

С каждым годом возрастает число воздушных линий классов 35–500 кВ, на которых появляются кабельные участки. Места сопряжения воздушных линий с кабельными называются переходными пунктами. Их оптимальная конструкция и требования к достаточной величине сопротивления заземления – сложные вопросы, пока слабо освещенные в нормативных документах и публикациях.

При этом неверный выбор сопротивления заземления опоры переходного пункта может вызывать периодические повреждения экранных ОПН и пробой оболочки кабельных линий, считает Михаил Викторович Дмитриев.

КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ 35-500 кВ

Требования к заземлению переходных опор

Переходные пункты (ПП) воздушно-кабельных (кабельно-воздушных) линий имеют разнообразное исполнение как по составу оборудования, так и по способам его размещения. Помимо базовых для любого ПП кабельных муфт и ограничителей перенапряжений (ОПН), на ПП также могут быть установлены:

- конденсаторы связи и заградители;
- разъединители и даже выключатели;
- измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Принимаемые технические решения зависят, например, от того, какая из задач возлагается на ПП – простой переход воздушной линии (ВЛ) в кабельную (КЛ) или же отпайка от ВЛ, выполненная кабелем. Также решения зависят от того, где именно на трассе ВЛ планируется кабельный участок.

Конденсаторы связи и заградители могут требоваться, если кабельный участок расположен не в средней части ВЛ, а примыкает к распределительному устройству (РУ). Разъединители незаменимы, если при помощи КЛ выполняется отпайка от ВЛ. Они могут оказаться полезны и на любой другой воздушно-кабельной линии, так как делают проще подготовку к испытаниям КЛ или к поиску места ее повреждения.

Измерительные трансформаторы на ПП ставят достаточно редко, хотя они помогли бы решить важную задачу – организацию селективного автоматического повторного включения (АПВ) линии, предполагающего разрешение на повторное включение, если повреждение было на участке ВЛ, и запрет, если на участке КЛ [1].

ОПН должны быть неотъемлемыми элементами любого ПП вне зависимости от длины ВЛ и КЛ. К сожалению, положения

- **Фото 1.** Размещение оборудования переходных пунктов: а) на отдельной площадке или на земле; б) на опоре



Михаил Дмитриев,
к.т.н., доцент
Санкт-Петербургского
политехнического университета
Петра Великого

ПУЭ давно не обновлялись и до сих пор содержат утверждение, разрешающее не устанавливать ОПН при длине КЛ более 1,5 км. Ошибочность этого пункта ПУЭ доказана и расчетами, и опытом эксплуатации.

Оборудование ПП может быть расположено как на земле вокруг опоры ВЛ (фото 1а), так и непосредственно на самой опоре (фото 1б). В первом случае ПП становится компактным РУ, и требования к его заземлению указаны в нормативных документах (до 0,5 Ом). Во втором же случае ПП воспринимается не как РУ, а как опора ВЛ, и «привычное» сопротивление заземления здесь составляет 10–20 Ом и даже более.

Постараемся разобраться, какие на самом деле надо предъявлять требования к заземлению опор ВЛ, на траверсах которых установлено оборудование ПП (фото 1б).

РАСЧЕТНЫЕ СЛУЧАИ

Конструкция типового ПП, размещенного на опоре ВЛ, представлена на рис. 1 и относится в первую очередь к сетям 35 кВ и выше, где применяются однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Каждый такой кабель обладает медным экраном, который выведен из концевой муфты на изолированную плиту и далее при помощи соединительного провода с полиэтиленовой изоляцией (ППС) соединен уже с заземляющим устройством (ЗУ) опоры через кабельную коробку.

Для КЛ с однофазными кабелями известны разные схемы заземления экранов, однако основных лишь три:

- двустороннее заземление;
- одностороннее заземление (рис. 2а);
- транспозиция экранов (рис. 2б).

При выполнении одностороннего заземления экраны кабеля заземляются со стороны РУ, а на опоре ПП они соединены с ЗУ при помощи ОПН класса 6–10 кВ, устанавливаемых в концевой коробке типа КК-ОПН (рис. 1).

Для иных схем (двустороннее заземление или транспозиция) экраны на ПП соединяются с ЗУ при помощи металлических перемычек, устанавливаемых в концевой коробке типа КК. Применение коробок КК-ОПН или КК делает простым и безопасным обслуживание КЛ, предполагающее проведение периодических испытаний оболочки кабеля.

