

Вакуумные выключатели в распределительных сетях. Механические характеристики и коммутационные перенапряжения

Леонид Иванович Сарин, директор
Андрей Игоревич Ширковец, ведущий инженер
Артем Александрович Базавлук, инженер
ООО «Болид», г. Новосибирск
Владимир Васильевич Гоголюк,
начальник управления энергетики
ОАО «Газпром», г. Москва

Краткая характеристика коммутационных аппаратов 6–35 кВ

В коммутационной аппаратуре средних классов напряжения в настоящее время в качестве изоляционной и дугогасительной среды используется масло, элегаз и вакуум.

До начала 1990-х гг., т.е. времени появления вакуумных коммутационных аппаратов, в сетях напряжением до 35 кВ для коммутации номинальных токов и токов КЗ широко применялись маломасляные и электромагнитные выключатели.

К достоинствам маломасляных выключателей относятся прежде всего «мягкое» гашение дуги при коммутациях, что обуславливает отсутствие заметных перенапряжений, а также, условно говоря, достаточно простая «унифицированная» конструкция, обеспечивающая высокую ремонтпригодность. Электромагнитные выключатели используются до напряжения 10 кВ, к их достоинствам относятся отсутствие масла и относительно высокий коммутационный ресурс (5 000–10 000 в цикле В–О при номинальном токе).

С течением времени требования к коммутационным аппаратам росли, к ним предъявлялись требования повышенной пожаро- и взрывобезопасности, возможности осуществления большого количества циклов оперативных переключений, надежности, минимального объема обслуживания и т.д.

С появлением современных элегазовых и вакуумных аппаратов остро проявились недостатки маломасляных и электромагнитных выключателей. У первых это прежде всего ограниченный коммутационный и механический ресурс (на 1–2 порядка ниже, чем у вакуумных) с необходимостью замены масла, у вторых – большие габариты и масса, необходимость в мощных источниках тока для соленоидов приводов.

Стоит отметить, что на многих предприятиях в сетях электроснабжения 6–10 кВ до сих пор эксплуатируются и маломасляные, и электромагнитные выключатели выпуска 1980-х гг. Правда, их техническое состояние оставляет желать лучшего.

Изоляционной средой в современной коммутационной аппаратуре на номинальное напряжение 6–35 кВ сегодня являются элегаз и вакуум.

Элегаз (шестифтористая сера) обладает высокими электроотрицательными свойствами, что делает его отличной дугогасительной средой. Электрическая прочность элегаза в 2–3 раза выше прочности воздуха (при давлении 0,2 МПа электрическая прочность элегаза сравнима с прочностью трансформаторного масла). Сам по себе элегаз неядовит, химически инертен и безопасен для человека (в том числе в смеси с воздухом) при отсутствии в нем примесей. Однако известным недостатком любого элегазового выключателя (ЭВ) является вред для персонала и окружающей среды ядовитых продуктов распада элегаза (фторидов серы), образующихся при гашении дуги. При этом конструкцией качественных ЭВ не допускается выброс газов в окружающую среду, хотя утечки элегаза иногда все же происходят. Отключающая способность лучших ЭВ на класс 10 кВ сегодня достигает 40–50 кА, а механический и коммутационный ресурс – 10–20 тыс. циклов В–О.

Электрическая прочность вакуума на частоте 50 Гц, как показали измерения, сравнима с прочностью твердой изоляции из сшитого полиэтилена (40–50 кВ/мм), что значительно выше прочности других дугогасительных сред, применяемых в выключателях. Это объясняется увеличением длины свободного пробега заряженных частиц по мере уменьшения давления. Степень разреженности, т.е. давление в вакуумной дугогасительной камере (ВДК), нормируется производителями и достигает 10^{-4} – 10^{-5} Па. Процесс восстановления электрической прочности в вакууме протекает значительно быстрее, чем в газах.

