

Применение ОПН для защиты кабелей 6–500 кВ

Михаил ДМИТРИЕВ,
заместитель генерального директора
по научной работе, ПКБ «РосЭнергоМонтаж», г. Санкт-Петербург, к.т.н.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации оборудования его изоляция подвергается воздействию не только рабочего напряжения сети, но и различных видов перенапряжений, таких, как грозовые, коммутационные, квазистационарные (среди них выделяют режимные, резонансные, феррорезонансные, дуговые).

Основную опасность перенапряжения представляют для внутренней изоляции оборудования, поскольку она не является самовосстанавливающейся, т.е. её пробой приводит к необходимости длительного дорогостоящего ремонта. Перекрытия же внешней изоляции (например, изоляции воздушной линии) хотя и приводят к короткому замыканию, и вызывают отключение оборудования и потребителей, но для самой изоляции не опасны, и не требуется её ремонт.

Для защиты изоляции оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений в сетях всех классов номинального напряжения используются ограничители перенапряжений нелинейные типа ОПН (раньше для этих целей применялись разрядники вентильные РВ).

ОПН не предназначены для ограничения квазистационарных перенапряжений в силу недостаточной энергоёмкости нелинейных элементов. Поэтому для борьбы с этим видом перенапряжений:

- в сетях всех классов номинального напряжения исключаются схемы, в которых могут развиваться неблагоприятные процессы;
- применяется оборудование с антирезонансными свойствами;
- в сетях 6–35 кВ применяется резистивное заземление нейтрали.

Одна из важных областей применения ОПН — это защита кабельных линий от грозовых и коммутационных перенапряжений, которой и посвящена эта статья. Что касается необходимости установки ОПН у силовых трансформаторов и на сборных шинах, то перечисленные вопросы здесь рассматриваться не будут.

ЗАЩИТА ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Традиционно считалось, что в сетях 6–220 кВ основную опасность для изоляции оборудования несут лишь грозовые перенапряжения, а коммутационные в силу больших запасов прочности не являются определяющими.

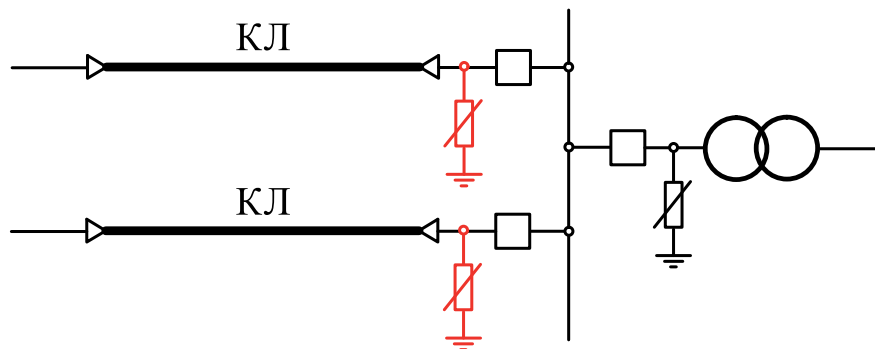
Так, например, согласно ГОСТ [1] прочность изоляции оборудования при воздействии коммутационных импульсов нормировалась лишь для сетей 330–750 кВ, а изоляция оборудования 6–220 кВ испытывалась только грозовыми импульсами и одноминутным напряжением промышленной частоты.

Такой же вывод можно сделать и из ГОСТа [2], по которому на классы 6–220 кВ промышленность выпускала разрядники серий РВО, РВС, РВМГ, срабатывавшие лишь от перенапряжений большой кратности, характерных при грозовых процессах. Защита изоляции оборудования от коммутационных перенапряжений могла быть выполнена только с помощью комбинированных разрядников серии РВМК, которые на классы 6–220 кВ в нормах отсутствовали, а производились и устанавливались только на классы 330 кВ и выше.

Поэтому первый вопрос, который возникает у проектировщиков: требуется ли защита кабельных линий 6–220 кВ с помощью ОПН, если они проложены в городских кабельных сетях и сетях промышленных предприятий, где нет грозовых перенапряжений? Т.е. грозовых перенапряжений в городских кабельных сетях нет, а коммутационные, если верить ГОСТу [1,2], не опасны. Значит ли это, что при проектировании таких сетей (рис. 1) кабельные линии можно не защищать от перенапряжений при помощи ОПН, установленных в их концах?