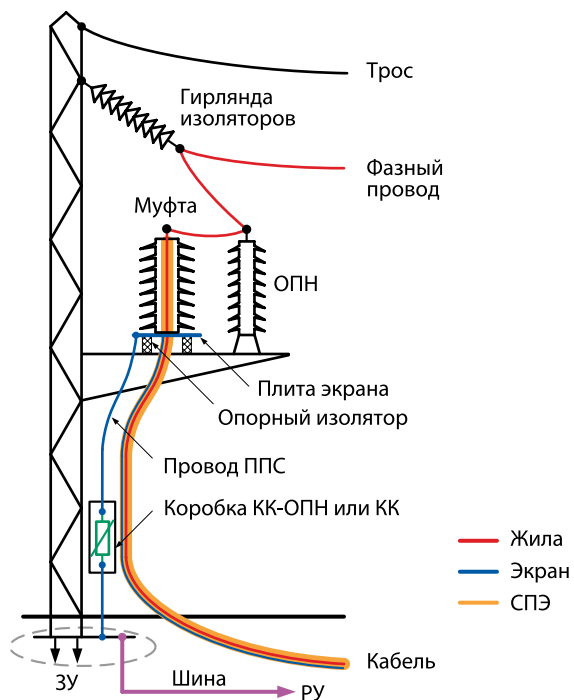
На рис. 1 показана шина, соединяющая ЗУ опоры и контур РУ. Такая шина в нашей стране почти не применяется, хотя и нашла распространение за рубежом. Она выполняет две функции:

- для КЛ 35–500 кВ снижение сопротивления ЗУ опоры ПП за счет его объединения с контуром заземления РУ;
- для КЛ 110–500 кВ снижение напряжения промышленной частоты, наведенного на односторонне заземленные экраны при однофазных коротких замыканиях.

Данная шина выполняется медным проводником весьма большого сечения (до 500 мм²), который помещен в изоляцию. Использование в роли шины традиционной стальной полосы не позволит достичь оцутимого эффекта и потому бессмысленно.

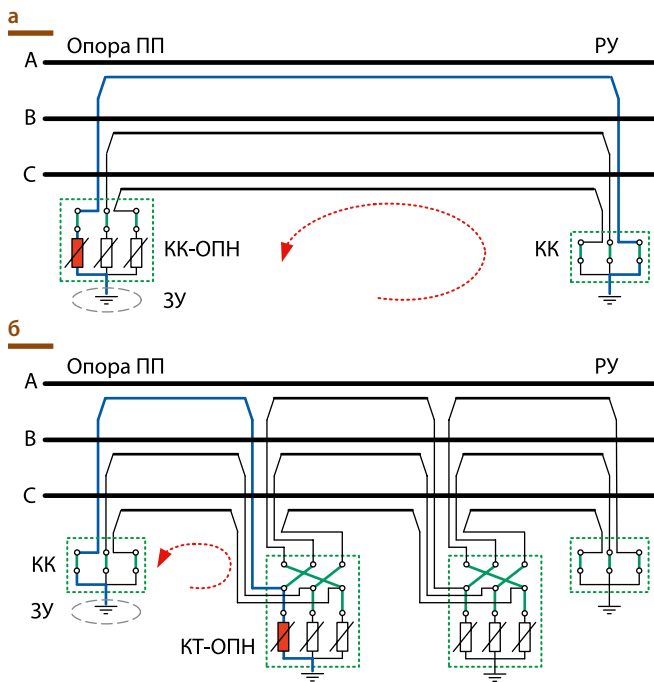
Конструкция типового переходного пункта

Рис. 1 •



Ток в экране и ЗУ при повреждении в концевой коробке (а) или в коробке транспозиции (б)

