

Заземление экранов однофазных кабелей 6–500 кВ: расстояние от муфт до коробок с ОПН

В нашей стране уже более 20 лет массово применяются кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Если в сетях среднего напряжения 6–35 кВ используются кабели как однофазной, так и трёхфазной конструкции, то в сетях 110–500 кВ — исключительно однофазной.

Михаил ДМИТРИЕВ,
доцент Санкт-Петербургского
политехнического университета, к.т.н.

ВВЕДЕНИЕ

Однофазные кабели 6–500 кВ имеют ряд особенностей, одна из которых — наличие в медных экранах наведённых токов промышленной частоты и вызванных ими потерь активной мощности, для борьбы с которыми повсеместно внедряют одностороннее заземление экранов (рис. 1а) или транспозицию экранов (рис. 1б).

Вопросы проектирования и эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, в частности однофазных, подробно рассмотрены в серии стандартов [1–3], которые ещё несколько лет назад были подготовлены и утверждены ПАО «ФСК ЕЭС» (их можно бесплатно скачать с сайта компании). Например, вы-

бору схем соединения и заземления экранов посвящён документ [3] — появление этого и других стандартов стало очень важным для страны шагом.

Накопленный к настоящему времени опыт работы с кабелями показал, что имеется несколько вопросов, которые не нашли отражение в актуальных редакциях стандартов, но которые было бы полезно туда добавить, когда представится такая возможность.

В частности, нигде в нормах по кабельным линиям не указано на требования к сопротивлению заземления узлов транспозиции и к сопротивлению заземления опор воздушных линий в местах перехода в кабельные. Обосновать такие требо-

вания и добавить их в стандарты — очень важная задача.

Ещё один из достаточно острых вопросов состоит в том, а существуют ли ограничения на длину соединительных проводов с полиэтиленовой изоляцией (ППС), которые связывают концевые муфты (МК) кабеля или транспозиционные муфты (МТ) с ограничителями перенапряжений (ОПН, рис. 1), установленными в концевых коробках (КК) или в коробках транспозиции (КТ).

Отсутствие в отечественной документации чётких указаний по поводу длин привело к тому, что производители кабельных муфт (концевых, транспозиционных) стали отказывать в гарантийных обязательствах и списывать случаи повреждения своей продукции на нарушение одного или двух следующих сомнительных правил:

- длина соединительных проводов должна быть менее 10 м (иногда 15 м);
- длина соединительных проводов не должна различаться по фазам.

Например, в конце 2015 года один отечественный завод отказал в гарантийной замене пробившейся транспозиционной муфты 110 кВ на том лишь основании, что длина соединительного провода от этой муфты до коробки транспозиции КТ с установленным в ней ОПН составляла 16 м. Опасность длины 16 м на заводе была проверена специальным расчётом, получить который так и не удалось по причине «болезни технического персонала».

Подобные истории отнюдь не редкость. Из-за отсутствия информации в нормах и не имея внятных разъяснений со стороны заводов, попытаемся разобраться в том, а существуют ли на самом деле ограничения на длину соединительных проводов и разброс длины по фазам кабеля.

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭКРАНЕ КАБЕЛЯ

Ток промышленной частоты, проходящий в жилах кабеля, своим магнитным полем наводит в экранах напряжение промышленной частоты, ток и связанные с ним потери активной мощности. Наведённые напряжения, токи и потери различны в зависимости от схемы соединения и заземления экранов кабеля и поэтому влияют на её окончательный выбор (методика [3—5]).

Схема соединения и заземления экранов кабеля должна быть такой, чтобы напряжение промышленной частоты на экране относительно земли не превышало:

- в нормальном режиме работы 100 В (п.5.2.3.1 из [1]);
- при коротком замыкании в сети 5 кВ (п.4.2.1.7 и п.4.2.3.4 из [3]).

Если ограничения по нормальному режиму связаны с вопросами безопасности людей и животных, то ограничение при коротком замыкании обусловлено желанием минимизировать риск пробоя оболочки кабеля с экрана на землю.