Стоимость ОПН ничтожно мала на фоне таковой для кабельной линии. Например, трёхфазный комплект ОПН 110 кВ стоит около 100 тыс. руб., тогда как кабельная линия 110 кВ с учётом её монтажа —

Рис.1. Участок кабельной сети. Цветом показаны те ОПН, необходимость которых вызывает сомнение



до 100 млн рублей за каждый километр трассы. Из-за этого проектировщики предпочитают не брать на себя ответственность и предусматривают в схемах защитные ОПН. Однако попробуем всё же ответить на вопрос: «Нужен ли ОПН в городских кабельных сетях 6—220 кВ?» — не с экономической, а с технической точки зрения.

Опасность для изоляции оборудования коммутационных перенапряжений (напомним, что грозовых перенапряжений в городских сетях нет) определяется двумя факторами:

- прочностью изоляции оборудования;
- уровнем перенапряжений, т.е. свойствами выключателей.

Со времён выпуска ГОСТов [1, 2] требования к прочности изоляции сетей не менялись, а вот парк выключателей изменился — вместо масляных и воздушных выключателей теперь в сетях применяются вакуумные и элегазовые. Следовательно, вопрос о необходимости защиты изоляции городских кабельных сетей 6—220 кВ можно заменить другим вопросом: не привела ли замена выключателей на новые к росту величины коммутационных перенапряжений или к критичному изменению формы их импульсов? Если вакуумные и элегазовые выключатели при своей работе создают более опасные перенапряжения (по величине и форме), чем старые масляные и воздушные, то защита от коммутационных перенапряжений может потребоваться, если же менее опасные — то защита заведомо не требуется, ведь даже раньше она была не нужна.

По моему мнению, в сетях 6—220 кВ после обновления парка выключателей коммутационные перенапряжения стали менее опасными, то есть в городских сетях установка ОПН на кабельных линиях для их защиты от коммутационных перенапряжений и раньше-то не требовалась, а теперь и тем более не нужна. Такого же мнения придерживаются известные специалисты в работах [3, 4].

У выключателей есть три характеристики, которые непосредственно влияют на создаваемые ими коммутационные перенапряжения:

- ток среза $i_{ср}$;
- скорость du/dt восстановления электрической прочности между контактами после гашения дуги;
- критическая скорость подхода тока к нулю, при которой ещё возможно гашение дуги.

Ток среза — это величина тока, которую выключатель может самопроизвольно оборвать, погасив дугу, не дожидаясь перехода переменного тока через нулевое значение.

При отключении индуктивных элементов, таких, как реакторы и трансформаторы, мгновенный обрыв тока (срез тока) приводит к перенапряжениям, ведь индуктивность не допускает скачкообразного изменения тока. Поскольку у современных вакуумных и элегазовых выключателей ток среза составляет не более 2—3 А, что меньше тока среза масляных и воздушных выключателей, то опасности для оборудования нет. Строго говоря, ток среза — это такое явление, которое никак не проявляет себя при коммутации кабельных линий, представляющих собой скорее ёмкость, чем индуктивность, и поэтому мог здесь не рассматриваться.

Скорость восстановления электрической прочности определяет число пробоев промежутка между контактами, которые могут быть при коммутации. Если при отключении присоединения дуга в выключателе погасла, то между контактами возникнет напряжение, и промежуток должен его выдержать. Если скорость восстановления прочности промежутка была недостаточной, то напряжение между контактами после гашения дуги приведёт к пробую промежутка и новому зажиганию дуги. Поскольку каждый новый пробой — это, по сути, новое включение присоединения и перезаряд его ёмкости с одного напряжения на другое, то на присоединении возникают коммутационные перенапряжения, причём более высокой величины, чем при обычном его включении под сетевое напряжение.

У современных вакуумных и элегазовых выключателей скорость восстановления прочности больше, чем у масляных и воздушных. Поэтому коммутации кабельных линий современными выключателями не сопровождаются повторными пробоями межконтактного промежутка и коммутационными перенапряжениями повышенной кратности.

Критическая скорость подхода тока к нулю также является тем параметром, который определяет число пробоев межконтактного промежутка, а значит, и уровень коммутационных перенапряжений.