Даже поверхностный анализ параметров выключателей позволяет заключить, что основные декларируемые характеристики вакуумных выключателей (ВВ), указанные в каталогах заводов-изготовителей, существенно лучше, чем у маломасляных выключателей. В частности, коммутационный ресурс ВВ напряжения 10 кВ составляет при номинальном токе 630–4000 А до 50 000 циклов В–О, механический – до 100 000 циклов; собственное время включения не превышает 0,2 с (у лучших выключателей – 0,06 с), а отключения – 0,1 с. Номинальные токи отключения достигают для некоторых зарубежных выключателей 63 кА.

Основные преимущества и недостатки выключателей с различными дугогасительными средами приведены в [1] и на сегодняшний день вполне актуальны.

Вакуумные выключатели среднего напряжения сегодня

Доля вакуумных выключателей среднего класса напряжения в странах Европы и США составляет порядка 70%, в Японии – 100%, в России – более 50% [2]. Мировой спрос на ВВ в распределительных сетях (сетях электроснабжения) сегодня составляет порядка 80%. Такое широкое внедрение ВВ связано, в частности, с большим коммутационным ресурсом.

Однако, несмотря на хорошие свойства вакуума, процессы горения и гашения дуги в вакууме имеют свои особенности. Даже постоянное развитие вакуумной коммутационной техники и применение защитных аппаратов не решило проблему высоких кратностей перенапряжений при коммутации ВВ, что приводит к пробоям изоляции в различных узлах электрической сети и соответствующим технологическим нарушениям, а значит – к экономическим ущербам. По результатам исследований [2] активное внедрение ВВ в сетях 6–10 кВ горно-металлургических предприятий привело к росту однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), возникающих в результате коммутационных перенапряжений (КП). Там же указано, что число аварийных отключений, связанных с КП, возросло в среднем в 3,8 раза за 6 лет эксплуатации ВВ (2002–2008 гг.). Такая ситуация требует грамотного подхода к выбору типа коммутационного оборудования и предъявлению жестких требований к его характеристикам.

В настоящее время на российском рынке представлено более 40 производителей ВВ (в том числе зарубежных производителей) на напряжение 10 кВ, выпускающих более 200

типов ВВ с различными характеристиками, техническими решениями и качеством исполнения.

Среди российских производителей наиболее заметными являются РГК «Таврида Электрик» (г. Москва, выключатели ВВ/TEL), «НПП Контакт» (г. Саратов, выключатели ВВ, ВБЭ, ВВПП), «ЭЛКО» (г. Минусинск, выключатели ВБЧ-СЭ, ВВЭ-М), «ЭНЭКО» (г. Минусинск, выключатели ВБЧЭ), «Уралэлектротяжмаш» (г. Екатеринбург, выключатели ВВПЭ), «Электроаппарат» (г. Уфа, выключатели ВБТЭ-М), ГК «Самараэлектротит» (г. Самара, выключатели ВВУ-СЭЩ, ВВМ-СЭЩ), «Альянс-Электроаппарат» (г. Санкт-Петербург, выключатели ВВ/АЭ), «Элвест» (г. Екатеринбург, выключатели ВБКЭ), «ПО Элтехника» (г. Санкт-Петербург, выключатели ВВПП) и др.

Лидерами среди иностранных производителей ВВ являются АВВ (Швеция, Швейцария), Aegva T&D (Франция), Siemens (Германия), HVB AE Power Systems (США), Schneider Electric (Франция), Cooper, Whipp & Bourne (Англия).

Такое количество производителей и предлагаемых ими аппаратов существенно усложняет выбор ВВ для потребителя.

Нельзя не отметить жесткой конкуренции между производителями ВВ, которое находит отражение в «соревновании» технических параметров, хотя основные характеристики ВВ на один класс напряжения схожего назначения сейчас мало отличаются, а сами характеристики не несут исчерпывающей информации для определения влияния ВВ на коммутируемое оборудование в процессе эксплуатации.