Рис. 2 •

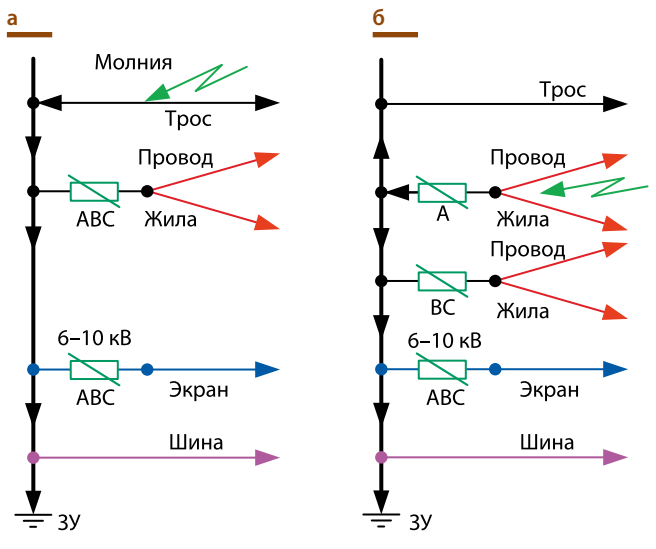


Выскажу соображения, которые могли бы обосновать требования к величине сопротивления ЗУ. Такие требования зависят не только от наличия или отсутствия медной шины, но и от числа молниезащитных тросов, присоединенных к опоре ПП, от их поперечного сечения и схемы заземления (на каждой опоре или нет). Другим немаловажным фактором является и число цепей ВЛ и КЛ, размещенных на ПП, – одна или две. Число цепей влияет потому, что для двухцепной линии к опоре присоединено в два раза больше ОПН и экранов кабеля, а значит, существеннее их помощь контуру ЗУ в деле отведения токов с тела опоры.

Токи в контуре ЗУ могут появляться главным образом по трем причинам:

1. Разряд молнии в опору ПП, в трос, в фазный провод.
2. Короткое замыкание (КЗ) на опоре ПП.
3. Нарушение в схеме заземления экранов КЛ.

• Рис. 3. Схема растекания тока молнии при разрядах в опору (а) или в фазный провод (б)



Первые два случая вызывают прохождение по телу опоры ПП тока в единицы и десятки кА. Такие токи будут сопровождаться ростом потенциала ЗУ до десятков и сотен кВ. Поскольку к ЗУ присоединены экраны (напрямую или через свои ОПН), то высокий потенциал будет занесен в экраны и может дать пробой оболочки КЛ. В свою очередь повреждение оболочки чревато проникновением воды в изоляцию из сшитого полиэтилена и крайне нежелательно. Обнаружить нарушение целостности оболочки можно только в процессе ее испытаний, а они проводятся не чаще одного раза в год.

Третий случай связан с повреждениями в концевой коробке (рис. 2а) или же в коробке транспозиции (рис. 2б). Нарушение в штатной схеме заземления экранов вызовет появление в одном или нескольких экранах тока промышленной частоты величиной в десятки ампер, который будет всё время замыкаться через ЗУ опоры ПП, делая потенциал ЗУ отличным от нуля, создавая проблемы для персонала и случайных лиц.

Разумеется, негативные последствия для людей могут быть не только в третьем случае, но и в двух первых: нет ничего хорошего для человека, если он оказался рядом с опорой ВЛ в то время, когда в нее ударила молния и/или произошло КЗ. Однако при проектировании ВЛ требования к заземлению опор обычно не опираются на вопросы безопасности людей, а скорее обусловлены оптимизацией числа грозовых отключений. Поэтому первые два случая будем анализировать исключительно с точки зрения повреждения оборудования ПП и кабеля.

РАЗРЯД МОЛНИИ

На рис. 3а показана схема растекания тока молнии, ударившей в трос или же непосредственно в опору ПП. У молнии имеются следующие пути:

- по тросу (тросам) к соседней заземленной опоре ВЛ;
- через ОПН фаз А, В, С в провода ВЛ и жилы КЛ;
- через экраны ОПН фаз А, В, С в экраны КЛ и далее в контур заземления РУ;
- через шину в контур заземления РУ;
- в ЗУ опоры ПП.

При «быстрых» переходных процессах, характерных для разрядов молнии, распределение токов в схеме вида рис. 3а определяется собственными волновыми сопротивлениями. Волновое сопротивление жилы однофазного кабеля, имеющего заземленный экран, согласно каталожным данным составляет 10–30 Ом. Однако такие цифры, как показано в [2], справедливы лишь для случая, когда экран надежно заземлен и имеет нулевой потенциал.

Для рис. 3а потенциал экрана заведомо отличается от 0, и тогда собственное волновое сопротивление жилы достигает 100 Ом. Таким же его можно назвать и для экрана, и для шины. Собственное волновое сопротивление фазного провода ВЛ, троса ВЛ оценивается в 400 Ом.

По мере роста потенциала тела опоры и ЗУ произойдет «открытие» силовых ОПН и часть тока молнии будет уходить в фазные провода ВЛ и жилы КЛ. Однако раньше произойдет «открытие» экранных ОПН, поскольку они небольшого класса напряжения. Именно экраны, подключенные к опоре через свои ОПН (или просто через металлические перемычки), могли бы сыграть заметную роль в деле снижения потенциала тела опоры и ЗУ. Влияние же проводов ВЛ и жил КЛ менее заметно, равно как и шины, которая в подавляющем числе случаев просто отсутствует.