ЗАЩИТА КЛ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Критическая скорость подхода тока к нулю характеризует способность выключателя гасить токи той или иной частоты. Скажем, вакуумный выключатель способен гасить токи даже очень большой частоты, ведь вблизи от момента перехода переменного тока через нулевое значение дуга в вакууме способна к быстрому распаду (таковы свойства вакуума). Элегазовый выключатель, напротив, не способен гасить токи высокой частоты, потому что за то небольшое время, когда переменный ток дуги находится вблизи от нулевого значения синусоиды, процессы распада дуги не успевают завершиться. Иными словами, элегазовый выключатель надёжно гасит лишь токи низкой частоты, которые находятся вблизи от нулевого значения синусоиды такое время, которое достаточно для гашения и распада дуги. Поясним, почему способность вакуумного выключателя гасить токи практически любой частоты в некоторых случаях чревата появлением опасных коммутационных перенапряжений.

Положим, что выключатель получил команду на отключение трёхфазного присоединения, токи фаз которого имеют сдвиг в 120 градусов. Пусть в фазе «А» ток промышленной частоты оказался близок к нулевому значению синусоиды, и поэтому практически сразу после получения команды на отключение в фазе «А» дуга погаснет, что приведёт к неполнофазному питанию присоединения по фазам «В» и «С». В этих двух фазах кроме тока промышленной частоты появится ток более высокой частоты, связанный с переходным процессом в схеме, начавшимся после гашения дуги в фазе «А», и образованием упомянутого неполнофазного режима. Элегазовый выключатель никак не отреагировал бы на появление в своём отключаемом токе составляющих высокой частоты, наложенных на ток 50 Гц. Вакуумный же выключатель, напротив, при достаточной величине высокочастотной составляющей тока в сравнении с током 50 Гц может среагировать на неё и погасить ток не в ноль тока промышленной частоты, а в один из нулей суммарного тока, имеющего и 50 Гц, и высокую частоту. Причём тут следует отметить, что нулей суммарного тока может быть много, и они появляются сразу же после гашения тока в фазе «А», т.е. уже при малом ходе расходящихся контактов. Получается, что вакуумный выключатель за счёт реакции на ток высокой частоты погасит дугу фаз «В» и «С» практически сразу же за тем, как дуга погасла в фазе «А». Иными словами, команда на отключение присоединения только получена, а во всех трёх фазах дуга уже погасла (в фазе «А» — за счёт естественного перехода через ноль тока 50 Гц, в фазах «В» и «С» — за счёт реакции выключателя на ток высокой частоты, появившийся после гашения дуги фазы «А»).

Быстрое гашение дуги, которое произошло сразу же после получения команды на отключение,

т.е. при малом ходе расходящихся контактов, плохо тем, что между контактами в силу их близости ещё нет достаточной прочности. Следовательно, после гашения дуги напряжение, которое появится между контактами, наверняка вызовет повторный пробой, а он, как было пояснено ранее, приводит к перезаряду ёмкости присоединения и коммутационным перенапряжениям более высокой кратности, чем при простом включении с нулевыми начальными условиями.

Способность вакуумного выключателя отключать токи и низкой, и высокой частоты — это его замечательное свойство, которое полезно, например, в различной аппаратуре специального назначения. Но в энергетике, где токи имеют частоту 50 Гц, способность отключать высокочастотные токи, к сожалению, является лишней и портит репутацию вакуумного выключателя, поскольку порождает коммутационные перенапряжения.

На самом деле проблема реакции выключателя на токи высокой частоты есть лишь там, где эти токи заметны на фоне тока промышленной частоты. Такая ситуация иногда встречается при коммутациях двигателей [3, 4], а вот при коммутации кабельных линий в городских кабельных сетях она нехарактерна.

Поэтому защита от коммутационных перенапряжений в сетях 6—220 кВ как не требовалась раньше, так и теперь не требуется. Исключение составляют сети, содержащие двигатели 6—10 кВ, коммутация которых вакуумными выключателями из-за повторных пробоев вследствие быстрого гашения дуги тока, содержащего компоненты высокой частоты, требует установки средств защиты изоляции от коммутационных перенапряжений. Строго говоря, двигатели в сравнении с другим оборудованием сети имеют самые маленькие запасы прочности изоляции, и поэтому их защита от перенапряжений рекомендуется всегда, вне зависимости от типа коммутационного аппарата.