На самом деле не только рабочие токи и токи короткого замыкания вызывают наводки с жил на экраны кабеля. Импульсные процессы, характерные при разрядах молнии или коммутациях, также передаются с жил в экраны. Поскольку грозовые и коммутационные импульсные напряжения способны привести к пробоям оболочки кабеля с экрана на землю, то в местах разземления экранов (рис. 1а) или в узлах транспозиции (рис. 1б) в экраны кабеля устанавливаются защитные ОПН.

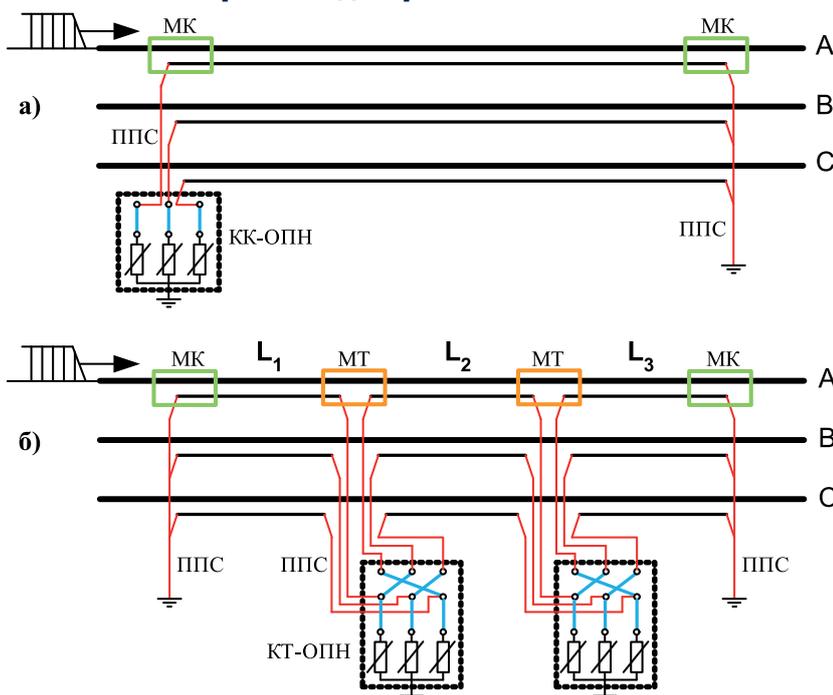
Таким образом, напряжение промышленной частоты на экранах ограничивают путем рационального выбора схемы их соединения и заземления, а вот импульсные (грозовые и коммутационные) напряжения ограничивают за счет размещения ОПН. Итак, цель наличия ОПН в концевых или транспозиционных коробках — это защита от импульсных напряжений и ничего более.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПН И ПРОЧНОСТЬ ОБОЛОЧКИ КАБЕЛЯ

Традиционно в энергетике при защите сетей от импульсных перенапряжений приходится решать вопрос о том, каково максимально допустимое расстояние, на котором ещё можно размещать ОПН от оборудования. Например, в главе 4.2 ПУЭ для различных схем распределительных устройств 35—750 кВ такие расстояния даны в табличной форме в зависимости от основных влияющих факторов.

Дело в том, что при возникновении повышенных напряжений ОПН начинает пропускать ток, и этот ток созда-

Рис. 1. Основные схемы борьбы с токами и потерями в экранах однофазных кабелей



ёт падение напряжения в проводах, которыми ОПН подключён к защищаемому оборудованию. В итоге напряжение на оборудовании оказывается выше, чем на зажимах ОПН, на величину падения напряжения в соединительных проводах. В случае, когда длина проводов велика, напряжение на оборудовании оказывается недопустимым, представляя угрозу для изоляции. Этим и объясняется желание снизить длину соединительных проводов.

