

Переход на новый уровень

Модернизация системы охлаждения за счет использования тепловых труб улучшает характеристики автоматического выключателя на 25 %

Даниэль Чартоуни, Мартин Лакнер, Иосафат Кавальери



Автоматический выключатель генератора (GCB) является важнейшим компонентом электростанции, поскольку он обеспечивает защиту и генератора, и силового трансформатора. В модельный ряд выпускаемых АББ автоматических выключателей входят аппараты на номинальный ток от 6300 А до 50 000 А и выше. Например, выключатели HECS рассчитаны на номинальный ток до 18 000 А. Побочным эффектом прохождения столь высоких токов является большое количество выделяемого тепла, которое следует ограничить, чтобы остальные компоненты системы могли работать в определенных для них диапазонах температур. Поскольку естественное охлаждение не позволяет использовать высокие номинальные токи, то во многих GCB применяется принудительное охлаждение. Но и в этом случае выигрыш оказывается не очень большим.

Для увеличения номинального тока GCB требовалось применить инновационный подход, обеспечивающий отвод значительной тепловой мощности при небольшом весе и невысокой цене системы охлаждения. Решением стало использование так называемых тепловых труб, позволяющее не только увеличить количество отводимого тепла и повысить надежность системы, но и улучшить характеристики GCB более чем на 25 %!

Современная тенденция к уменьшению веса и габаритов при повышении функциональности распространяется и на силовое оборудование. Основной движущей силой этой тенденции является экономическая эффективность, поскольку более легкое оборудование требует меньше материалов для изготовления и более низких расходов на транспортировку и монтаж. Входящий в семейство автоматических выключателей генератора от АББ (см. вставку 1) выключатель HECS прошел модернизацию, результаты которой привели к впечатляющим результатам. Замена так называемой системы «принудительного охлаждения» (включающей насосы и вентиляторы с приводными электродвигателями) системой «пассивного» охлаждения (не требующей насосов и вентиляторов) позволила повысить номинальный ток выключателя HECS с 18 000 А до 23 000 А! Применение инновационной технологии – тепловых труб – позволило инженерам АББ сделать аппараты этой серии бесшумными, более легкими и компактными по сравнению с их предшественниками, а также свести к минимуму техническое обслуживание (см. вставку 2).

Эффективный отвод тепла от выключателя HECS обеспечивается пассивным устройством, позволившим увеличить номинальный ток.

Постановка задачи

При прохождении номинального тока и тока короткого замыкания выделяется гигантское количество тепла. Наличие даже крайне малого электрического сопротивления (в материале проводника или в подвижном контакте) приводит к активным потерям, выражаемым киловаттами выделяемого тепла. Но устойчивое состояние контактов в рабочем (замкнутом) состоянии обеспечивается, только если температура в точке нагрева не превышает 105 °C¹⁾. Таким образом, для максимального номинального тока существуют тепловые ограничения. Исходя из этого, рабочая температура автоматического выключателя генератора определяется как номинальным током, так и возможностями системы охлаждения. Для того чтобы увеличить номинальный ток GCB, инженерам-проектировщикам пришлось решить проблему управления тепловыми процессами внутри аппарата.

При использовании естественного охлаждения ток, пропускаемый выключателем серии HECS, не превышает 13 500 А. Однако применение

Серия автоматических выключателей генератора (GCB) компании АББ

GCB от АББ широко используются на электростанциях всех типов: газотурбинных, комбинированных, тепловых, геотермальных, а также на ГЭС и ГАЭС. Доля продукции компании АББ на этом рынке составляет 70%. Выключатели этого модельного ряда рассчитаны на мощности от 100 МВА до 1500 МВА. Их номинальный ток составляет от 18 000 А (с номинальным током короткого замыкания до 63 кА) до 50 000 А и более (с номинальным током короткого замыкания до 210 кА). Выпускаемые с 2003 г. в исполнении для внешней и внутренней установки выключатели HECS рассчитаны на номинальную мощность 800 МВА и номинальный ток короткого замыкания до 130 кА. При использовании естественного охлаждения их номинальный ток составляет 13 000 А, а при использовании принудительного охлаждения он возрастает до 18 000 А.