Экраны одноцепной КЛ, включенные параллельно друг другу, обладают результирующим волновым сопротивлением $Z_{\text{Э}} \approx 100 / 3 \approx 30$ Ом (для двухцепной линии $Z_{\text{Э}} \approx 100 / 6 \approx 15$ Ом). Следовательно, эквивалентное сопротивление для ЗУ опоры, имеющей $R_{\text{ЗУ}} = 10$ Ом, и всех экранов одной (двух) цепей КЛ составит:

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_{\text{ЗУ}} \cdot Z_{\text{Э}}}{R_{\text{ЗУ}} + Z_{\text{Э}}} = 7,5 \text{ Ом (6 Ом)}.$$

Известно, что импульсное сопротивление ЗУ выше, чем на 50 Гц. Однако, в силу искрообразования в грунте, характерного для рассмотренных здесь больших токов молнии, будем полагать, что эти два сопротивления $R_{\text{ЗУ}}$ близки друг другу.

В [3] говорилось о том, что прочность оболочки КЛ при воздействии грозовых импульсов может достигать 100 кВ и даже 200 кВ. Для возникновения напряжения в 200 кВ на эквивалентном сопротивлении $Z_{\text{ЭКВ}} = 7,5$ Ом (или 6 Ом) достаточно, чтобы ток молнии имел величину $I_{\text{М}} \approx 30$ кА:

$$U_{\text{ЗУ}} = Z_{\text{ЭКВ}} \cdot I_{\text{М}} \approx 200 \text{ кВ}.$$

Согласно РД 153-34.3-35.125-99, токами более 30 кА обладает приблизительно каждая вторая молния. Иными словами, каждый второй разряд молнии в опору ПП будет вызывать многочисленные повреждения оболочек, присоединенных к опоре КЛ.

В соответствии с этим же РД годовое число разрядов молнии в ВЛ составляет около 100 раз на 100 км длины и 100 грозовых часов. При средней по России грозовой активности 50 часов, в пролет длиной 250 м молния ударит оценочно 0,125 раз в год или один раз за 8 лет эксплуатации. Таким образом, при сопротивлении ЗУ опоры 10 Ом риск многочисленных повреждений оболочек КЛ будет возникать, по очень грубым оценкам, один раз за 16 лет, т.е. несколько раз за срок службы оборудования.

Если бы сопротивление ЗУ составляло $R_{\text{ЗУ}} = 0,5$ Ом, то тогда $Z_{\text{ЭКВ}} < 0,5$ Ом и даже самая мощная молния с током $I_{\text{М}} = 200$ кА дала бы $U_{\text{ЗУ}} = Z_{\text{ЭКВ}} \cdot I_{\text{М}} < 100$ кВ, что вряд ли опасно для оболочек КЛ и не способно вызвать их повреждения.

Если рассматривать не удар в опору (рис. 3а), а прорыв молнии мимо тросовой защиты на фазный провод, то схема растекания токов здесь иная (рис. 3б). Согласно РД, прорывы происходят не чаще чем один раз на 100–200 разрядов молнии в ВЛ, также исследования говорят, что токи прорвавшихся молний редко превосходят 20–30 кА. Учитывая изложенное, разряды молнии в фазные провода ВЛ менее опасны для кабелей, чем разряды в опоры и тросы ВЛ, и они не являются определяющими при обосновании требований к сопротивлению ЗУ.

Важно отметить, что разряды молнии в опоры и тросы ВЛ вблизи от ПП могут не только вызывать повреждения оболочки КЛ, но и выводить из строя ОПН, установленные в экранах (за счет значительной выделившейся энергии). Однако при сопротивлении $R_{\text{ЗУ}} = 0,5$ Ом это исключено.

КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

КЗ на опоре ПП наиболее вероятно из-за повреждения силового ОПН, которое может произойти или из-за некачественного изготовления, или из-за неверного выбора характеристик, или из-за какого-то нерасчетного воздействия. Ток КЗ попадет в тело опоры через аварийный ОПН, откуда будет растекаться по таким же направлениям, как и на рис. 3б, исключая провода и жилы неповрежденных фаз, отделенные от опоры исправными ОПН, а также экраны КЛ, если в них установлены ОПН.