Для того чтобы ответить на вопрос, на каком расстоянии можно размещать экранные ОПН от защищаемых ими концевых или транспозиционных муфт кабеля, как минимум необходимо знать характеристики ОПН и прочность оболочки кабеля (её прочность в муфте), ведь и в тех же правилах ПУЭ расстояния зависят от типа защитного аппарата и от вида защищаемого оборудования.

ОПН. В качестве экранных ОПН в нашей стране чаще всего применяют ОПН класса 6 кВ с рабочим напряжением 7,2 кВ. Практически у всех производителей ОПН при импульсном токе формы 8/20 мкс величиной 10 кА такие ОПН. В качестве экранных ОПН, имеют близкие друг другу остающиеся напряжения (напряжения на выводах) — около 23 кВ.

Обложка. Согласно п.4.5.10 [2] оболочка любого однофазного кабеля класса до 500 кВ периодически испытывается постоянным напряжением 10 кВ в течение 1 мин. К сожалению, в нормах не приходилось видеть цифр, которые помогли бы оценить прочность оболочки при воздействии импульсов или хотя бы при воздействии напряжения промышленной частоты. Вместе с тем, без указанных данных будет сложно вести рассуждения о допустимых расстояниях от ОПН до муфты. Поэтому обратимся к опыту испытательных центров и лабораторий. Возьмем, например, Санкт-Петербургский политехнический университет и голландский центр КЕМА.

СПбПУ. В политехническом университете под руководством А.Е. Монастырского проводились испытания оболочки кабеля 330 кВ напряжением промышленной частоты. Оболочка часами выдерживала напряжение 55 кВ и так и не была пробита. Длительно поднять напряжение выше 55 кВ мешали частичные разряды, которые были связаны исключительно с особенностями концевой разделки образцов. Что касается прочности «на пробой», то экспертно она была оценена цифрой свыше 100 кВ — при таком напряжении промышленной частоты пробой формировался бы за время в несколько минут. Импульсных испытаний оболочки не проводилось.

КЕМА. Во всемирно известной голландской лаборатории КЕМА проводились всесторонние испытания кабельной линии 220 кВ с установленными концевыми и транспозиционными муфтами. Пробой оболочки кабеля произошёл при напряжении промышленной частоты 50 кВ через 15 секунд после начала испытаний, а пробоя при напряжениях 10, 20, 30, 40 кВ так и не было. Кроме того были выполнены испытания стандартным грозовым импульсом формы 1,2/50 мкс — при воздействии импульсов величиной 170 кВ пробоя оболочки не зафиксировано, а

дальнейшему росту напряжения с целью поиска напряжения пробоя мешали разряды, которые, как и в лаборатории СПбПУ, были связаны с особенностями концевой разделки образцов.

Поскольку толщина оболочки у кабелей разных классов напряжения и разных производителей всегда составляет одну и ту же величину около 5 мм, то собранные результаты испытаний, полученные на нескольких конкретных образцах кабелей, допустимо распространить и на все остальные. Так, с известной долей осторожности можно утверждать, что без каких-либо последствий оболочка любых однофазных кабелей 6—500 кВ, даже несколько повреждённая при монтаже, способна держать:

- напряжение промышленной частоты свыше 30 кВ «без ограничения по времени»;
- напряжение стандартного грозового импульса формы 1,2/50 мкс свыше 100 кВ.

Глядя на данные цифры, специалисты, которые проводят испытания оболочек кабелей на действующих кабельных линиях, могут засомневаться, ведь иной раз им не удается подать на оболочку кабеля даже 10 кВ постоянного напряжения, так как же тогда поднять 30 кВ (это переменное напряжение, но суть не меняется)? Здесь можно сказать, что за последние годы большая часть случаев, когда на оболочке кабеля не удалось поднять постоянное напряжение 10 кВ, была связана не с кабелем или муфтами, а с неправильным монтажом и последующей небрежной эксплуатацией концевых коробок и коробок транспозиции.