Плотность теплового потока очень высока, поскольку конструкция аппарата отличается компактностью и небольшим весом (типовое значение 6000 кг). Выбор этих выключателей является идеальным решением при модернизации электростанций, поскольку позволяет достичь существенной экономии при транспортировке и монтаже.

Изменение характеристик при использовании тепловых труб

| Наименование изделия | Максимальный рабочий ток | |
|-------------------------|--|--|
| | Современное изделие на базе HECS | Перспективное изделие с тепловыми трубами (пассивное охлаждение) |
| HECS-100/130XLp | 18 000 А (с принудительным охлаждением) | 18 000 А |
| HECPS-5Sp (для ГАЭС) | 13 500 А | 18 000 А |
| HECS-130XXLp | Нет данных | 23 000 А |

принудительного охлаждения путем обдува воздухом позволяет повысить номинальный ток до 18 000 А, но при этом возрастает вес аппарата. Дальнейшее увеличение номинального тока (до 23 000 А) возможно только в случае, если выделяемое токоведущими частями HECS тепло будет эффективно отводиться, не влияя на температурный режим остальных компонентов системы. Проблема усугубляется тем, что источник тепла – токоведущая часть – находится под высоким напряжением 23,5 кВ, а теплоотвод (оболочка HECS) заземлена, поэтому применение принудительного охлаждения может привести к нежелательным побочным эффектам. Для эффективной передачи тепла через значительный изолирующий промежуток следует применить тепловые трубы²⁾ (см. вставку 3). Подобная система охлаждения является полностью пассивной и почти не требующей обслуживания.

Разработка

Хотя принцип работы тепловых труб известен уже несколько десятилетий, они никогда не применялись в системах охлаждения GCB из-за сложности использования электрически изолированных металлических труб при очень высокой разности потенциалов между источником тепла (испарителем) и теплоотводом (конденсатором). Трубы не должны быть металлическими, но их материал должен обладать необходимой механической прочностью и быть совместимым с используемым хладагентом. Разрабатываемая система охлаждения должна была отвечать следующим требованиям:

¹⁾ Стандарт IEEE допускает повышение температуры контактов с серебряным покрытием не более чем на 65 К при температуре окружающей среды 40 °C.

²⁾ В бытовой технике охлаждение с помощью тепловых труб применяется уже несколько десятилетий.

Инновации в изделиях

1 Один полюс выключателя HECS с охлаждением тепловыми трубами. Снаружи видно только оребрение конденсатора в верхней части оболочки



Соответствие тепловой нагрузке

Максимальная тепловая нагрузка определяется значением тока и активного сопротивления автоматического выключателя. Таким образом, количество тепловых труб определяет максимально допустимое тепловое сопротивление отдельных компонентов.

Электрическая прочность тепловых труб

Электрическая прочность изоляции между токоведущими частями и оболочкой должна обеспечивать защиту как в нормальных условиях работы (т.е. при 25 кВ), так и при возникновении импульсных перенапряжений, вызванных, например, грозовыми разрядами. Подобную изоляцию должен обеспечивать диэлектрик, из которого изготовлены трубы, а также находящийся в них жидкий хладагент.

Механическая прочность тепловых труб

Прочностные характеристики системы охлаждения должны обеспечивать её сохранность при транспортировке или землетрясении, а также при выполнении большого числа циклов коммутации (до 20 000).

Длительный срок эксплуатации и экологическая безопасность

Срок эксплуатации системы при отсутствии обслуживания должен составлять не менее 20 лет. Кроме того, на протяжении всего этого срока используемый хладагент должен оставаться экологически безвредным.

Природоохранное законодательство требует применения технологий, не приводящих к глобальному потеплению и разрушению озонового слоя. Оценка жизненного цикла системы принудительной вентиляции (с приводными электродвигателями) и системы охлаждения на тепловых трубах показывает, что последняя оказывает значительно меньшее воздействие на окружающую среду.

