

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Новое поколение аппаратов и систем защиты от перегрузки по току высоковольтной аппаратуры

ГУРЕВИЧ В.И., канд. техн. наук

Аппаратура, использующая для работы высокие напряжения (10—100 кВ), получила очень широкое распространение в последние десятилетия. Прежде всего, это разнообразные радиолокационные станции военного и гражданского назначения, мощные передатчики сигналов для систем связи, радиовещания и телевидения, технологические лазеры, рентгеновские установки, мощные устройства электронно-ионной технологии, установки для индукционного нагрева и плавки металлов, технологические ускорители электронов для облучения материалов, электрофизическая аппаратура и т.п.

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в каждой из этих областей, по-прежнему актуальной остается проблема защиты такой аппаратуры от перегрузок по току, вызванных пробоями изоляции высоковольтных цепей или пробоями внутри высоковольтных приборов. Первое связано с тяжелыми условиями эксплуатации оборудования и попаданием в его внутреннюю полость влаги и пыли, а второе — с непредсказуемыми внутренними пробоями высоковольтных вакуумных электронных приборов (клистронов, тетродов и т. п.), применяемых обычно в такой аппаратуре, пробоями полупроводниковых элементов высоковольтного выпрямителя и т.п.

Традиционно защита от перегрузок по току в такой аппаратуре решается путем включения датчиков тока и электронных реле в низкопотенциальные или в заземленные цепи. Однако далеко не всегда такая защита оказывается эффективной. Существует несколько проблем, связанных с защитами такого типа.

1. В сложной аппаратуре имеется не одна, а несколько высоковольтных цепей, часто с различным потенциалом, относительно земли, различным внутренним сопротивлением и различными рабочими токами. В этих условиях трудно настроить датчик, включенный в общую цепь земли, так, чтобы он одинаково эффективно защищал все эти цепи.

2. Возможность включения датчика аварийного тока только в общую цепь земли накладывает некоторые ограничения и на схемотехнические решения, вынуждая разработчиков аппаратуры усложнять и удорожать аппаратуру.

3. При ухудшении качества цепей заземления (а это особенно актуально для мобильной аппаратуры) датчик, включенный в эту цепь, не только сам попадает под высокое напряжение, но и является "путепроводом" для выноса высокого потенциала в низковольтные цепи со всеми

вытекающими отсюда последствиями и для самой аппаратуры и для обслуживающего персонала.

4. Внутренние источники питания высоковольтной аппаратуры всегда имеют на выходе мощный фильтр с реактивными элементами, сглаживающими пульсации высоковольтного выпрямителя. При отключении такого источника питания со стороны питающей сети низкого напряжения (220, 380 В), реактивные элементы фильтра будут продолжать подпитывать дугу в месте пробоя до их полного разряда. Если же вместо отключения со стороны низкого напряжения предпринять защитное закорачивание (в западной технической литературе такая защита получила название "crowbar" — лом) высоковольтного источника питания на стороне высокого напряжения, будут сильно перегружены элементы высоковольтного выпрямителя и питающий трансформатор, что резко повышает опасность их выхода из строя.

5. Использование для такого защитного закорачивания выпускаемых промышленностью импульсных высоковольтных приборов типа тиратронов или управляемых разрядников ("Triggered Spark Gaps") приводит к возникновению дополнительных проблем из-за очень малого времени (несколько микросекунд), в течение которого такие приборы допускают протекание разрядного тока. В более длительном режиме такие приборы допускают протекание очень малых токов. Например, прибор НУ-3202 известной американской фирмы "EG & G Electro-Optics" с такими высокими параметрами, как $U_a = 32$ кВ и $I_a = 20$ кА, допускает средний анодный ток всего лишь 0,5 А. С одной стороны, достаточно сложно обеспечить время разряда мощных реактивных элементов фильтра за единицы микросекунд. С другой стороны, к этому далеко не всегда следует и стремиться, так как обычные фильтровые конденсаторы большой емкости не допускают значительных разрядных токов и поэтому их можно разряжать только через ограничительное сопротивление, т.е. в течение времени, превышающего единицы микросекунд. Кроме того, тиратроны требуют постоянного питания цепи накала, как обычные электролампы (6,3 В, 18 А).

6. При подключении к питающей сети источника питания, содержащего мощный повышающий трансформатор, выпрямитель и значительную емкость сглаживающего фильтра на выходе, происходит значительный бросок тока, перегружающий все эти элементы и вызывающий необ-

ходимость селективной отстройки от него датчика аварийного тока, что существенно снижает эффективность защиты.