Напряжение промышленной частоты 30 кВ, которое здесь приведено, не имеет отношения к защите от импульсных перенапряжений, а дано лишь для того чтобы, пользуясь случаем, обратить внимание всех заинтересованных лиц: в случае такой необходимости вполне допустимо, чтобы при коротких замыканиях напряжение на экране относительно земли было больше указанного в стандарте излишне жёсткого значения 5 кВ [3]. С точки зрения прочности оболочки на экране можно было бы допускать не до 5 кВ, а вплоть до 30 кВ и даже более. Однако при таком высоком напряжении выйдут из строя установленные в коробках экранные ОПН класса 6 кВ с рабочим 7,2 кВ. А при каком не выйдут?

Современные ОПН могут выдерживать напряжение промышленной частоты с кратностью 1,25 о.е. в течение более 10 с, что с запасом превосходит время любого короткого замыкания. Следовательно, на экране любого кабеля на время короткого замыкания теоретически можно было бы разрешить напряжение промышленной частоты до $7,2 \cdot 1,25 = 9$ кВ. При этом не возникает риска ни для экранных ОПН, ни для оболочки кабеля (она вообще держит более 30 кВ без ограничения по времени). Итак, при выборе схем соединения и заземления экранов по необходимости можно повысить предельное напряжение с 5 кВ (как в [3]) до 7 кВ и даже до 9 кВ.

Вернемся теперь к импульсной прочности оболочки — предполагается, что она составляет для всех кабелей 6—500 кВ не менее 100 кВ при воздействии стандартного грозового импульса с фронтом

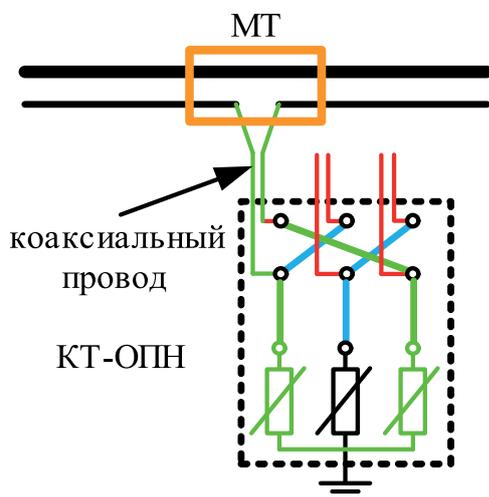
1,2 мкс и длительностью до полупада 50 мкс. Если остающееся напряжение применяемых в экранах ОПН составляет 23 кВ, а оболочка способна выдержать 100 кВ — то тогда падение напряжения в проводе между ОПН и муфтой не должно быть более $100 - 23 = 77$ кВ, и, зная эту величину, можно было бы постараться оценить предельную длину соединительного провода.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА CIGRE

Примерно похожие рассуждения ведут в соответствующем рабочем комитете международного совета по делам электроэнергетики CIGRE: зная характеристики ОПН и оболочки, по очень простой формуле они пытаются определить предельную длину соединительного провода.

Первое, что хочется сказать — основные рекомендации CIGRE касаются лишь узлов транспозиции, а про одностороннее заземление экранов информации почти нет. Второе, — рекомендации CIGRE ориентированы на использование в качестве проводов, соединяющих муфту с коробкой транспозиции и ОПН, не шести проводов типа ППС (как показано на рис.1б), а трёх коаксиальных проводов (рис. 2). Иными словами, от каждой транспозиционной муфты выходят не два провода ППС, а лишь один коаксиальный, внутренний проводник которого присоединен к экрану одного из двух заходящих в муфту участков силового кабеля, а внешний проводник — к экрану другого.