Требования ГОСТ к выключателям

В настоящее время действует ГОСТ Р 52565-2006 «Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия», созданный с использованием зарубежных стандартов. Он содержит требования и к переходному восстанавливающему напряжению (или процессу восстановления напряжения) – ПВН для всех типов выключателей – воздушных, элегазовых и вакуумных без различий по типам.

Синтетические испытания по этому ГОСТ могут свидетельствовать, что ВВ успешно прошел испытания на отключение индуктивного тока при огромной скорости нарастания напряжения и высокой частоте процесса. Фактически это означает, что перенапряжения, генерируемые таким выключателем за счет повторных пробоев, будут чрезвычайно негативно влиять на сеть. Однако при испытаниях отечественных ВВ по указанному ГОСТУ никакие «повторные зажигания» не регистрируются и выключатель, при соответствии прочих параметров заявляемым, числится успешно прошедшим испытания. Такой подход нельзя признать правильным.

Электрические процессы в вакуумной дугогасительной камере

Вакуум относится к среде с так называемым «жестким» дугогашением, т.е. дуга в ВДК при отключении выключателя гаснет, как правило, до естественного перехода тока через нулевое значение. Это явление называется «срезом тока» и приводит, помимо ряда прочих причин, к высоким кратностям перенапряжений.

Следует отметить, что в современных ВВ с контактами из хромистой меди (в подавляющем большинстве ВВ 10 кВ используется сплав медь-хром с процентным соотношением 70/30) заявляемые токи среза составляют не более 5 А. Согласно [3], не они определяют условия успешного отключения, а соревнование между восстанавливающей электрической прочностью (ВЭП) в ВДК и ПВН на его контактах после прохождения высокочастотного тока через нулевое значение. Как отмечается в [3], обстоятельство, что высокочастотный ток равен нулю или току среза в момент обрыва дуги (при малом значении последнего) практически не влияет на рассматриваемые процессы. Кроме того, срез тока возникает в основном при отключении выключателем малых токов (до нескольких десят-

ков ампер), например, присоединений с ненагруженными трансформаторами. Поэтому влияние тока среза на КП далеко не всегда является определяющим фактором.

Наиболее опасны для витковой изоляции оборудования и ослабленной изоляции кабелей повторные пробои высокой частоты в ВДК. Они возникают, если ПВН в какой-то момент превышает ВЭП. Частоты переходных процессов при включении и отключении ВВ зависят, в том числе, от нагрузки коммутируемого присоединения и достигают значений сотен килогерц и единиц мегагерц.

Высокие кратности перенапряжений опасны в первую очередь для высоковольтных двигателей, уровень изоляции которых составляет порядка $2,8U_{фм}$ (для новых электрических машин) [4]. Высокие частоты переходного процесса при коммутациях ВВ представляют серьезную опасность для витковой изоляции электрических машин и трансформаторов, кабельных муфт (поле в них характеризуется большой неравномерностью), а также, что следует подчеркнуть, для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). В твердой изоляции последних, благодаря воздействию электрическому полю высокой частоты, происходит ускоренное прораствание триингов [5]. При этом, как неоднократно отмечалось, изоляция СПЭ не является «восстанавливающейся», поэтому воздействие высокочастотных перенапряжений даже невысокой кратности, для нее крайне неблагоприятно.

Применение ОПН в некоторых случаях позволяет ограничить кратности КП, а также ограничить рост ПВН, что снижает количество повторных пробоев и кратность связанных с ними коммутационных перенапряжений. Что касается частоты переходного процесса, то ее высокое значение не ограничивается аппаратом типа ОПН и опасность повреждения витковой изоляции электрических машин сохраняется.

Гораздо более эффективным мероприятием ограничения КП является применение РС-цепей, снижающих амплитуду и частоту переходного процесса. Однако это приводит к значительному увеличению емкостного тока ОЗЗ, что влечет за собой необходимость его компенсации. Такого рода мероприятия по ограничению КП нуждаются в выделении дополнительного места, что далеко не всегда возможно, и в целом усложняют схему сети.