Несмотря на приведённые соображения, свидетельствующие об отсутствии в городских сетях необходимости в ОПН по концам кабельных линий, такие ОПН встречаются часто. Если в сетях 110—220 кВ это и можно объяснить, например, высокой стоимостью и ответственностью кабельных линий, то для линий 6—35 кВ наличие ОПН в кабельных ячейках вызывает удивление. Дело в том, что хотя ОПН способен ограничивать коммутационные перенапряжения, в сетях 6—35 кВ его эффективной работы не получается. Это связано с тем, что любой ОПН начинает пропускать через себя заметные токи лишь при напряжениях в два раза больше его наибольшего рабочего, которое в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью 6—35 кВ выбирается равным линейному напряжению сети. Значит, ОПН

6—35 кВ начинает пропускать токи и ограничивать тем самым перенапряжения лишь при их кратности более $1,73 \cdot 2 = 3,5$ о.е. по отношению к фазному напряжению сети. Вместе с тем большинство коммутационных перенапряжений имеет величину не более 3,0 от фазного напряжения сети, т.е. меньше той величины 3,5 о.е., при которой ОПН эффективно вступает в работу.

Итак, в городских кабельных сетях защита кабельных линий 6—35 кВ от коммутационных перенапряжений не требуется по двум причинам:

- при любом типе выключателей не возникает коммутационных перенапряжений, опасных для изоляции кабелей;
- даже если бы опасные перенапряжения и возникли, то современные ОПН, выбранные на линейное напряжение сети с изолированной и компенсированной нейтралью, малоэффективно бы их ограничивали.

Несмотря на приведённые общеизвестные аргументы, зачастую каждая ячейка кабельной линии 6, 10, 20 кВ имеет комплект ОПН, отчасти из-за малой стоимости ОПН. Вместе с тем возможный ущерб в случае некачественного изготовления ОПН и его повреждения колоссален — это не только выгорание ячейки, но и в ряде случаев короткое замыкание на сборных шинах с их полным погашением.

Что касается кабельных линий 110—220 кВ, то здесь так же, как и в сетях 6—35 кВ, коммутационные перенапряжения в большинстве случаев имеют кратность не более 3,0, что неопасно для изоляции. Однако в отличие от 6—35 кВ в сетях 110—220 кВ применение ОПН имеет какой-то смысл, ведь они выбираются не на линейное, а на фазное напряжение сети, и поэтому ограничивают перенапряжения не до уровня 3,5, а до 2,0. Снижение перенапряжений с уровня 3,0 до 2,0 можно считать полезным с точки зрения экономии ресурса изоляции кабельных линий 110—220 кВ.

кабельные, ведь основным источником грозовых перенапряжений как раз и являются разряды молнии в воздушные линии.

Например, если имеется кабельная вставка в воздушную линию 6—500 кВ, то на переходных опорах в обоих концах вставки устанавливаются комплекты ОПН соответствующего класса напряжения (рис. 2а). Если же кабельная вставка используется для организации захода воздушной линии в распределительное устройство (например, в КРУЭ), то тогда ОПН ставят в месте перехода ВЛ в кабельную линию, а на конце кабельной линии со стороны распределительного устройства ОПН ставят реже, ведь они уже имеются на сборных шинах и у силовых трансформаторов (рис. 2б).

Перечисленные правила расстановки ОПН для защиты изоляции кабельных линий от грозовых перенапряжений являются простыми и понятными. Однако иногда экспертные организации требуют корректировки проектов и снижения числа защитных ОПН, ссылаясь при этом на один из пунктов 2-й главы ПУЭ, который гласит: «Кабельные вставки в ВЛ при их длине менее 1,5 км должны быть защищены по обоим концам кабеля от грозовых перенапряжений трубчатыми или вентильными разрядниками...».

