

Мощные тиристоры

для преобразователей линий электропередачи постоянного тока

Представлены результаты исследования современной элементной базы отечественной силовой электроники для высоковольтных тиристорных вентилях для линий электропередачи постоянного тока. Приведены характеристики мощных высоковольтных тиристоров T283–1600 нового поколения с повышенной надежностью. Выполнены исследования тиристоров в режимах их эксплуатации в составе блока вентилях модернизируемого преобразовательного комплекса ПС ± 400 кВ «Выборгская».

Антон Самойлов

nicpp@elvpr.ru

**Татьяна Сергунина
Алексей Хапугин**

khapugin@elvpr.ru

Валентин Мартыненко

martin@elvpr.ru

Алексей Гришанин

grishanin@elvpr.ru

Введение

Системы электропередачи на постоянном токе (HVDC) доказали свою эффективность и экономичность при больших расстояниях между центрами генерации и потребления электрической энергии. Они также делают возможным соединения несинхронизированных сетей переменного тока и сетей с различными частотами с реверсивными вставками постоянного тока [1]. Наиболее широкое применение для передач и вставок постоянного тока ультравысокого напряжения получили преобразователи тока с тиристорными вентилями. Важнейшими элементами в этих преобразователях являются биполярные тиристоры большой мощности, обладающие наименьшими потерями энергии, способностью выдерживать аварийные токи, подтвержденной многолетней эксплуатацией надежностью и конкурентными ценами. Они соединяются последовательно в высоковольтные сборки, применяемые в тиристорных вентилях, в состав которых входят также системы охлаждения, снабжные цепи, выравнивающие резисторы, устройства управления, диагностики и другое оборудование.

Для постоянно растущих уровней мощности HVDC мировыми лидерами в области силового приборостроения непрерывно поддерживается тренд на разработку тиристоров с более высокими напряжениями и большими диаметрами. Последними достижениями в этом направлении являются тиристоры и фототиристоры с диаметром структуры 6 дюймов и блокирующим напряжением 8,5 кВ. Отечественная промышленность имеет возможность изготовления тиристоров с диаметром кремниевой структуры 5 дюймов и блокирующим напряжением до 8,5 кВ [2, 3]. Разработка и производство тиристоров для высоковольтных преобразователей тока всегда была прерогативой ПАО «Электровыпрямитель», который изготовил и поставил на объекты электроэнергетики несколько десятков тысяч мощных тиристоров, надежно работающих и сегодня.

История Выборгского преобразовательного комплекса

Вставка постоянного тока ПС ± 400 кВ «Выборгская» обеспечивает бесперебойную связь двух независимых несинхронно работающих энергосистем России и Финляндии, с различным уровнем напряжения ± 330 и ± 400 кВ, обеспечивая стабильный переток энергии, возможность его быстрого изменения без рисков нарушения статической и динамической устойчивости энергосистем. Развитие Выборгского преобразовательного комплекса (ВПК) осуществлялось одновременно с достигнутыми возможностями производства мощных высоковольтных тиристоров. Изначально вентильные блоки были выполнены на базе тиристоров Т-630 28-го класса (1980-е годы). Каждый блок (фаза) состоял из 128 последовательно соединенных тиристорных ячейек, каждая ячейка содержала три параллельно соединенных тиристора Т-630. Общее количество тиристоров на блок достигало 384 штуки. В последующем для увеличения номинальной мощности была проведена реконструкция ВПК и тиристоры Т-630 были заменены более мощными тиристорами Т273-1250 42-го класса, а их общее количество сократилось в три раза (128 шт.). Все поставленные приборы производились на заводе «Электровыпрямитель». Опыт эксплуатации тиристоров Т273-1250 в высоковольтных тиристорных вентилях (ВТВ) ВПК, как и самой вставки, показал высокую эксплуатационную надежность ВТВ, соответствующую мировому уровню.