Автором уже давно ведется работа по разработке и совершенствованию устройств и систем защиты высоковольтных установок от аварийных режимов [1—6 и др.]. Некоторые из разработанных устройств используются на ряде российских предприятий (например, таких как ВНИИрадиотехники, НПО "Антей", НИИЭФА, Правдинский завод радиорелейной аппаратуры и др.). В настоящее время завершены разработки нового поколения этих систем, в которых учтены описанные проблемы. Эти системы внедрены в опытную эксплуатацию на израильских предприятиях "Optomic Lasers" (в питающем генераторе мощного лазера для резки металлов) и "ELTA" (в передатчике радиолокационной станции).

Комплект новых устройств состоит из серии высоковольтных изолирующих интерфейсов INTERVOLTEC[®], серии тиристорных контакторов, управляемых от этих интерфейсов, серии высоковольтных тиристорных короткозамыкателей.

Разработаны три серии высоковольтных изолирующих интерфейсов: IVT, IVT-PLS и IVT-BUS.

Первая серия состоит из пяти приборов: IVT-15, IVT-25, IVT-50 и IVT-70, предназначенных для работы при напряжениях, соответственно 15, 25, 50 и 70 кВ постоянного тока, рис.1. Принцип действия этих приборов основан на разделении электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля. Каждый такой прибор содержит источник магнитного поля (катушку), включаемый в высокопотенциальную цепь тока, геркон и слой высоковольтной изоляции, прозрачный для магнитной составляющей поля и полностью изолирующий геркон по электрической составляющей поля.

Каждый прибор этой серии выполняет функции четырех отдельных устройств:

- измерителя уровня тока в высоковольтной цепи;
- регулятора порога срабатывания;
- узла гальванической развязки между высоковольтной и низковольтной цепями;
- быстродействующего выходного реле в низковольтной цепи.

Выводы приборов выполнены высоковольтным проводом фирмы "Reynolds" с фторопластовой изоляцией, специально активированной для обес-

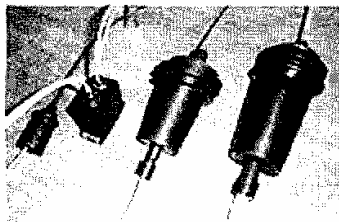


Рис.1. Высоковольтные изолирующие интерфейсы серии IVT (слева направо, соответственно: IVT-15, IVT-25, IVT-50 и IVT-70)

печения хорошей адгезии к эпоксидным компаундам. Этот провод имеет максимальное рабочее напряжение 30 кВ при наружном диаметре 3 мм. В некоторых случаях на высоковольтные выводы дополнительно одета трубка из силиконовой резины. Основной изолятор и все внутренние конструктивные элементы выполнены из литевой пластмассы Polyetherimide марки "ULTEM-1000", основные параметры которой приведены ниже:

Электрическая прочность, кВ/мм	30
Тангенс угла диэлектрических потерь (1 МГц)	0,0013
Диэлектрическая постоянная (1 МГц)	3,15
Интервал рабочих температур, °С	-60 +170
Твердость (Rokwell)	125
Модуль упругости (psi)	475066
Водопоглощение (%; 24 часа)	0,25

Этот материал отличается отличной стабильностью параметров, высокой химической стойкостью, механической прочностью и устойчивостью к воздействию ультрафиолетового и гамма излучений.

После сборки конструкции все внутренние полости устройств заполняются под вакуумом эпоксидным компаундом марки STYCAST, имеющим очень близкое к ULTEM значение температурного коэффициента линейного расширения, рабочую температуру $-75 \pm +175^\circ\text{C}$, очень хорошую текучесть смеси и отличные электрофизические характеристики.

Сопрягаемые элементы конструкции, которые перемещаются в процессе регулирования порога срабатывания, смазаны специальной электропроводной смазкой на основе серебра, растворенного в силиконовом масле, что предотвращает коррозия в тонкой воздушной прослойке между ними.

Основные параметры приборов серии IVT приведены в таблице.