Рис. 2. Соединение муфты с коробкой, выполненное коаксиальным проводом



В России коаксиальные провода применяются главным образом на объектах, где использованы муфты французской фирмы NEXANS, тогда как большинство других заводов ориентированы на провода типа ППС, которые имеют небольшой внешний радиус, проще гнутся и разделяются. Поскольку штаб-квартира CIGRE также расположена во Франции, а основной язык — французский, и только потом английский, то нет ничего удивительного, что CIGRE ориентируется на технические решения NEXANS. Наша же задача — обратить внимание всех заинтересованных лиц на то, что материалы CIGRE не могут широко применяться в России, поскольку они разработаны под нехарактерные для нас технические решения. Не говоря уже о том, что они не имеют в России статуса нормативного документа.

В случае применения коаксиального провода возникает специфическая задача — определить, на какое импульсное напряжение должна быть рассчитана изоляция между двумя его концентрически расположенными токоведущими частями. Для её решения комитет CIGRE и предложил «знаменитую» формулу (обозначения сохранены):

$$E_{1b} = 2 \cdot [U_R + 0,45 \cdot L_b \cdot L \cdot (I/\tau)] \quad (1)$$

где U_R — остающееся напряжение ОПН (кВ); I — некоторый «входящий» ток (кА); τ — длительность фронта волны тока (мкс); L — длина коаксиального провода (м); L_b — индуктивность единицы длины коаксиального провода (мкГн/м).

Формулу (1) несложно получить по 2-му закону Кирхгофа, записанному для контура, выделенного на рис. 2 зелёным цветом. Единственная особенность в том, что в (1), в отличие от учебника по технике высоких напряжений (ТВН), присутствует эмпирический коэффициент 0,45, который был получен специалистами CIGRE после обработки результатов расчётов электромагнитных переходных процессов, выполненных в канадско-американской компьютерной программе EMTP.

Проведя расчёты по (1), CIGRE даёт рекомендации [6] по прочности изоляции коаксиального провода (см. табл. 1). Видно, что требования к прочности изоляции этого провода увеличиваются с ростом его длины и с ростом класса напряжения силового кабеля. Зависимость от длины очевидна, а влияние класса также несложно понять, ведь для более высоковольтных линий возможные грозовые импульсы на жиле кабеля значительны, а потому — велики и наводки на экран, т.е. I/τ в (1).

Табл. 1. Рекомендации CIGRE по прочности изоляции коаксиального провода E_{1b} на стандартном грозовом импульсе формы 1,2/50 мкс

Класс главной изоляции по ГОСТ 1516.3-96	Грозовой импульс по МЭК для главной изоляции	Требования к изоляции провода	
		Провод до $L = 3$ м	Провод до $L = 10$ м
6—35 кВ	<325 кВ	60 кВ	60 кВ
110 кВ	380—750 кВ	60 кВ	75 кВ
220 кВ	850—1050 кВ	60 кВ	95 кВ
330 кВ	1175—1425 кВ	75 кВ	125 кВ
500 кВ	1550 кВ	75 кВ	145 кВ

Хотя качественно табл. 1 не вызывает особого сомнения, каким образом были получены конкретные цифры — остаётся загадкой, ведь непонятно, какими в (1) надо принимать погонную индуктивность L_b и скорость изменения тока I/τ .

Погонная индуктивность провода L_b может быть вычислена на основе данных о его конструкции и обычно находится в диапазоне значений от 0,1 до 1,2 мкГн/м. Авторы (1) утверждают, что чаще использовали значение 0,24 мкГн/м, которое отвечает волновому сопротивлению 50 Ом и скорости волны около 200 м/мкс.

Если с индуктивностью L_b более-менее понятно, то какой принимать скорость изменения тока I/τ (кА/мкс) — нигде не сказано ни слова. Вместе с тем, ток молнии может иметь скорость изменения на фронте от 5 кА/мкс до 100 кА/мкс. Столь существенный разброс параметров тока делает невозможным использование (1), и на этом фоне цифры из табл. 1 выглядят не обоснованными и не заслуживающими доверия. Отнюдь не случайно, что уже упомянутые выше конкретные требования ПУЭ к организации грозозащиты распределительных устройств получены вовсе не по формулам, а с привлечением статистических расчётов.

