Окончание. Начало в № 5'2000

Современные силовые запираемые тиристоры

Фирма «КТЦ-МК»

info@cec-mc.ru

Тиристоры GCT

В середине 90-х годов фирмами ABB и Mitsubishi был разработан новый вид тиристоров Gate Commutated Thyristor (GCT). Собственно, GCT является дальнейшим усовершенствованием GTO или его модернизацией. Однако принципиально новая конструкция управляющего электрода, а также заметно отличающиеся процессы, происходящие при выключении прибора, делают целесообразным его рассмотрение.

GCT разрабатывался как прибор, лишенный недостатков, характерных для GTO, поэтому сначала необходимо остановиться на проблемах, возникающих при работе последних.

Основной их недостаток заключается в больших потерях энергии в защитных цепях прибора при его коммутации. Повышение частоты увеличивает потери, поэтому на практике тиристоры GTO коммутируются с частотой не более 250–300 Гц. Основные потери возникают в резисторе $\mathbf{R_B}$ в момент разряда конденсатора $\mathbf{C_B}$ (рис. 3) при выключении тиристора **T**.

Конденсатор $\mathbf{C_B}$ предназначен для ограничения скорости нарастания прямого напряжения **du/dt** при выключении прибора. Сделав тиристор нечувствительным к скорости **du/dt**, производители получили бы возможность отказаться от снабберной цепи (цепи формирования траектории переключения). Именно это и было реализовано в конструкции GCT.

Особенность управления и конструкции

Основной особенностью тиристоров GCT, по сравнению с приборами GTO, является быстрое выключение, которое достигается как изменением принципа управления, так и совершенствованием конструкции прибора. Быстрое выключение реализуется превращением тиристорной структуры в транзисторную при запирании прибора, что делает прибор нечувствительным к скорости **du/dt**.

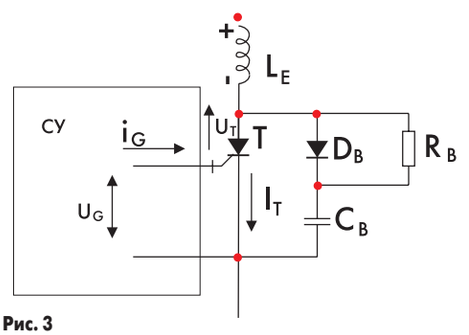


Рис. 3

GCT в фазах включения, проводящего и блокирующего состояния управляется так же, как и GTO. При выключении управление GCT имеет две особенности:

- ток управления $\mathbf{I_g}$ равен или превосходит анодный ток $\mathbf{I_a}$ (для тиристоров GTO $\mathbf{I_g}$ меньше в 3–5 раз);
- управляющий электрод обладает низкой индуктивностью, что позволяет достичь скорости нарастания тока управления $\mathbf{dI_g/dt}$, равной 3000 А/мкс и более (для тиристоров GTO значение $\mathbf{dI_g/dt}$ составляет 30–40 А/мкс).

На рис. 5 показано распределение токов в структуре тиристора GCT при выключении прибора. Как указывалось, процесс включения подобен включению тиристоров GTO. Процесс выключения отличен. После подачи отрицательного импульса управления ($\mathbf{-I_g}$), равного по амплитуде величине анодного тока ($\mathbf{I_a}$), весь прямой ток, проходящий через прибор, отклоняется в систему управления и достигает катода, минуя переход **j3** (между областями **p** и n). Переход **j3** смещается в обратном направлении, и катодный транзистор **npn** закрывается. Дальнейшее выключение GCT аналогично выключению любого биполярного транзистора, что не требует внешнего ограничения скорости нарастания прямого напряжения **du/dt** и, следовательно, допускает отсутствие снабберной цепочки.

Изменение конструкции GCT связано с тем, что динамические процессы, возникающие в приборе при выключении, протекают на один-два порядка быстрее, чем в GTO. Так, если минимальное время выключения и блокирующего состояния для GTO составляет 100 мкс, для GCT эта величина не превышает 10 мкс. Скорость нарастания тока управления при выключении GCT составляет 3000 А/мкс, GTO — не превышает 40 А/мкс.

Чтобы обеспечить высокую динамику коммутационных процессов, изменили конструкцию вывода управляющего электрода и соединение прибора с формирователем импульсов системы управления. Вывод выполнен кольцевым, опоясывающим прибор по окружности. Кольцо проходит сквозь керамический корпус тиристора и контактирует: внутри с ячейками управляющего электрода; снаружи — с пластиной, соединяющей управляющий электрод с формирователем импульсов.