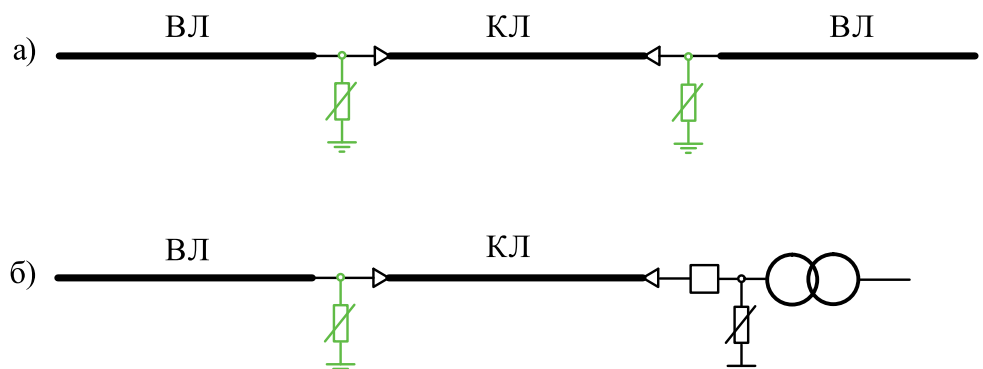
Из этого пункта ПУЭ следует, что при длине кабельных вставок более 1,5 км установка ОПН по концам не требуется. С этим нельзя согласиться.

Зависимость схемы защиты от длины кабельной вставки действительно имеет обоснование. Дело в том, что у кабельной линии низкое волновое сопротивление, и грозовые волны, переходя из воздушной линии в кабель, первоначально снижают свою величину, но далее в результате серии отражений волн от концов кабельной линии напряжение на кабеле возрастает и может представлять опасность для его изоляции. Чем длиннее кабель, тем больше волне требуется времени для пробега от начала в конец и обратно, а это значит, что вряд ли в резуль-

ЗАЩИТА ОТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Необходимость защиты от грозовых перенапряжений кабельных линий любых классов напряжения (от 6 до 500 кВ) на первый взгляд не вызывает сомнения, и поэтому при проектировании кабельных линий в их концах, как правило, предусматривается установка ОПН. В первую очередь ОПН ставят в местах перехода воздушных линий в

Рис. 2. Кабельная вставка в воздушную линию (а) и кабельный заход воздушной линии в распределительное устройство (б). Цветом показаны те ОПН, которые требуют обязательной установки



ЗАЩИТА КЛ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

тате серии отражений волн напряжение на кабеле успеет вырасти до опасного значения, ведь по мере распространения волны вдоль кабеля она затухает. Наверное, разработчики ПУЭ посчитали, что для кабельных линий длиной более 1,5 км процесс нарастания напряжения в кабеле настолько растянут во времени, что рост напряжения будет остановлен на безопасном для изоляции уровне за счёт затухания волн по мере их распространения вдоль кабеля от начала в конец и обратно.

Вместе с тем есть ещё один случай появления грозовых перенапряжений на изоляции кабельных вставок, который явно не учтён в ПУЭ, — это разряд молнии в опору переходного пункта. При таком разряде ток молнии, стекая с тела опоры в землю, создаёт на теле опоры и траверсе значительный потенциал, способный вызвать пробой изоляции муфты с её заземлённого корпуса на жилу кабеля. Единственный способ защитить муфту от подобного пробоя — это установить рядом с ней ОПН, причём необходимость такого ОПН имеется на каждом конце кабеля у каждой концевой муфты и никак не зависит от длины кабельной линии.

Итак, требования ПУЭ, допускающие не защищать кабельные вставки длиной более 1,5 км, безусловно, являются ошибочными! Любые переходные опоры вне зависимости от длины кабельной линии должны оснащаться комплектами ОПН для защиты концевых муфт от грозовых перенапряжений.

ЗАЩИТА ОБОЛОЧКИ КАБЕЛЯ

Современные линии зачастую выполняются однофазными кабелями, которые имеют жилу, изоляцию, медный экран, оболочку. В таких случаях, помимо защиты главной изоляции, обсуждения требуют и вопросы ограничения перенапряжений на оболочке, от целостности которой зависит возможность попадания в кабель влаги.

Необходимость защиты оболочки от перенапряжений возникает потому, что в настоящее время с целью борьбы с токами и потерями в экранах, которые имеют место при простом двустороннем заземлении экранов (рис. 3а), распространение получили схемы одностороннего заземления экранов (рис. 3б) или транспозиции экранов (рис. 3в). Именно в незаземлённом конце экрана или в узле транспозиции экранов и надо предусматривать установку специальных экранных ОПН, которые размещаются или в концевых коробках КК-ОПН, или в коробках транспозиции КТ-ОПН.