Гораздо реже для ограничения КП применяется опережающее отключение первого полюса по сравнению с двумя другими (патент фирмы HOLES, Голландия) [1], что реализовано, в частности, в выключателях типа ВБЦ-35 компании «Высоковольтный Союз».

Резюмируя, отметим: основные неблагоприятные явления, связанные с работой ВВ. Это, во-первых, перенапряжения, причиной которых является срез тока в ВДК. Во-вторых – перенапряжения, возникающие в результате повторных пробоев. В-третьих – высокая частота переходного процесса при повторных пробоях.

Среди факторов, влияющих на указанные неблагоприятные процессы (причиной которых являются сами ВВ) есть такие, которые, очевидно, могут быть устранены путем доведения соответствующих характеристик ВВ до требований национального или международного стандарта. Логично рассмотреть в отдельности характеристики ВДК и характеристики привода ВВ.

Нормируемые и ненормируемые характеристики ВВ

Среди основных технических характеристик ВДК, влияющих на процессы при коммутациях ВВ, можно выделить величину тока среза, степень чистоты поверхности контактов, уровень вакуума и т.д.

Ток среза

Существенное влияние на вышеуказанные характеристики оказывает материал контактов – их общее состояние и переходное сопротивление, которое изменяется в процессе эксплуатации ВВ за счет эрозии материала и нагревания контактов.

Величина тока среза в ВВ, в отличие от масляных, воздушных и элегазовых выключателей, согласно общепринятому мнению, зависит лишь от материала контактов. Чем более тугоплавкий металл, тем меньше эмиссия заряженных частиц с поверхности контактов, и тем больше величина тока среза. Однако слишком легкоплавкий материал контактов уменьшает отключающую способность выключателя, поэтому важно выбрать оптимальный вариант. Кроме того, для тугоплавких материалов эмиссия заряженных частиц будет происходить менее интенсивно, что необходимо для увеличения электрической прочности и ограничения воздействия повторных пробоев.

Среди сплавов, которые используют в контактной системе ВДК, присутствуют медь-висмут, медь-сурьма, медь-бериллий, медь-хром.

Степень чистоты контактов

Она, как и общее состояние контактов, существенно влияет на электрическую прочность и, соответственно, на перенапряжения при повторных пробоях, и количество этих пробоев.

Присутствие на электродных поверхностях микровыступов, слабосвязанных частиц, оксидных пленок, загрязнений, диэлектрических и газовых включений понижает электрическую прочность вакуумного промежутка.

Существует несколько способов улучшить состояние поверхности контактов. В первую очередь на стадии изготовления электроды подвергают соответствующей механической обработке, для ликвидации крупных неровностей. Далее идут очистка, обезжиривание, промывка, ультразвуковая обработка, обезгаживание, кондиционирование тлеющим разрядом, током в полувакууме, предпробойным током и пробоями при длительно воздействующих напряжениях [6]. Большинство производителей пренебрегает необходимостью тренировки ВДК, т.е. камеры, которыми комплектуются ВВ, выходят в работу с низкой электрической прочностью, которая лишь частично повышается в процессе эксплуатации.

Приводы и скорость размыкания-замыкания контактов

Приводы в современных ВВ существуют двух типов: электромагнитный и пружинно-моторный. У электромагнитного привода есть один существенный недостаток – необходимость дополнительного источника питания для управления выключателем при аварийном погасании системы оперативного тока.