Положим, что величина тока КЗ известна и, как это обычно бывает, найдена без учета активного сопротивления в месте повреждения:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{НОМ}} / \sqrt{3}}{X_{\text{ЭКВ}}},$$

где $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение сети;

$R_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление сети относительно точки КЗ.

Тогда потенциал ЗУ опоры ПП, на которой произошла авария, можно оценить как:

$$U_{\text{ЗУ}} = \frac{U_{\text{НОМ}} / \sqrt{3}}{\sqrt{R_{\text{ЭКВ}}^2 + R_{\text{ЭКВ}}^2}} \cdot R_{\text{ЭКВ}},$$

где $R_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное активное сопротивление ЗУ опоры и ее присоединений.

Результаты расчета $U_{\text{ЗУ}}$ сведены на рис. 4. Видно, что при $R_{\text{ЭКВ}} > 0,5$ Ом и при $I_{\text{КЗ}} > 20$ кА потенциал ЗУ превосходит 10 кВ, что может привести к выходу из строя экранных ОПН класса 6 кВ (если для экранов применено одностороннее заземление). Если же $R_{\text{ЭКВ}} > 1$ Ом, то тогда при указанных токах $I_{\text{КЗ}}$ потенциал ЗУ окажется более 20 кВ, представляя явную опасность не только для ОПН, но и для оболочек кабелей, прочность которых на промышленной частоте по [3] вряд ли превосходит 20–30 кВ.

Чтобы вычислить реальные $R_{\text{ЭКВ}}$ и $U_{\text{ЗУ}}$, надо оценить величину сопротивления троса и экранов. Согласно [4] сопротивление многократно повторно заземленного троса R_{T} может быть оценено только через активные составляющие, пренебрегая индуктивными, по формуле:

$$R_{\text{T}} = \sqrt{R_{\text{П}} R_{\text{ОП}}},$$

где $R_{\text{П}}$ – активное сопротивление троса на длине одного пролета (или на участке между соседними заземлениями троса);

$R_{\text{ОП}}$ – сопротивление заземления опор.

Например, для троса С-50 сечением 50 мм² сопротивление составляет 2 Ом/км, что при длине пролета 250 м дает $R_{\text{П}} = 0,5$ Ом. Положив сопротивление опор равным $R_{\text{ОП}} = 10$ Ом, получим $R_{\text{T}} = \sqrt{0,5 \cdot 10} = 2,2$ Ом. Таким образом, каким бы ни было $R_{\text{ЗУ}}$ опоры ПП, только за счет троса эквивалентное сопротивление стекающему с опоры току будет никак не больше 2,2 Ом. В частности, если $R_{\text{ЗУ}} = 10$ Ом, то:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_{\text{ЗУ}} \cdot R_{\text{T}}}{R_{\text{ЗУ}} + R_{\text{T}}} = 1,8 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление медного экрана сечением 50, 120, 240 мм² составляет 0,4 Ом/км, 0,17 Ом/км, 0,08 Ом/км соответственно. В таких условиях пренебречь индуктивным сопротивлением не вполне корректно, однако позволим это, чтобы дать простейшие оценки. Если учесть, что к опоре ПП присоединено сразу три экрана (или шесть для двухцепной линии), то даже протяженная КЛ длиной в несколько км обеспечит хорошую связь ЗУ опоры ПП с контуром РУ, имеющим сопротивление 0,5 Ом. То есть, по сути, наличие экранов позволяет считать, что ЗУ опоры ПП и контур заземления РУ работают параллельно друг другу, обеспечивая $R_{\text{ЭКВ}}$ менее 0,5 Ом вне зависимости от того, какое сопротивление $R_{\text{ЗУ}}$ (0,5 Ом или, скажем, 10 Ом) имеется непосредственно у ПП.

Если экраны КЛ присоединены к опоре ПП не напрямую, а через экранные ОПН, то тогда эффективное подключение экранов к опоре произойдет только после разрушения этих ОПН повышенным потенциалом $U_{\text{ЗУ}}$. Чтобы спасти ОПН от аварии, можно достичь снижения потенциала $U_{\text{ЗУ}}$ путем прокладки шины, которая свяжет ЗУ опоры и контур РУ. Сечение этой медной шины может быть определено путем расчетов в программе ЕМТР с учетом особенностей конкретного объекта.