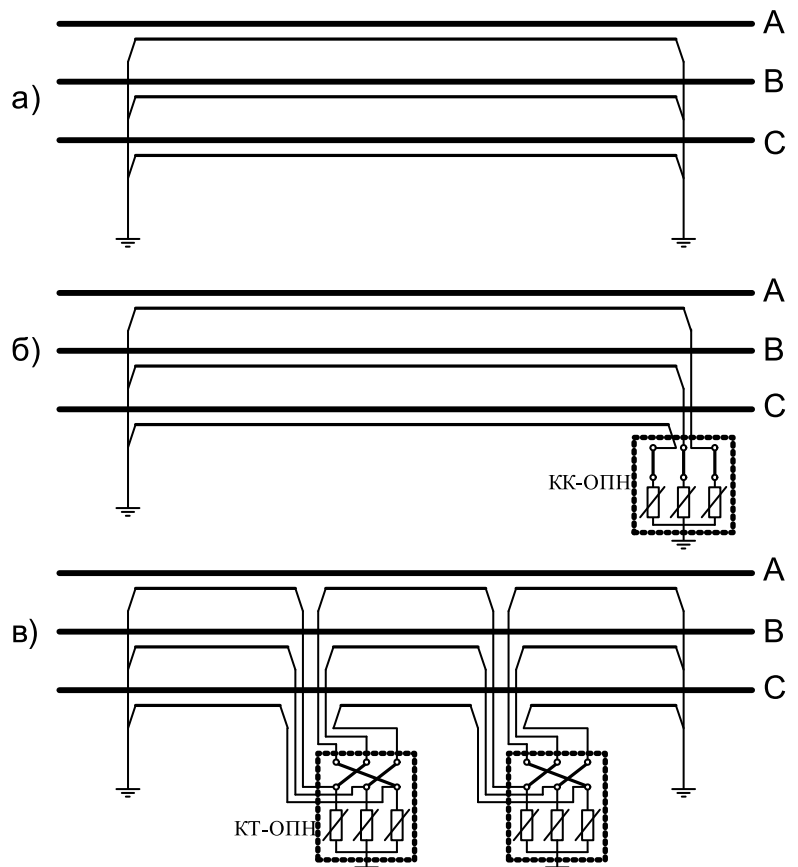
Механизм возникновения грозовых и коммутационных перенапряжений между экраном и землёй описан в [5], где также приводятся соображения по выбору характеристик экранных ОПН.

Основными характеристиками ОПН являются наибольшее рабочее напряжение и энергоёмкость. Поскольку оболочка силового однофазного кабеля вне зависимости от класса его номинального напряжения имеет одну и ту же толщину порядка 5—6 мм (примерно отвечает по прочности изоляции класса 6 кВ), то для её защиты от перенапряжений можно применять один и тот же ОПН класса 6 кВ.

Иными словами, главная изоляция кабеля между жилой и экраном защищается ОПН соответствующего класса напряжения (от 6 до 500 кВ), устанавливаемыми по концам кабеля у его концевых муфт (если речь идёт о городских кабельных сетях 6—220 кВ, то такие ОПН могут отсутствовать). А вот оболочка кабеля:

- вне зависимости от наличия силовых ОПН по концам кабельной линии должна защищаться экранными ОПН, размещаемыми или в месте заземления экранов, или же в узлах транспозиции экранов;

Рис. 3. Основные схемы соединения и заземления экранов однофазных силовых кабелей 6—500 кВ: двустороннее заземление (а), одностороннее заземление (б), транспозиция экранов (в)



- экранированные ОПН всегда должны быть класса напряжения 6 кВ.

Попытки применить для защиты оболочки кабеля ОПН класса напряжения менее 6 кВ (скажем, 1,5 или 3 кВ) неизменно заканчиваются повреждением таких ОПН, и по этой причине настоятельно не рекомендуются. К сожалению, серия поврежденных экранированных ОПН на кабельных линиях, связанная с неверным выбором рабочего напряжения ОПН, почему-то породила желание «на всякий случай» применять ОПН повышенной энергоёмкости, хотя существующая энергоёмкость 2—3 кДж/кВ была с запасом достаточной и не являлась причиной повреждений.

