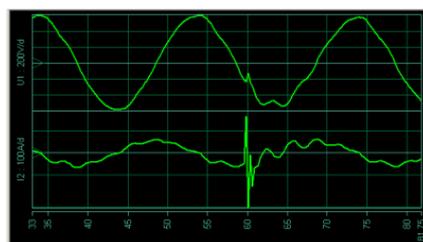


Рис. 2: Влияние искажений напряжения на форму тока через незащищенный конденсатор

В данном случае коммутатор КАТКА-80 включал незащищенную конденсаторную ступень мощностью 45kvar. Ступень состояла из трех однофазных конденсаторов по 15kvar, так что при нормальных условиях ток через тиристор (точнее – встречно-параллельную пару тиристоров) был равен

примерно 38А. Случайное искажение формы напряжения вызвало при этом импульс тока с амплитудой более 250А, - в этом случае тиристор выдержал, что является скорее исключением. Таким образом, системы компенсации с тиристорной коммутацией должны, как правило, иметь защищенное исполнение, когда конденсаторы включаются последовательно с защитными дросселями, ограничивающими амплитуду тока и параметр  $di/dt$  до допустимых уровней. Незащищенные системы не рекомендуется применять и в условиях, когда гармонические искажения напряжения невелики – никогда нельзя гарантированно исключить возникновение отдельных искажений и отклонений напряжения, которые могут стать для тиристоров решающими.

### Разряд отключенных конденсаторов

Защитный дроссель образует с конденсатором резонансный контур, настроенный, как правило, на частоту между 3. и 5 гармоникой (обычно 189Гц). На форму тока через конденсатор в такой схеме оказывает влияние и собственный резонанс последовательного контура, что проявляется особенно при включении конденсатора (рис.3).

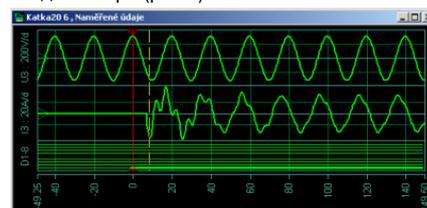


Рис. 3: Включение защищенного конденсатора

Ток через конденсатор не чисто синусоидальный, он содержит определенной величины модулирующую составляющую с частотой, равной резонансной частоте этого контура. Напряжение на конденсаторе под влиянием последовательного контура достигает больших, чем сетевое, значений. Поэтому при отключении коммутатора конденсатор может остаться заряженным на это повышенное напряжение. А поскольку тиристорные коммутаторы содержат схему, которая разрешает включение тиристора только в момент, когда напряжение на тиристоре упадет до величины, близкой к нулю, то последующая попытка включения коммутатора может оказаться unsuccessful.

Табл.1: Основные характеристики коммутаторов КАТКА

Параметр	[ ]	Katka 20-D	Katka 20-T	Katka 80-D	Katka 80-T
Номин. напряжение max.	V	440/250±10%	440/250±10%	440/250±10%	440/250±10%
Блокирующее напр. max.	V	1600	1600	1600	1600
Включаемый ток max.	A	29	22	87	67
Вспом. напряж. (вентил.)	V	-	-	230±10%	230±10%
Управл.напр. / ток – DC	V/mA	24 / 10	24 / 10	24 / 10	24 / 10
Размеры Ш x В x Г	mm	122x192x117	122x192x117	122x245x157	122x245x157
Масса	kg	2,05	2,15	3,35	3,45

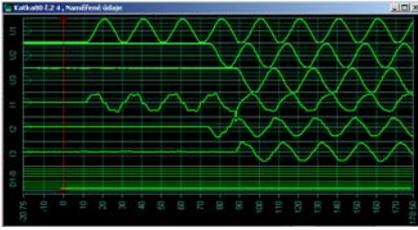


Рис.4: Включение недостаточно разряженного конденсатора

Такой случай показан на рис.4. Ключ в фазе L1 включился штатно, то есть в ближайший момент после прихода управляющего сигнала, когда сетевое напряжение достигло напряжения на конденсаторе. Ключи же в фазах L2 и L3 включились с задержкой около 4 – 5 периодов.

Подобное состояние может наступить не только вследствие резонанса, но и от простого провала сетевого напряжения в интервале времени между отключением и включением компенсирующей ступени.

Разрядные резисторы, обычно устанавливаемые на конденсаторах в соответствии с требованиями стандартов для снижения остаточного напряжения до безопасных величин, оказываются недостаточными для обеспечения необходимой скорости разряда в быстрых системах компенсации. Поэтому для устранения вышеописанного явления необходимо применять дополнительные внешние резисторы. В наших устройствах показали себя как достаточные резисторы величиной 33 kΩ / 13 W.

#### Подключение коммутатора

Самым простым способом включения тиристорного коммутатора является простая замена им контактора, когда тиристоры коммутируют отдельные фазы трехфазного конденсатора. В подобных схемах выгодно использовать коммутаторы с двумя тиристорными ключами.

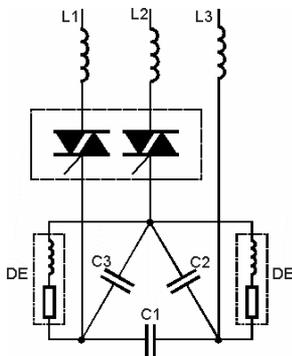


Рис.5: Компенсирующая ступень с трехфазным конденсатором

Подобная компенсирующая ступень имеет наилучшие ценовые и массогабаритные

показатели, однако при этом обладает и одной отрицательной особенностью, которую иллюстрирует рис.6. Здесь показаны кривые линейных напряжений прямо на конденсаторе при его выключении и последующем включении. Как только исчезнет управляющий сигнал от регулятора, начнется процесс выключения. Сначала закроется тиристор в той фазе, где раньше всех ток снизится под величину тока удержания – на рисунке это фаза L2. Потом перейдет границу удержания ток в фазе L1 и отключится и тиристор второго ключа – этот момент настанет, когда U1 будет максимальным.