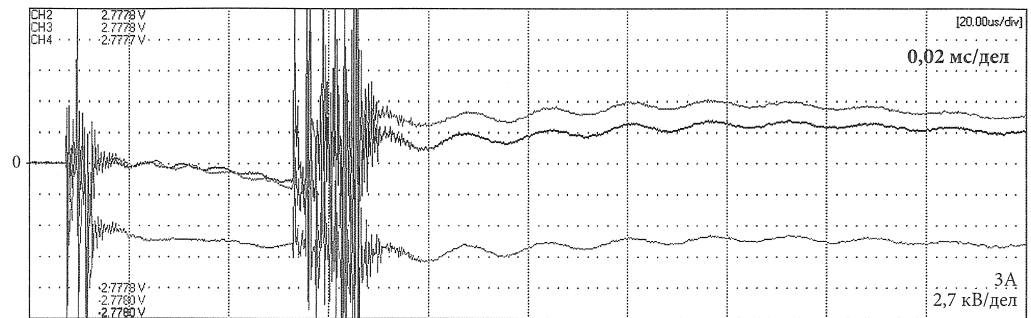
Основной характеристикой обоих типов приводов, влияющих на неблагоприятные процессы, связанные с работой ВВ, является средняя (максимальная) скорость подвижных контактов ВДК при включении/отключении.

Скорости движения подвижного контакта в современных ВВ составляет примерно 0,5–2,0 м/с при включении, что соответствует скорости ВЭП (СВЭП) порядка 20–80 кВ/мс в зависимости от типа выключателя. При отключении скорость движения подвижного контакта примерно в 1,5–2 раза выше. Скорость при отключении ограничивается сильфоном. Ограничения при включении более существенные – необходимо избегать дребезга контактов и предотвращать их повреждение вследствие воздействия высоких динамических усилий при столкновении контактов. Дребезг контактов в какой-то степени можно исключить механическими демпферами.

По некоторым данным [1], в вакуумных выключателях отечественного производства привод является наиболее слабым местом, вызывающим до 80% отказов. Надо полагать, к настоящему времени эта ситуация кардинально не изменилась.

На рис. 1 приведена осциллограмма изменения фазных напряжений при включении отечественного ВВ в сети 10 кВ с мощной двигательной нагрузкой. Явно выражен дребезг контактов, что выражается в большом количестве повторных пробоев в ВДК. Уровень перенапряжений превышает $12U_{фм}$.

РИС. 1.
Осциллограмма фазных напряжений при включении ВВ



Неодновременность замыкания и размыкания контактов

Она вызывает в сети неблагоприятный переходный процесс за счет кратковременной несимметрии фаз, что вызывает перенапряжения большей кратности и оказывает негативное влияние на изоляцию оборудования. Именно дребезг контактов и неодновременность замыкания и размыкания контактов являются прямыми показателями качества работы привода и должны контролироваться в процессе эксплуатации. Необходимо понимать, что вакуумный выключатель не относится к категории необслуживаемого оборудования.

Заключение

Принимая во внимание перечисленные негативные факторы влияния ВВ на сеть, необходимо предъявлять жесткие требования к определенным характеристикам таких выключателей с целью ограничения доступа на рынок ВВ некачественного исполнения. К этим характеристикам относятся, в частности, величина тока среза, степень чистоты поверхности контактов, средняя и максимальная скорости размыкания и замыкания контактов, дребезг контактов, неодновременность замыкания и размыкания контактов по ходу и по времени.

На основании результатов ряда исследований, проведенных ООО «Болид» за последние 2–3 года, можно сделать некоторые выводы.

В частности, применение ВВ отдельных типов в сетях средних классов напряжения (особенно в городских распределительных сетях), где используются кабели с изоляцией из СПЭ, представляется нецелесообразным вследствие ускоренной деградации изоляции этих кабелей. Очевидно, огромный коммутационный и механический ресурс, которым обладают ВВ, в таких сетях оказывается просто невостребованным. Для разработки рекомендаций по обеспечению совместимости вакуумных выключателей и кабельных линий с изоляцией СПЭ, либо отказе от применения ВВ в таких сетях, требуется проведение дополнительных исследований. В рамках этих исследований необходимо определить амплитудные и частотные характеристики переходных процессов, сопровождающих коммутации ВВ в сетях с кабелями с изоляцией СПЭ, на ряде реальных объектов.