Например, в ряде проектов теперь можно найти требования к энергоёмкости ОПН на уровне 7—10 кДж/кВ (приведено к наибольшему рабочему напряжению ОПН и указано для одного импульса тока). Такие значения энергоёмкости фактически отвечают предельным значениям, которые в настоящее время способна выпускать промышленность. Что касается технической необходимости в столь мощных ОПН, то она полностью отсутствует, ведь согласно опыту эксплуатации, компьютерным расчётам, а также согласно известному стандарту ОАО «ФСК ЕЭС» [6] с запасом достаточным является значение 2—3 кДж/кВ.

Попытка заложить в проекты ОПН с энергоёмкостью более 2—3 кДж/кВ не только не имеет технического смысла, но и крайне вредна, поскольку влечёт за собой значительное увеличение габаритов ОПН и кабельных коробок заземления и транспозиции экранов, в которые такие ОПН устанавливаются. Например, в типовых колодцах транспозиции экранов оказывается невозможным разместить коробку транспозиции экранов с ОПН 7-10 кДж/кВ хотя бы потому, что она не проходит в крышку люка этого колодца.

Также известны проекты кабельных линий, где экранированный ОПН считался своеобразной «приставкой», «дополнением», «продолжением» силового ОПН, и на этом основании энергоёмкость экранированного ОПН принималась такой же, как и у силового ОПН, т.е. более 2—3 кДж/кВ, порождая тем самым упомянутые проблемы с габаритами кабельных коробок заземления и транспозиции экранов.

Ещё раз хочется отметить, что экранированные ОПН вне зависимости от параметров силовых ОПН — это всегда ОПН класса 6 кВ с энергоёмкостью около 2—3 кДж/кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Защита кабельных линий 6—35 кВ от коммутационных перенапряжений при помощи ОПН не требуется вне зависимости от типа выключателя. Исключение составляют те кабельные линии 6 и 10 кВ, которые питают двигательную нагрузку. Для них установка ОПН нужна, но скорее с целью

защиты двигателя, нежели изоляции самого кабеля.

2. Защита кабельных линий 110—220 кВ от коммутационных перенапряжений при помощи ОПН рекомендуется, а линий 330—550 кВ — является обязательной.
3. Защита кабельных линий 6—500 кВ от грозовых перенапряжений требуется вне зависимости от их протяжённости. В частности, в местах перехода воздушных линий в кабельные и обратно рядом с концевыми кабельными муфтами следует устанавливать ОПН соответствующего класса напряжения. Требования ПУЭ, разрешающие не защищать от грозовых перенапряжений кабельные вставки длиной более 1,5 км, являются ошибочными.
4. Защита оболочки однофазных кабелей 6—500 кВ от грозовых и коммутационных перенапряжений должна осуществляться в схемах с односторонним заземлением экранов или транспозицией экранов вне зависимости от схемы защиты главной изоляции. В качестве защитного аппарата для оболочки следует использовать ОПН класса напряжения 6 кВ с энергоёмкостью 2—3 кДж/кВ. Применение ОПН класса напряжения менее 6 кВ или с энергоёмкостью более 2—3 кДж/кВ является ошибочным, чреватым проблемами при монтаже и авариями при эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции: Межгос. стандарт. — Введ. 01.01.99. — М.: Издательство стандартов, 1998. — 50 с.
2. ГОСТ 16357-83. Разрядники вентильные переменного тока на номинальное напряжение от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия: Межгос. стандарт. — Введ. 01.07.84. — М.: Издательство стандартов, 1983. — 26 с.
3. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6—35 кВ. — СПб.: Изд-во «Терция», 2004. — 188 с.
4. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения. СПб.: Изд-во Терция, 2002. — 146 с.
5. Дмитриев М.В. Перенапряжения на изоляции экранов однофазных силовых кабелей 6—500 кВ и защита от них // КАБЕЛЬ-news / № 11, ноябрь 2008, с. 56—62.
6. СТО 56947007-29.060.20.103-2011. «Силовые кабели. Методика расчёта устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110—500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена». Москва, ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.