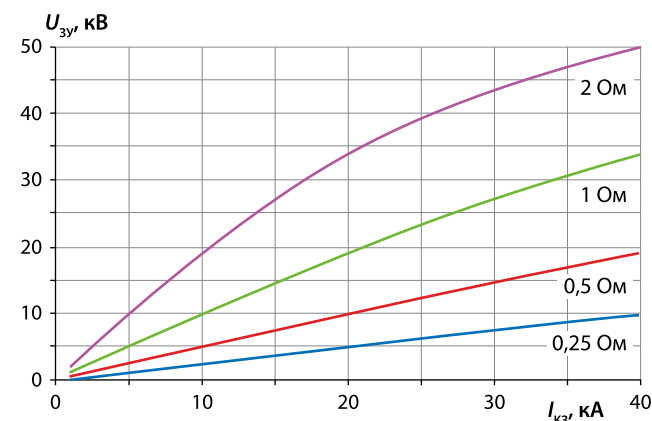
Итак, при КЗ на опоре потенциал ЗУ существенно зависит от обустройства тросовой защиты, от сечения и схемы заземления экранов КЛ, от длины КЛ и числа ее цепей. При КЗ потенциал ЗУ не должен быть выше 10–15 кВ, так как иначе существует риск повреждения экранных ОПН (если они есть) и оболочек КЛ. Чтобы выполнить такое условие, в ряде случаев достаточно делать ЗУ с сопротивлением 10 Ом, а в ряде случаев – вплоть до 0,5 Ом. Если нет возможности обеспечить потенциал ЗУ менее 10–15 кВ, следует изучить эффект от установки шины с учетом ее материала, длины, сечения.

НАРУШЕНИЕ СХЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ

Положим, что вследствие разряда мощной молнии или какой-то иной причины произошло повреждение экранного ОПН на опоре ПП или же в узле транспозиции. При этом об-

Потенциал ЗУ опоры ПП 110 кВ в зависимости от $I_{\text{КЗ}}$ и $R_{\text{ЭКВ}}$ (0,25-2 Ом)

Рис. 4 •



разуются замкнутые экранные контуры, показанные на рис. 2, и в них в нормальном режиме КЛ под действием наведенного напряжения $U_{\text{Э}}$, которое можно вычислить по методике [2], проходят токи промышленной частоты.

В статье [5] на примере ЗУ колодца транспозиции было показано, что если в нормальном режиме работы КЛ наведенное на экраны напряжение не превосходит $U_{\text{Э}} = 100$ В, то тогда при любом сопротивлении заземления колодца в диапазоне 0,5–10 Ом повреждение в коробке транспозиции (КТ-ОПН) не вызовет напряжение прикосновения (или шага) более 20–30 В, которые можно считать безопасными.

Данные рассуждения могут быть распространены и на случай ЗУ опоры ПП, т.е. если схема заземления экранов КЛ выбрана по методике [2] так, что наводимое напряжение (на разземленном конце или в узле транспозиции) не превышает 100 В, то безопасность будет обеспечена при любом сопротивлении $R_{\text{ЗУ}}$ опоры ПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неверный выбор сопротивления заземления опоры переходного пункта может вызывать периодические повреждения экранных ОПН, пробои оболочки кабельных линий, а также угрожать людям, оказавшимся рядом с опорой 35–500 кВ.

Потенциал основания опоры ПП не должен превышать:

- 100 кВ (максимальное значение импульса) при разрядах молнии в опору ПП;
- 15 кВ (действующее значение, 50 Гц) при коротких замыканиях на опоре ПП;
- 100 В (действующее значение, 50 Гц) при нарушениях в схеме заземления экранов.

Наиболее жесткие требования к сопротивлению заземления опор переходных пунктов обусловлены необходимостью ограничения импульсных напряжений на экранах КЛ при разрядах молнии в опору ПП или же в присоединенный к ней трос. Величина сопротивления заземления ПП, выполненных на опорах ВЛ, должна составлять 0,5 Ом, так же как это принято для распределительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Автоматическое повторное включение на воздушно-кабельных линиях электропередачи 110–500 кВ // Электроэнергия: передача и распределение. 2015. № 1. С. 68–73.
2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.
3. Дмитриев М.В. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Защита от перенапряжений // Новости ЭлектроТехники. 2016. № 6(102). С. 38–41.
4. Методические указания по расчету термической устойчивости грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи. № 5290 тм-т1. ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект». М., 1976.
5. Дмитриев М.В. Заземление колодцев транспозиции КЛ 6–500 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2016. № 2(98). С. 50–51. ■