По устойчивости к воздействию факторов внешней среды устройства удовлетворяют американскому стандарту MIL-ST-202 и его российским аналогам ГОСТ В20.57.406-81 и ГОСТ В20.39.404-81 на ввозимое оборудование и авиационное оборудование, работающее на высоте до 15 км, в том числе:

Диапазон рабочих температур, °С	-55+85;
Циклическое изменение температур в диапазоне, °С	-55+85
Влажность воздуха при температуре 40°С, %	87
Пониженное давление воздуха с приложением высокого напряжения, мм рт.ст.	87
Виброустойчивость при амплитуде колебаний 1,5 мм в диапазоне частот 10—500 Гц, g	10
Многочисленные механические удары длительностью 2 мс, 10 тыс. ударов, g	60
Одиночные механические удары 1/2 синусоиды длительностью 11 мс, g/c	30

В системах защиты от перегрузки по току ин-

Параметр	INTERVOLTEC®			
	IVT-15	IVT-25	IVT-50	IVT-70
Номинальное напряжение постоянного тока, кВ	15	25	50	70
Испытательное напряжение пост. тока (1 мин), кВ	20	35	70	90
Диапазон токов срабатывания, для различных исполнений, А	A—0,01...0,02	A—0,025...0,05	A—0,25...0,5	A—0,05...0,3
	B—0,02...0,03	B—0,05...0,10	B—0,5...1,0	B—0,15...0,5
	C—0,03...0,05	C—0,10...0,25	C—1,0...3,0	C—0,25...2,5
	D—0,05...0,10	D—0,25...0,50	D—2,0...5,0	D—1,0...5,0
	E—0,10...0,20	E—0,50...1,00		
	F—0,20...0,50	F—1,00...2,50		
	G—0,50...1,00	G—2,50...5,0		
Предельное значение тока в цепи управления длительностью 1 с	Десятикратное значение максимального тока срабатывания для каждого исполнения			
Мощность сигнала управления, Вт	0,2...0,4	0,2...0,5	0,5	0,9
Максимальное коммутируемое напряжение выходной цепи, В:	600			
переменного тока	400			
Максимальный коммутируемый ток выходной цепи, А	0,5			
Максимальная коммутируемая мощность выходной цепи, Вт	25			
Максимальная частота срабатываний, Гц	100			
Максимальное время срабатывания, мс (зависит от индуктивности цепи управления)	0,5...1,0			
Параметры цепи управления в зависимости от исполнения:	сопротивление, Ом			
индуктивность, мГн	23...400	0,12...900	0,26...70	0,26...70
Максимальные размеры, мм	Ø26×47	56×27×70	Ø75×150	Ø75×190
Масса, г	45	130	370	620

терфейсы IVT включаются обычно в разрыв высоковольтной цепи тока источника питания последовательно с нагрузкой при действующем значении тока до 10 А (импульсные токи с амплитудой до 30 А) или подключаются к шунту при токах выше 10 А, рис.2. Низковольтный выход интерфейсов подключается, обычно, к низковольтному силовому полупроводниковому контактору прямого пуска (TCDS) или "мягкого" пуска (TC-soft). Срабатывание интерфейса происходит при превышении током в высоковольтной цепи значения, соответствующего порогу сраба-

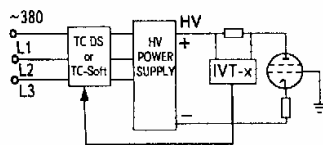


Рис.2. Типовая схема включения высоковольтных изолирующих интерфейсов IVT

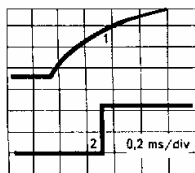


Рис.3. Характеристика срабатывания приборов IVT: 1 — изменение тока во входной цепи IVT; 2 — вид сигнала в выходной цепи IVT

тывания интерфейса (рис.3). Время срабатывания интерфейса в значительной степени зависит от кратности тока перегрузки относительно его номинального тока срабатывания ($I/I_{НОМ}$) (рис.4).

Интерфейсы серии IVT-PLS (рис.5) являются приборами комбинированного импульсно-аналогового действия и в отличие от приборов IVT, не реагируют на уровень протекающего через них постоянного тока. Срабатывание IVT-PLS происходит под действием скачка тока с высоким значением di/dt . При этом интерфейс IVT-PLS имеет встроенный фильтр, предотвращающий срабатывание от коротких импульсов тока модуляции в контролируемой цепи. Интерфейсы этого типа могут быть выполнены на различные диапазоны токов срабатывания (от долей ампера до нескольких десятков ампер) и внутри каждого диапазо-

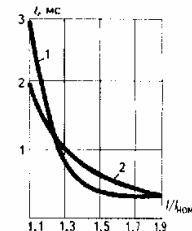


Рис.4. Зависимость времени срабатывания интерфейсов IVT от кратности тока перегрузки I относительно его номинального тока срабатывания ($I_{НОМ}$)