В материалах CIGRE упоминается разумное правило — чем короче провод от ОПН до муфты, тем лучше, но никаких адекватных методик для поиска конкретных предельных длин CIGRE не даёт. Указанные в табл. 1 длины 3 и 10 м рассмотрены, очевидно, лишь в качестве примера использования формулы (1) и вовсе не означают, что нельзя иметь провода длиной 15, 20, 25 м. Также нигде не сказано, что длины проводов не могут отличаться по фазам, и что делать, если провода не коаксиальные.

По названным причинам материалы CIGRE далее рассматривать не будем, как не содержащие полезной информации по интересующему вопросу.

РАСЧЁТ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ КАБЕЛЯ 110 КВ

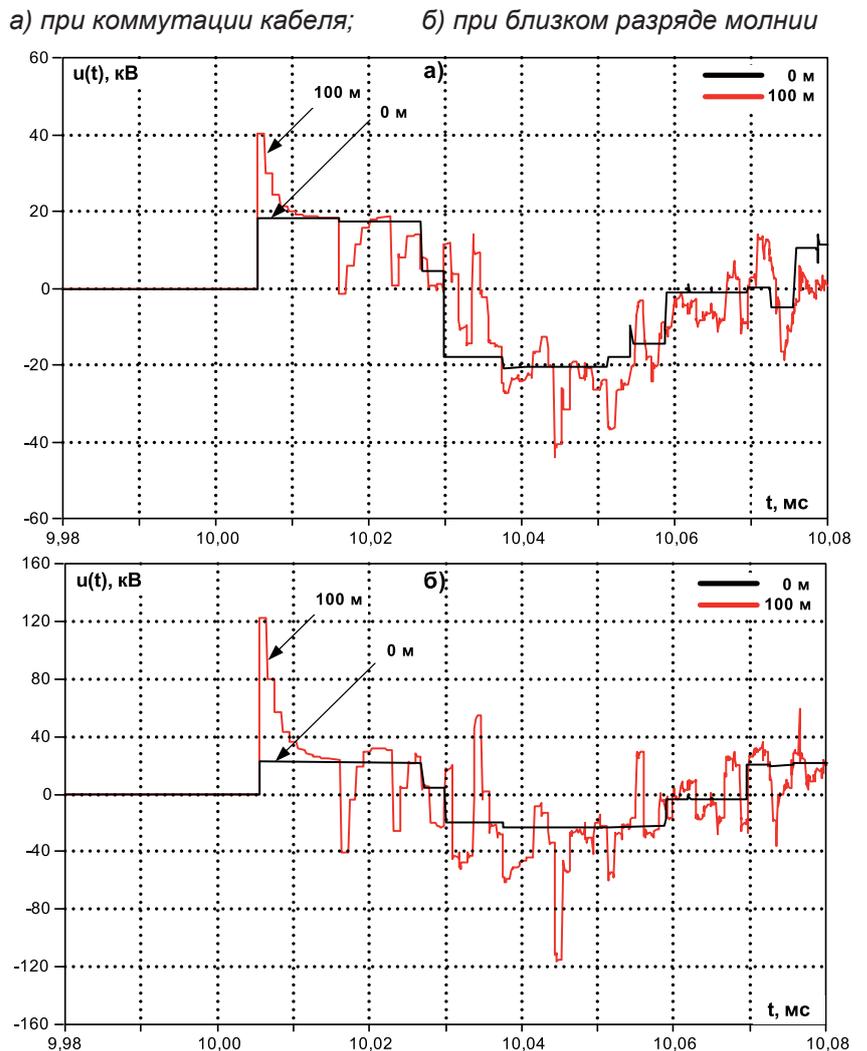
Механизм появления импульсных напряжений в экранах описан, например, в 10-й главе [4]. Если бы в месте разземления экрана (рис. 1а) и в узле транспозиции (рис. 1б) отсутствовали экранные ОПН, то возникающее при этом напряжение на экране относительно земли могло достигать половины напряжения на жиле и даже более. Поэтому необходимость установки экранных ОПН сомнения не вызывает, но эффективность их работы, к сожалению, снижается из-за наличия соединительных проводов той или иной длины, которые отделяют ОПН от защищаемой концевой или транспозиционной муфты.