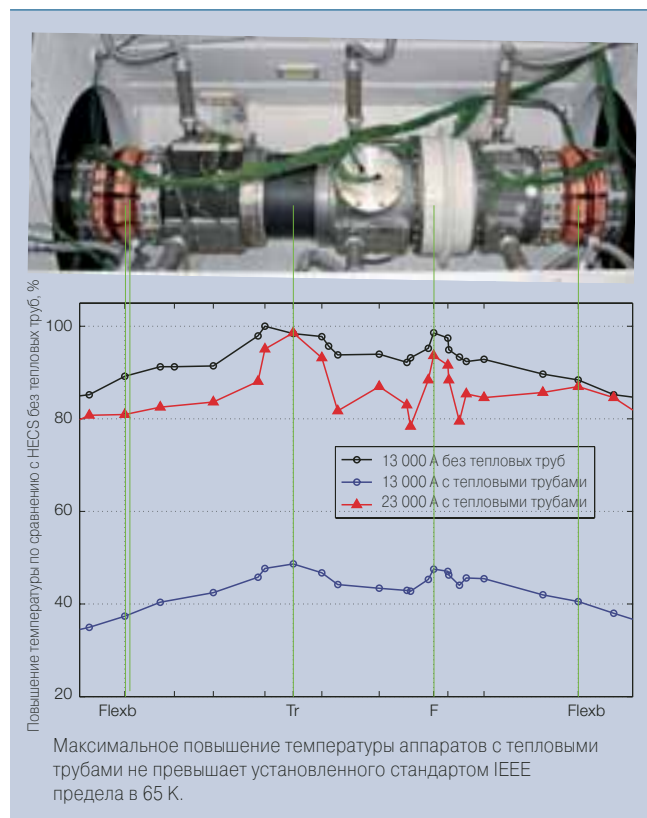
2 Испаритель соединен с изолирующей трубой через соединительную камеру. Оребренная изолирующая труба служит для подачи парообразного хладагента в конденсатор (см. рис. 3).



Техническая реализация

Стандартный выключатель GCB состоит из трех параллельных полюсов. Каждый полюс заключен в собственную оболочку, изолированную от рамы полюса (рис. 1). Разработанная АББ система охлаждения каждого полюса включает шесть тепловых труб для отвода тепла, выделяющегося при прохождении номинального тока. Для того чтобы этот процесс проходил как можно равномернее, трубы испарителя закрывают практически всю токоведущую поверхность³⁾

3 Выключатель HECS с прикрепленными к нему тепловыми трубами. На фотографии видны находящиеся внутри оболочки аппарата изолирующие трубы между испарителем и конденсатором.



Использование инновационной технологии охлаждения с помощью тепловых труб позволило сделать выключатели HECS практически бесшумными, а также более легкими и компактными.

(рис. 2). Гомогенный отвод тепла шестью испарителями необходим для предотвращения образования зон перегрева внутри проводника из-за наличия теплового сопротивления материала. Изолирующая труба между испарителем и конденсатором обладает выдающейся диэлектрической стабильностью и прочностными характеристиками, обеспечивающими ее герметичность в любых ситуациях, возникающих при работе аппарата⁴⁾. Помимо повышения номинального тока на 27,8% с 18 000 А до 23 000 А, результаты измерений (рис. 3) показа-

ли, что тепловое сопротивление тепловой трубы составляет всего 58 мК/Вт. Другими словами, при отводе 1000 Вт рассеиваемой мощности температура повышается на 58 К.

Взгляд в будущее

Продукция АББ занимает лидирующее место на рынке GCB. Дальнейшее расширение модельного ряда будет происходить за счет оборудования существующего выключателя HECS-XL пассивной системой охлаждения на тепловых трубах, а также выпуска двух новых аппаратов: HECS-100/130XXLp для обычных применений и HECS-5Sp для ГАЗС (см. вставку 2).