Следует понимать, что для разработки требований и нормирования параметров ВВ необходимо провести обширные измерения коммутационных перенапряжений в сетях различной конфигурации, оснащенных ВВ различных типов отечественного и зарубежного производства. Кроме того, эксплуатирующим организациям нужно самостоятельно вести статистику повреждений кабелей с изоляцией СПЭ 6–35 кВ при наличии ВВ, проводить мониторинг изоляции СПЭ неразрушающими методами контроля с оценкой

состояния изоляции, а также обязательным пунктом включать в программы плановых обследований силового оборудования 6–35 кВ снятие механических характеристик вакуумных коммутационных аппаратов.

Возникает вопрос – какие же аппараты предпочтительнее для применения в распределительных сетях? Ответ таков – либо элегазовые выключатели, либо, как не странно это прозвучит, маломасляные. Такие аппараты не вызывают высокочастотных коммутационных перенапряжений. К сожалению, маломасляники считаются «вчерашним днем», а элегазовые выключатели существенно дороже вакуумных. Выбор остается за эксплуатационниками.

Литература

1. Ключенович В.И. Выключатели переменного тока высокого напряжения. Рекомендации по выбору и справочные данные. Новосибирск: НГТУ, 2004.
2. Кудрявцев А. Исследование аварийности в сетях 6–10 кВ горно-металлургических предприятий // Новости ЭлектроТехники. 2009. № 6(60).
3. Кадомская К.П. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 343 с.
4. Иванов А.В., Дегтярев И.Л. Теоретические и экспериментальные исследования электрофизических процессов и характеристик вакуумной дугогасительной камеры при коммутации электродвигателей // Нефтегазовое дело. 2007.
5. Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Особенности проектирования и эксплуатации // Новости ЭлектроТехники. 2007. № 1(43).
6. Емельянов А.А., Емельянова Е.А. Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме. М.: Физматлит, 2009. 160 с.

Роль осциллографирования переходных процессов в повышении качества эксплуатации систем электроснабжения

Леонид Александрович Кучумов,
к.т.н., профессор СПбГПУ,
заведующий электротехнической лабораторией
ЗАО «НПФ «Энергосоюз», г. Санкт-Петербург

Выполнение измерений в электрических сетях в большинстве случаев ассоциируется с получением численных значений (графиков изменения во времени) действующих величин токов, напряжений, активных и реактивных мощностей. В случаях гармонических искажений и несимметрии напряжений и токов обычно стремятся иметь информацию о действующих значениях отдельных гармоник и о коэффициентах, характеризующих несимметрию трехфазной сети.

Применение современной измерительной техники однозначно подразумевает, что сначала производится оцифровка мгновенных значений токов и напряжений с частотами 5 кГц и выше, а затем выполняется по определенным алгоритмам расчет действующих значений и других показателей искаженных сигналов. На выходе и в памяти наиболее распространенных измерительных приборов, ориентированных на указанные действия, фиксируются (хранятся) только цифровые значения сигналов, рассчитанных на временном интервале не менее одного периода промышленной частоты (0,02 с). Информация о мгновенных значениях предварительно измеренных токов и напряжений не хранится и не отображается.

Процедуры измерения, отображения и хранения для последующей обработки мгновенных значений переменных на достаточно длительных промежутках времени принято называть осциллографированием. Создание цифровых многоканальных осциллографов – сложная, но на современном этапе успешно решаемая задача.

Постоянное осциллографирование – требование времени

Осциллографирование процессов традиционно применялось при пусках и наладке электрооборудования, устройств автоматики и регулирования. При использовании измерительной техники старого поколения имелись ограничения как по числу осциллографируемых переменных, так и по длительности записи процессов. Качественные измерения были искусством, подвластным только квалифицированным специалистам. Инженеры энергосистем со стажем помнят мучения, связанные с эксплуатацией светолучевых электромеханических шлейфных осциллографов, устанавливавшихся на подстанциях для наблюдения за аварийными переходными процессами.