В качестве примера проведём расчёт напряжения в узле транспозиции линии 110 кВ длиной 3 км с кабелями 1000/240 мм², имеющей один полный цикл (рис. 1б). Моделирование процессов выполним в программе EMTP, где будем варьировать длину провода ППС, связывающего муфту и ОПН с рабочим напряжением 7,2 кВ.

При включении кабеля под напряжение сети в его жилах скачком появляется рабочее напряжение. В сети 110 кВ рабочее напряжение может достигать 127 кВ, а амплитуда фазного напряжения — 100 кВ. Наибольшие импульсы будут возникать в экране, отвечающем той из трёх жил (фаз) кабеля, мгновенное значение напряжения которой на момент включения кабеля было близко амплитудному значению, т.е. к 100 кВ.

На рис. 3а даны две осциллограммы напряжения в узле транспозиции — одна отвечает нулевой длине провода ППС, а другая — огромной длине 100 м. Реальные длины проводов ППС лежат в диапазоне от 0 до 10—20 м, а длина 100 м была взята лишь с целью более наглядной иллюстрации процессов. Согласно рис. 3а напряжение на экране в узле транспозиции не превосходит всего 40 кВ даже для провода большой длины 100 м. Также видно, что оно составляет около 0,4 от напряжения жилы.

Рис. 3. Напряжение в узле транспозиции КЛ 110 кВ в зависимости от длины провода ППС:



Из рис. 3а может показаться, что на экране возникает целая серия импульсов, которые многократно достигают 40 кВ. Здесь следует сказать, что традиционно в подобных расчетах принято ориентироваться лишь на первые колебания. Другие же импульсы, последующие, во внимание не принимаются, так как на практике их не будет в силу серьёзного действия потерь и вносимого ими затухания, которое, увы, не удаётся достоверно учесть в компьютерных программах вроде EMTP.

Напряжение рис. 3а вряд ли представляет опасность для оболочки кабеля и муфты, поскольку:

- для оболочки допустимо более 100 кВ, а здесь всего 40 кВ;
- прочность оболочки проверяется на импульсе с длительностью 50 мкс, а здесь она не более всего 3 мкс.

Теперь рассмотрим грозовые процессы. Их можно оценить следующим образом. Известно, что если кабель проложен в сети, содержащей воздушные линии, то для его защиты от грозовых перенапряжений вблизи от концевых муфт устанавливают силовые ОПН. Остающееся напряжение ОПН 110 кВ не превосходит 300 кВ, и поэтому для расчета грозовых импульсов на экране в узле транспозиции достаточно включать кабель (жилу кабеля) под постоянное напряжение 300 кВ.

Результат соответствующего расчёта показан на рис. 3б. Наибольшее значение напряжения на экране составило 120 кВ, что близко к прочности оболочки кабеля, но все же вряд ли опасно в силу малой длительности импульса (всего 3 мкс против испытательных 50 мкс). Тем не менее очевидно, что грозовые воздействия мощнее коммутационных и требуют более детального изучения. Также можно отметить, что на рис. 3а, как и на рис. 3б, наводка на экраны — около 0,4 от напряжения жилы.

На рис. 4а показан первый грозовой импульс напряжения на экране, и то, как он изменяется по мере увеличения длины провода ППС от 0 до 100 метров. Видно, что максимальное значение напряжения при этом не меняется, а все, что происходит, — это постепенно увеличивается длительность импульса (время до его спуска), достигая 3 мкс (при 100 м).