На сегодня отдельные ВТВ находятся в работе более 30 лет, и преобразовательное оборудование ВПК исчерпало свой ресурс. В связи с этим актуальной представляется задача реконструкции преобразовательного комплекса вставки постоянного тока, включающая разработку, изготовление и испытание блока тиристорных вентилях для ВПК на современной элементной базе, позволяющей улучшить характеристики ВПК в части показателей надежности, уменьшения потерь электроэнергии на охлаждение оборудования, периодичности и объемов технического обслуживания



Рис. 1. Высоковольтный тиристорный модуль на тиристорах T283-1600



Рис. 2. Полупроводниковый элемент и тиристор T283-1600-60

ния. При этом габаритно-присоединительные размеры ВТВ при модернизации должны быть сохранены. Предпочтительным вариантом для новых ВТВ является применение более мощных и высоковольтных тиристорных для сокращения числа последовательно соединенных приборов и комплектующих (охладители, защитные цепи, драйверы управления).

В настоящее время АО «НТЦ ФСК ЕЭС» проводится поэтапная реконструкция комплектных вентильных преобразовательных устройств (КВПУ) на ПС ± 400 кВ «Выборгская» [4]. Блок вентилей преобразовательного моста новой конструкции состоит из двух ВТВ, в состав каждого вентиля в свою очередь входят четыре высоковольтных тиристорных модуля (ВТМ), соединенных последовательно.

ВТМ представляет собой устройство (рис. 1), состоящее из последовательно соединенных двух дросселей насыщения и тиристорной сборки. В тиристорную сборку входят 12 последовательно соединенных тиристорных типа T283-1600-60 и 13 охладителей с единым прижимным устройством, блок конденсаторов, резисторы цепей деления напряжения между тиристорными ячейками, стойки с блоками управления, два коллектора с трубками для подвода (отвода) охлаждающей жидкости к охладителям и дросселям насыщения.

Тиристоры для ВТВ

Структура силовой схемы блока вентилей должна гарантировать требуемую надежность при максимальной загрузке приборов по току и напряжению. Применение тиристора T283-1600-60 нового поколения, взамен ранее использовавшихся тиристорных T273-1250-42, позволило за счет увеличения рабочего напряжения снизить в 1,5 раза количество последовательно соединенных тиристорных в вентиле. Кроме того, тиристор T283-1600-60 имеет низкие статические и динамические потери, минимальный разброс заряда обратного восстановления Q_{RR} , низкие времена выключения t_q и высокие $(dV/dt)_{crit}$, устойчив к лавинным перегрузкам и токам короткого замыкания с последующим приложением обратного и прямого напряжений. Благодаря оптимизации толщины кремниевой структуры, удельного сопротивления и топологии катода, тиристор

обладает пониженным напряжением во включенном состоянии V_T для приборов данного класса. Увеличение диаметра кристалла помогло существенно сократить тепловое сопротивление тиристора, повысить его предельный и ударный токи, а снижение потерь во включенном состоянии позволило снизить рабочие температуры кристалла со $+100$ до $+90$ °С. Все эти технические улучшения несомненно повышают эксплуатационную надежность новых тиристорных и вентиля в целом.

Тиристоры T283-1600 изготавливаются на основе нейтронно-легированного бесдислокационного кремния с диаметром полупроводникового элемента 90 мм и собраны в металлокерамические корпуса таблеточной конструкции с габаритными размерами: диаметр 120 мм, высота 35 мм (рис. 2). Использование корпусов высотой 35 мм взамен прежних 26-мм позволило увеличить изоляционный промежуток между анодом и катодом тиристора и обеспечило требуемый класс по напряжению 6000 В. Увеличение высоты корпуса тиристора также дает возможность разработчику преобразовательного оборудования более удобно размещать защитные RC-снабберы и выравнивающие резисторы.

Для повышения надежности в программу межоперационных испытаний элементов тиристорных T283-1600-60 включен дополнительный контроль на устойчивость к воздействию импульсов обратного напряжения длительностью 100 мкс с выводом ВАХ на лавину амплитудой 5–6 А. Приборы выдерживают 4 А в прямом и не менее 5 А в обратном направлении, что свидетельствует о высоком качестве тиристорных и их возможности сохранять работоспособность при кратковременных неповторяющихся импульсных перенапряжениях. Стабильность блокирующих ВАХ достигается применением многослойных пассивирующих защитных покрытий и испытаний.