Выключатели HECS-100/130XL в настоящее время используют систему принудительного охлаждения. Цель компании АББ – сохранить лидирующее положение на рынке за аппаратами, которые придут на смену HECS-XL. Новые выключатели будут оборудованы или более компактными испарителями и конденсаторами, или меньшим количеством полноразмерных тепловых труб. Одна из предлагаемых новинок, HECS-100/130XXLp, рассчитана на сегмент рынка коммутационных аппаратов от 18 000 А до 23 000 А. Испаритель покрывает максимально возможную поверхность полюса, обеспечивая крайне малое тепловое сопротивление и рав-

номерное распределение температуры по профилю разъединителя. Другой важнейшей конструктивной особенностью является специальная форма теплообменной поверхности конденсатора, практически не влияющая на тепловое сопротивление системы в целом. Использование тепловых труб для охлаждения предназначено для ГАЗС выключателя HECS-5Sp позволило увеличить его номинальный ток до 18 000 А.

Вновь разработанная АББ система охлаждения на тепловых трубах не потребляет электричества, не нуждается в обслуживании и позволяет увеличить номинальный ток выключателя на 25 процентов!

Вновь разработанная АББ система охлаждения на тепловых трубах не потребляет электричества, не нуждается в обслуживании и является практически бесшумной. Однако главным ее преимуществом является увеличение номинального тока автоматического выключателя

для генераторов до 23 000 А. Использование новой пассивной системы охлаждения позволило расширить модельный ряд выпускаемых компанией АББ автоматических выключателей за счет высококоротельных продуктов для любых применений. Их поступление на рынок ожидается в 2008 г.

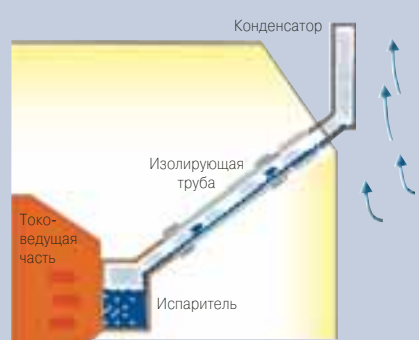
Тепловые трубы – альтернативный способ охлаждения

В тепловых трубах используется эффект поглощения теплоты при испарении жидкости (скрытая теплота парообразования), которая затем выделяется в другом месте в ходе процесса конденсации.

Система состоит из трех основных компонентов: испарителя, прикрепленного к токоведущей поверхности GCB (источнику тепла), изолирующей трубы и конденсатора, расположенного вне оболочки и передающего теплоту окружающей среде.

Система является замкнутым холодильным контуром, частично заполненным хладагентом. В испарителе внешний тепловой поток заставляет хладагент закипать. Возникает небольшой дифференциал давлений, под влиянием которого парообразный хладагент поднимается в конденсатор с естественной конвекцией, где отдает теплоту окружающей среде и превращается в жидкость.

Образующаяся жидкость под действием силы тяжести стекает обратно в испаритель. Замечательной особенностью системы на тепловых трубах является то, что она является полностью пассивной, поскольку перемещение хладагента происходит под действием внешнего источника тепла и силы тяжести.



Так как парообразование и конденсация происходят почти при одинаковой температуре, то градиент температуры по длине трубы невелик. Благодаря этому эффективность теплопередачи и величина теплового потока в несколько тысяч раз превышают аналогичные показатели металлических теплообменников. Величина теплового потока от испарителя к конденсатору ограничивается только плотностью находящегося внутри изолирующей трубы парообразного хладагента.

Даниэль Чартоуни

ABB Corporate Research
Баден-Дётвиль, Швейцария
daniel.chartouni@ch.abb.com

Мартин Лакнер

Иосафат Кавальери
ABB High Voltage Products
Цюрих, Швейцария
martin.lakner@ch.abb.com
giosafat.cavaliere@ch.abb.com

³⁾ Это часто приводит к уменьшению теплового сопротивления испарителя.

⁴⁾ Сначала предполагалось использовать в качестве трубопроводов для жидкого и парообразного хладагента между конденсатором и испарителем металлические трубы с электрической изоляцией. Однако от них пришлось отказаться, поскольку официальные типовые испытания требуют, чтобы изоляция обеспечивалась при напряжениях до 88 кВ переменного тока и при импульсных перенапряжениях до 165 кВ (грозовых разрядах). Кроме того, металлические трубы не обладали необходимой прочностью, а их соединения не обеспечивали требуемой герметичности.