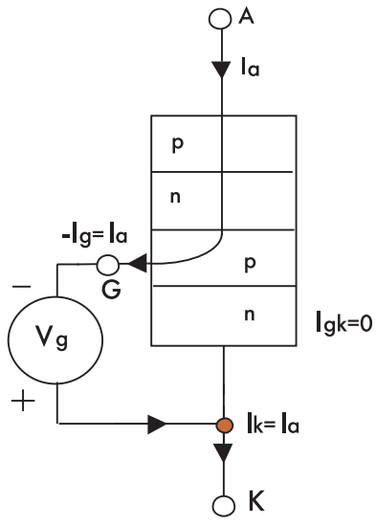


Рис.

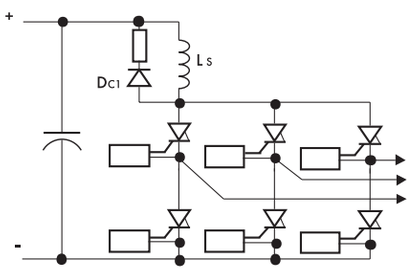


Рис.

Сейчас тиристоры GTO производят несколько крупных фирм Японии и Европы: Toshiba, Hitachi, Mitsubishi, ABB, Eupec. Параметры приборов по напряжению $\mathbf{U_{DRM}}$: 2500 В, 4500 В, 6000 В; по току $\mathbf{I_{TGQM}}$ (максимальный повторяющийся запираемый ток): 1000 А, 2000 А, 2500 А, 3000 А, 4000 А, 6000 А.

Тиристоры GCT выпускают фирмы Mitsubishi и ABB. Приборы рассчитаны на напряжение $\mathbf{U_{DRM}}$ до 4500 В и ток $\mathbf{I_{TGQM}}$ до 4000 А.

В настоящее время тиристоры GCT и GTO освоены на российском предприятии ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск). Выпускаются тиристоры серий ТЗ-243, ТЗ-253, ТЗ-273, ЗТА-173, ЗТА-193, ЗТФ-193 (подобен GCT) и др. с диаметром кремниевой пластины до 125 мм и диапазоном напряжений UDRM 1200–6000 В и токов ITGQM 630–4000 А.

Параллельно с запираемыми тиристорами и для использования в комплекте с ними в ОАО «Электровыпрямитель» разработаны и освоены в серийном производстве быстровостанавливающиеся диоды для демпфирующих (снабберных) цепей и диоды обратного тока, а также мощный импульсный транзистор для выходных каскадов драйвера управления (система управления).

Тиристоры IGCT

Благодаря концепции жесткого управления (тонкое регулирование легирующих профилей, мезатехнология, протонное и электронное облучение для создания специального распределения контролируемых рекомбинационных центров, технология так называемых прозрачных или тонких эмиттеров, применение буферного слоя в n-базовой области и др.) удалось добиться значительного улучшения характеристик GTO при выключении. Следующим крупным достижением в технологии жестко управляемых GTO (HD GTO), с точки зрения прибора, управления и применения стала идея управляемых приборов, базирующихся на новом «запираемом тиристоре с интегрированным блоком управления (драйвером)» (англ. Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT)). Благодаря технологии жесткого управления равномерное переключение увеличивает область безопасной работы IGCT до пределов, ограниченных лавинным пробоем, то есть до физических возможностей кремния. Не требуется никаких защитных цепей от превышения **du/dt**. Сочетание с улучшенными показателями потерь мощности позволило найти новые области применения в килогерцовом диапазоне. Мощность, необходимая для управления, снижена в 5 раз по сравнению со стандартными GTO, в основном за счет прозрачной конструкции анода. Новое семейство приборов IGCT с монолитными интегрированными высокомощными диодами было разработано для применения в диапазоне 0,5–6 МВ•А. При существующей технической возможности последовательного и параллельного соединения приборы IGCT позволяют наращивать уровень мощности до нескольких сотен мегавольт-ампер.

При интегрированном блоке управления катодный ток снижается до того, как анодное напряжение начинает увеличиваться. Это достигается за счет очень низкой индуктивности цепи управляющего электрода, реализуемой за счет коаксиального соединения управляющего электрода в сочетании с многослойной платой блока управления. В результате стало возможным достигнуть значения скорости выключаемого тока 4 кА/мкс. При напряжении управления $\mathbf{U_{GK}}$ = 20 В, когда катодный ток становится равным нулю, оставшийся анодный ток переходит в блок управления, который имеет в этот момент низкое сопротивление. За счет этого потребление энергии блоком управления минимизируется.

Работая при «жестком» управлении, тиристор переходит при запирании из **p-n-p-n**-состояния в **p-n-p**-режим за 1 мкс. Выключение происходит полностью в транзисторном режиме, устраняя всякую возможность возникновения триггерного эффекта.