Анализ требований, предъявляемых к тиристорам в составе ВТВ, показывает, что коммутируемое схемой время выключения является наиболее важным динамическим параметром. Оптимизация конструкции и технологии изготовления полупроводниковых элементов тиристора T283-1600 позволила получить требуемые значения времени выключения ($t_q \leq 400$ мкс) при более высоком классе по напряжению и одновременном снижении стати-

ческих потерь по сравнению с тиристорными T273-1250-42. Такое значение времени выключения обеспечивает стабильность и гибкость системы линий электропередачи постоянного тока.

Для надежной работы тиристорных в сборках с последовательным соединением важным является и уменьшение разброса заряда обратного восстановления Q_{RR} . Минимальные разбросы Q_{RR} для последовательных соединений тиристорных и низкие времена выключения t_q достигаются путем прецизионного регулирования времени жизни неосновных носителей заряда облучением высокоэнергетичными электронами на ускорителе «Электроника-У003», который входит в состав технологической линии производства силовых полупроводниковых приборов завода «Электровыпрямитель». Контролируемое введение радиационных дефектов позволяет гибко управлять временем жизни неосновных носителей заряда в полупроводниковых структурах приборов и, соответственно, всей системой электрических параметров. Благодаря данной технологии высоковольтные тиристоры поставляются с разбросом по заряду обратного восстановления $\pm 5\%$.

Заряд обратного восстановления определяется расчетным путем с помощью специальной программы по зависимости кривой тока обратного восстановления от времени. Далее производится подбор тиристорных в группы. При этом методика подбора ориентируется как на значение заряда, так и на вид кривой тока обратного восстановления. Эффективность методики подбора проверяется результатами контроля распределения напряжения в процессе обратного восстановления пары тиристорных, подобранных по осциллограммам токов обратного восстановления (рис. 3). Измерения выполняются с использованием RC-снаббера (номиналы $R = 20$ Ом, $C = 0,47$ мкФ).

В соответствии с режимом работы ВТВ тиристоры должны быть устойчивы к воздействию ударного тока косинусоидальной формы амплитудой 21 кА длительностью 18 мс с последующим приложением обратного и прямого напряжений. Данные испытания (100%-ная проверка) проводятся на всех тиристорных, в том числе и T283-1600-60, поставляемых для комплектации электрооборудова-

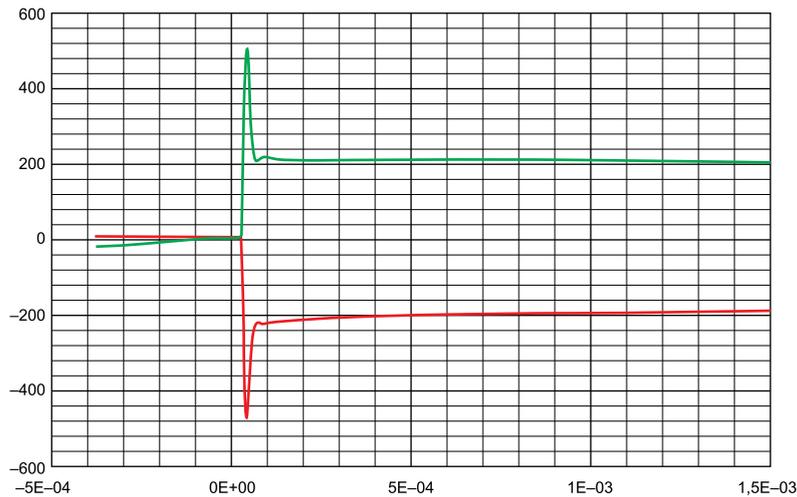


Рис. 3. Распределение напряжений в процессе обратного восстановления пары тиристоров, подобранных по осциллограммам токов обратного восстановления