Емкость C1 останется заряжена на пиковое значение линейного напряжения – поскольку линейное напряжение составляло около 435V, пиковое значение было  $435 \times 1,4 = 615$  V. Напряжение на оставшихся двух емкостях во время процесса выключения изменится так, что всегда на одной из них уменьшится (в нашем случае C2), а на другой возрастет (на C3). Рост напряжения на конденсаторе C3 достигает примерно 1,35 стандартного максимального значения, то есть в нашем случае более 800 V!

На показанном примере можно видеть и следствие такого «перезаряда»: поскольку коммутаторы оснащены так называемым «нулевым контуром», то при возобновлении управляющего сигнала от регулятора, коммутатор не включится. На рисунке видно, что включился только тиристор в фазе L2 – только на емкости C2 появилось полное линейное напряжение. Тиристор в фазе L1 включится только тогда, когда напряжение на «перезаряженной» емкости C3 упадет до обычного пикового значения, в нашем случае около 600 V.

Чтобы можно было коммутатор включить, необходимо сначала разрядить перезаряженный конденсатор примерно на 200V. В рассматриваемом случае был взят трехфазный конденсатор мощностью 20 kvar. Полная энергия одного из его внутренних элементов, заряженного до 800 V,

составляет примерно 43J, значит, для разряда на 200V необходимо понизить энергию на 19 J. Отсюда следует, что если необходимо коммутировать такую компенсирующую ступень с частотой хотя бы раз в секунду, необходимо подключить разрядные резисторы с рассеиваемой мощностью порядка нескольких десятков W. Чтобы эти разрядные резисторы не были перегружены во время работы конденсатора под напряжением, последовательно к ним включают дроссель – возникший таким образом разрядный контур на рис.5 обозначен DE. Максимальную нагрузку разрядных резисторов необходимо рассчитать, и должным образом настроить время блокировки повторного включения в регуляторе, чтобы резисторы не оказались перегружены слишком частыми включениями (это один из доводов, почему и регуляторы для тиристорных систем компенсации имеют это время настраиваемое). В рассматриваемой схеме были использованы два разрядных контура, каждый из которых состоял из двух последовательно включенных дросселей (от газоразрядных ламп) и резистора 330Ω / 40 W.

Следующая возможная схема включения показана на рис.7. В этой схеме вместо одного трехфазного конденсатора используются три однофазные. Такого перезаряда конденсатора на повышенное напряжение, как на рис.6, здесь не происходит, необходимо только подключить дополнительные разрядные резисторы для устранения влияния защитных дросселей и колебаний сетевого напряжения.

Схема на рис.7 имеет еще одно важное преимущество перед схемой на рис.5: при включении одинаковой компенсирующей мощности, ток через тиристор меньше в 1,73 раза (в отличие от фазового тока на рис.5, коммутируемый ток является «линейным»).

Главным недостатком этой схемы является, безусловно, наличие трех однофазных конденсаторов и коммутаторов с тремя ключами. Однако на практике такая схема

показала себя как более выгодная, главным образом благодаря более высокой достигаемой частоте повторных включений конденсаторов (скорость регулирования), и простоте разрядных резисторов.

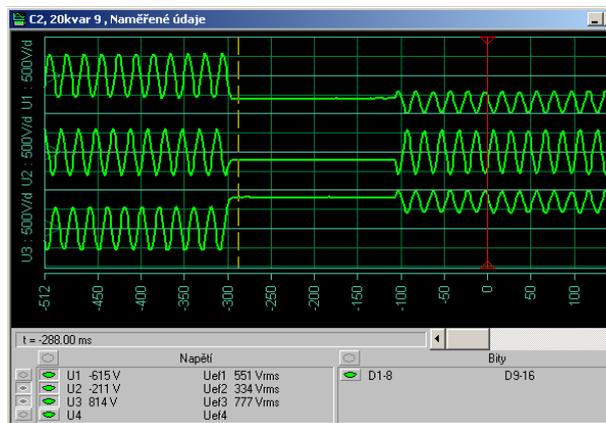


Рис. 6: Выключение компенсирующей ступени с трехфазным конденсатором

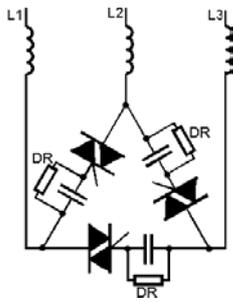


Рис.7 : Компенсирующая ступень с однофазными конденсаторами

### Заключение

Опыт внедрения первых быстрых систем компенсации показал, что проведение качественного монтажа и наладки, являющихся условием дальнейшей безаварийной работы, оказывается принципиально более сложной задачей, чем у классических (контакторных) конденсаторных установок. Наряду с качественным проектом, необходимо проконтролировать правильность функционирования устройства. Требуется

снятие осциллограмм токов и напряжений, в частности при включении и выключении коммутаторов, что предполагает наличие соответствующей измерительной техники и знание основных теоретических соотношений в электротехнике.