Уменьшение толщины прибора достигается за счет использования буферного слоя на стороне анода. Буферный слой силовых полупроводников улучшает характеристики традиционных элементов за счет снижения их толщины на 30 % при том же прямом пробивном напряжении. Главное преимущество тонких элементов — улучшение технологических характеристик при низких статических и динамических потерях. Такой буферный слой в четырехслойном приборе требует устранения анодных закороток, но при этом сохраняется эффективное освобождение электронов во время выключения. В новом приборе IGCT буферный слой комбинируется с прозрачным анодным эмиттером. Прозрачный анод — это

Таблица 1. Характеристики современных мощных силовых ключей с двусторонним теплоотводом

Тип прибора	Преимущества	Недостатки	Области применения
Традиционный тиристор (SCR)	Самые низкие потери во включенном состоянии. Самая высокая перегрузочная способность. Высокая надежность. Легко соединяются параллельно и последовательно	Не способен к принудительному запиранию по управляющему электроду. Низкая рабочая частота	Привод постоянного тока; мощные источники питания; сварка; плавление и нагрев; статические компенсаторы; ключи переменного тока
GTO	Способность к управляемому запиранию. Сравнительно высокая перегрузочная способность. Возможность последовательного соединения. Рабочие частоты до 250 Гц при напряжении до 4 кВ	Высокие потери во включенном состоянии. Очень большие потери в системе управления. Сложные системы управления и подачи энергии на потенциал. Большие потери на переключение	Электропривод; статические компенсаторы; реактивные мощности; системы бесперебойного питания; индукционный нагрев
IGCT	Способность к управляемому запиранию. Перегрузочная способность та же, что и у GTO. Низкие потери во включенном состоянии на переключение. Рабочая частота — до единиц, кГц. Встроенный блок управления (драйвер). Возможность последовательного соединения	Не выявлены из-за отсутствия опыта эксплуатации	Мощные источники питания (инверторная и выпрямительная подстанции линий передач постоянного тока); электропривод (инверторы напряжения для преобразователей частоты и электроприводов различного назначения)
IGBT	Способность к управляемому запиранию. Самая высокая рабочая частота (до 10 кГц). Простая неэнергоемкая система управления. Встроенный драйвер	Очень высокие потери во включенном состоянии	Электропривод (чопперы); системы бесперебойного питания; статические компенсаторы и активные фильтры; ключевые источники питания

p-**n**-переход с управляемой током эффективностью эмиттера.

Для максимальной помехоустойчивости и компактности блок управления окружает IGCT, формируя единую конструкцию с охладителем, и содержит только ту часть схемы, которая необходима для управления непосредственно IGCT. Как следствие, уменьшено число элементов управляющего блока, снижены параметры рассеяния тепла, электрических и тепловых перегрузок. Поэтому также существенно снижена стоимость блока управления и интенсивность отказов. IGCT. Путем простого размыкания пружины, благодаря детально разработанной прижимной контактной системе, к IGCT прилагается правильно рассчитанное прижимное усилие, создающее электрический и тепловой контакты. Таким образом, достигается максимальное облегчение сборки и наибольшая надежность.

При работе IGCT без снаббера обратный диод тоже должен работать без снаббера. Эти требования выполняет высокомощный диод в прижимном корпусе с улучшенными характеристиками, произведенный с использованием процесса облучения в сочетании с классическими процессами. Возможности по обеспечению **di/dt** определяются работой диода (рис. 6).

Основной производитель IGCT — фирма ABB. Параметры тиристоров по напряжению $\mathbf{U_{DRM}}$: 4500 В, 6000 В; по току $\mathbf{I_{TGQM}}$: 3000 А, 4000 А.

Заключение

Быстрое развитие в начале 90-х годов технологии силовых транзисторов привело к появлению нового класса приборов — биполярные транзисторы с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT). Основными преимуществами IGBT являются высокие значения рабочей частоты, КПД, простота и компактность схем управления (вследствие малости тока управления).

Появление в последние годы IGBT с рабочим напряжением до 4500 В и способностью коммутировать токи до 1800 А привело к вытеснению запираемых тиристоров (GTO) в устройствах мощностью до 1 МВт и напряжением до 3,5 кВ.

Однако новые приборы IGCT, способные работать с частотами переключения от 500 Гц до 2 кГц и имеющие более высокие параметры по сравнению с IGBT-транзисторами, сочетают в себе оптимальную комбинацию доказанных технологий тиристоров с присущими им низкими потерями и бесснабберной, высокоэффективной технологией выключения путем воздействия на управляющий электрод. Прибор IGCT сегодня — идеальное решение для применения в области силовой электроники среднего и высокого напряжений.

Характеристики современных мощных силовых ключей с двусторонним теплоотводом приведены в табл. 1. ■