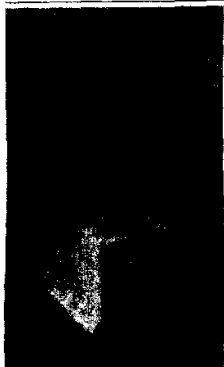


Рис.5. Внешний вид интерфейса серии IVT-PLS

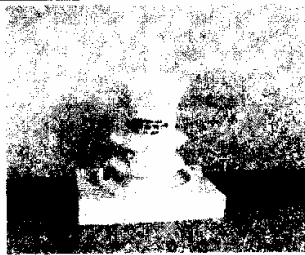


Рис.6. Интерфейс серии IVT-BUS с элементами крепления на высоковольтной токоведущей шине



Рис.7. Тиристорный контактор прямого включения TCDS открытого исполнения и внешний вид закрытого корпуса-радиатора для этого контактора



на имеют регулятор порога срабатывания. Интерфейс IVT-PLS может быть состыкован с любым другим интерфейсом серии IVT и иметь общую выходную цепь, формирующую мощный импульс тока при срабатывании любой из этих частей интерфейса, или два независимых выхода. В последнем случае выходной геркон интерфейса IVT управляет тиристорным контактором в низковольтной цепи, а импульсный выход IVT-PLS — и низковольтным тиристорным контактором и высоковольтным тиристорным короткозамыкателем. При относительно медленном нарастании тока в контролируемой цепи срабатывает IVT и запирает низковольтный тиристорный контактор, а при быстрых скачках тока с высокой крутизной переднего фронта (характерных для внутренних пробоев) срабатывает IVT-PLS и обеспечивает выдачу управляющих сигналов одновременно и на контактор низкого напряжения и на высоковольтный короткозамыкатель. Таким образом обеспечивается комплексная защита оборудования от всех видов повреждений. Устройство IVT-PLS имеет размеры 96×61×55 мм.

Интерфейсы серии IVT-BUS (рис.6) ориентированы на использование в электроэнергетике. Все интерфейсы этой серии выполнены в одинаковых диэлектрических корпусах размерами 80×130 мм и снабжены специальным элементом крепления (не требующим сверления отверстий) на токоведущих шинах с напряжением 6—24 кВ переменного тока. Эти корпуса предназначены для внутренней установки в КРУ или КТП и прошли испытания не только на выдерживаемые испытательные напряжения (одноминутное и импульсные), но и на уровень частичных разрядов.

Устройство IVT-BUS-CD представляют собой дискретный датчик тока с порогом срабатывания в диапазоне 100—10000 А, который предназначен для применения в различных устройствах сетевой автоматики [6—8].

Устройство IVT-BUS-CA является высоковольтным аналоговым преобразователем тока с прямолинейной выходной характеристикой (рис.7) и предназначено для использования совместно с электронными измерителями тока.

Интерфейс IVT-BUS-VD предназначен для контроля наличия напряжения на данной фазе и может быть использован для контроля потери фазы в трехфазных электрических сетях, сигнализации о заземлении фазы в сетях с изолированной нейтралью [9] и т.п.

Как упоминалось в состав систем защиты высоковольтного электрооборудования помимо интерфейсов входят также и силовые полупроводниковые коммутационные устройства.

Простейшим типом такого устройства является тиристорный контактор прямого включения TCDS (рис.7), выполненный на базе трехфазного тиристорного модуля фирмы "CRYDOM" и простой полупроводниковой системы управления, предназначенной для совместной работы с приборами IVT. Контактор предназначен для управления трехфазной нагрузкой с номинальным напряжением до 440 В, номинальным током до 80 А и частотой 50—400 Гц. Контактор снабжен встроенной защитой от перегрузки по току и может быть размещен в специальном корпусе-радиаторе (рис.7). Включение нагрузки производится по команде любого внешнего управляющего элемента, а аварийное отключение — по команде любого из приборов серии IVT.

Тиристорный контактор серии TC-sof (рис.8) позволяет осуществлять плавное включение источника питания, исключая броски тока намагничивания силового трансформатора в низковольтной цепи и броски зарядного тока фильтров в высоковольтной цепи. От контактора TCDS это устройство отличается только наличием специальной схемы управления, обеспечивающей плавное изменение угла отпирания силовых тиристоров в процессе включения контактора.

В стадии разработки находятся силовые кон-



Рис.8. Тиристорный контактор плавного пуска серии TC-soft перед монтажом в корпусе-радиаторе (слева виден трехфазный тиристорный контактор фирмы «CRYDOM» с установленными на нем датчиками тока, справа — печатные платы схемы управления)

такторы на основе IGBT-транзисторов. Преимущество такого контактора — высокое быстродействие при заперении (десятки микросекунд), а недостаток — увеличенные габариты.