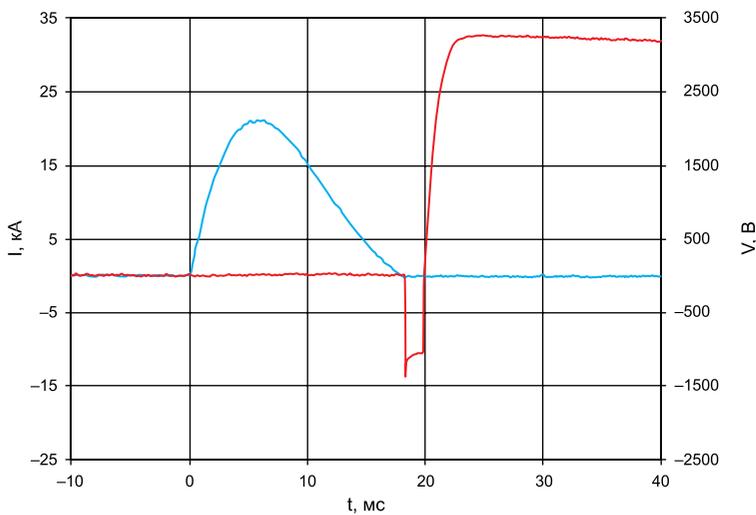


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения при испытаниях ударным током (режим ЛЭП)

ния ЛЭП. Через тиристор при максимально допустимой температуре перехода от источника однократных импульсов тока пропускают импульс тока синусоидальной формы длительностью $t_p = (18 \pm 0,2)$ мс, амплитудой $I_{TSM} = 21$ кА. После протекания импульса тока к тиристорам от источника импульсного напряжения прикладывают обратное напряжение $V_R = 1350$ В, а спустя 1,5 мс — прямое напряжение амплитудой $V_D = 3400$ В со скоростью нарастания напряжения $dv_D/dt = 0,6$ В/мкс (рис. 4).

Надежность тиристоров Т283-1600-60 подтверждена проведением испытаний на безотказность при одновременном воздействии силового тока и напряжения в сертифицированном испытательном центре ПАО «Электровыпрямитель». В АО «НТЦ ФСК ЕЭС» проведены длительные испытания ВТВ в режимах, соответствующих максимальным токовым и иным потенциальным воздействиям на тиристоры, а также в режимах с максимальной выделяемой мощностью в элементах цепей деления напряжения ВТМ. Головной образец блока БВПМ-М-800/120, изготовлен-

ный на тиристорах Т283-1600-60, выдержал комплекс испытаний в реальных условиях эксплуатации, который подтвердил работоспособность блока в штатном и аварийных режимах, при воздействиях грозовых импульсов и т. д.

Заключение

Результаты испытаний тиристоров Т283-1600-60 продемонстрировали их полное соответствие требованиям, предъявляемым к тиристорам для электрооборудования ЛЭП ПТ. Применение мощных высоковольтных тиристоров нового поколения позволяет существенно снизить количество последовательных соединений в вентилях, а за счет увеличения диаметра кристалла и оптимизации кремниевой структуры повысить токовую нагрузку при сохранении требуемых динамических параметров. Положительные результаты испытаний новых БВПМ подтвердили возможность применения тиристоров Т283-1600-60 в объектах электроэнергетики при строительстве вставок и линий электропере-

дачи постоянного тока, устройств поперечной и продольной компенсации, выпрямителей для плавки гололедообразований.

Литература

1. Сулова О. В., Травин Л. В. Обобщение тенденций развития и применения технологий передачи электроэнергии постоянным током (по материалам Международного коллоквиума 2017 CIGRE A3, B4 & D1). XXVI конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Коммутационные аппараты, преобразовательная техника, микропроцессорные системы управления и защиты». М.: 2017.
2. Гришанин А. В., Хапугин А. А., Плотников А. В., Мартыненко В. А., Елисеев В. В. Новые разработки мощных полупроводниковых приборов ПАО «Электровыпрямитель» для российских и международных проектов в электро- и термоядерной энергетике. XXVI конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного оборудования. Коммутационные аппараты, преобразовательная техника, микропроцессорные системы управления и защиты». М.: 2017.
3. Мартыненко В., Хапугин А., Гришанин А., Плотников А., Масленников В., Конюхов А. Мощные тиристоры с прямым управлением светом и лазерные волоконно-оптические модули управления для высоковольтных применений // Силовая электроника. 2012. № 1.
4. Пешков М. В., Карпов В. Н., Матинян А. М., Алексеев Н. А. Опыт разработки и испытаний вентильного оборудования для поэтапной реконструкции КВПУ на ПС 400 кВ «Выборгская». III научно-практическая конференция «Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянным током для повышения надежности электрических сетей и реализации международных проектов». М.: 2018.