Другой разновидностью силового полупроводникового коммутирующего устройства является низковольтный тиристорный короткозамыкатель (рис.9), который создает искусственное короткое замыкание со стороны низкого напряжения источника питания по команде интерфейса IVT и тем самым, резко снижает уровень входного напряжения, поступающего на источник питания. Длительность короткого замыкания при максимальном допустимом токе 3—4 кА соответствует времени срабатывания автоматического выключателя *K* (рис.9). Преимуществами такого коммутирующего устройства по сравнению с предыдущим являются его значительно более высокое быстродействие (порядка 10—15 мкс) и отсутствие необходимости использования радиатора, поскольку тиристоры в этом устройстве отпираются и пропускают ток только в аварийном режиме и в течение очень ограниченного времени (20—30 мс).

Для быстрой эвакуации энергии из реактивных элементов фильтра, установленного на стороне высокого напряжения источника питания, предназначены высоковольтные тиристорные короткозамыкатели серии HVSC (рис.10,11), разработанные на номинальные напряжения от 5 до 25 кВ и разрядные токи до 4 кА, выдерживаемые в течение времени до 10 мс. Энергия, эвакуируемая таким устройством, на несколько порядков выше энергии известных газоразрядных и вакуумных коммутаторов. Полное время срабатывания короткозамыкателей серии HVSC, управляемых интерфейсами IVT-PLS, составляет 20 мкс (рис.12).

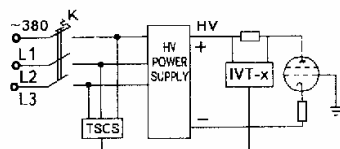


Рис.9. Внешний вид и схема включения тиристорного короткозамыкателя серии TSCS

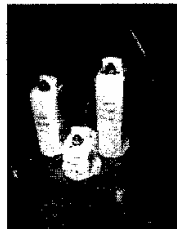


Рис.10. Высоковольтные тиристорные короткозамыкатели серии HVSC на номинальные напряжения 15, 5 и 22 кВ

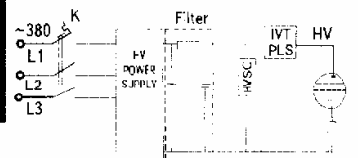


Рис.11. Схема включения высоковольтных тиристорных короткозамыкателей серии HVSC

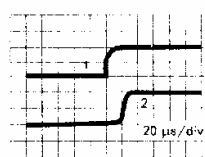


Рис.12. Характеристика срабатывания высоковольтного тиристорного короткозамыкателя HVSC, управляемого интерфейсом IVT-PLS:

1 — изменение тока во входной цепи IVT-PLS; 2 — ток коммутации тиристорного короткозамыкателя

Универсальный набор элементов и узлов, описанный в статье, позволяет создавать высокоэффективные, но различающиеся по сложности, функциональным возможностям и стоимости системы защиты от перегрузок по току высоковольтной аппаратуры. В настоящее время все эти приборы готовятся к серийному производству на одном из предприятий под руководством автора.

Список литературы

1. Гуревич В. И. Квазистатическая коммутирующая и регулирующая аппаратура с высокопотенциальной развязкой. Дисс. канд. техн. наук. ХПИ. 1986.
2. Гуревич В. И., Кривцов В. В., Савченко П. И. Интерфейсные реле//Электротехника. 1990. № 6. С. 71—75.
3. Гуревич В. И., Савченко П. И. Геркотроны - новые аппараты дистанционного управления высокопотенциальными цепями//Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1984. №4 (103). С. 57—59.
4. Гуревич В. И. Защита высоковольтных цепей автономной РЭА от перегрузок по току//Электросвязь. 1994. №6. С. 28—30.
5. Герасимов В.П., Гуревич В.И., Промышляев С. В. Новые схемные решения систем управления объектами под высоким потенциалом с применением геркотронов//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Электрофизическая аппаратура. 1985. Вып. 22. С. 33—38.
6. Гуревич В.И. Комплекс устройств релейной защиты и автоматики на базе высоковольтных изолирующих интерфейсов для сетей 6—10 кВ//Промышленная энергетика. 1991. №6. С. 6—8.
7. Гуревич В. И. Применение геркотронов в устройствах релейной защиты горных электроустановок//Промышленная энергетика. 1987. №2. С. 21—23.
8. Кривцов В.В., Гуревич В.И. Новые принципы построения устройств максимальной токовой защиты на магнитоуправляемых контактах//Изв. вузов. Энергетика. 1991. № 6. С. 38—43.
9. Гуревич В.И. Новая концепция защиты от замыканий на землю распределительных сетей среднего напряжения//Промышленная энергетика. 2000.