Грозовая волна, пришедшая в жилу кабеля, имеет крутой фронт тогда, когда она образовалась в результате близкого к кабелю разряда молнии в заземлённую часть воздушной линии (ВЛ) и последующего обратного перекрытия с заземлённой части ВЛ на фазный провод. В остальных случаях грозовая волна имеет не

фронт нулевой длительности, а какой-то другой, конечный. В качестве примера на рис. 4б даны расчёты для случая, когда грозовое напряжение на ОПН выросло до 300 кВ не мгновенно, а за время 2 мкс.

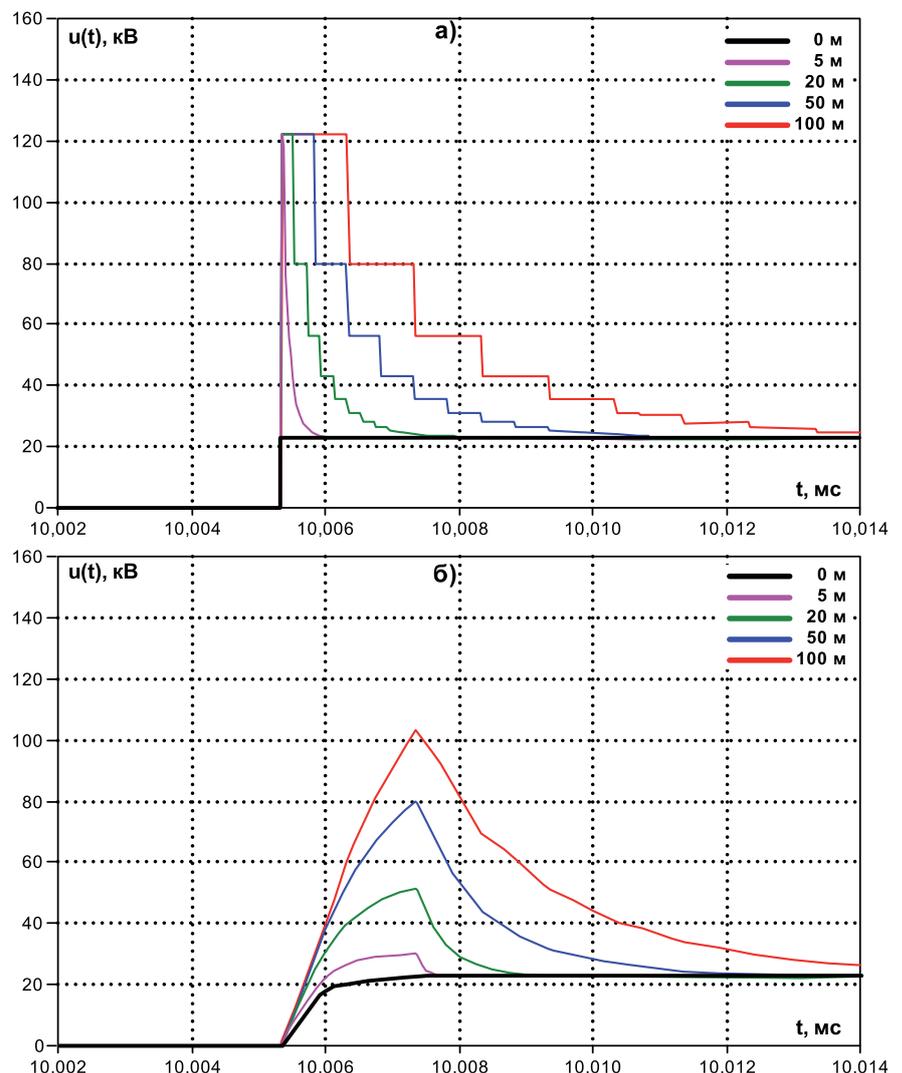
Из рис. 4б видно, что увеличение длительности фронта волны от 0 до 2 мкс вызвало снижение напряжения на экране, особенно заметное при небольших длинах ППС. Например, при длине 5 м снижение произошло со 120 кВ до всего 30 кВ.

Осциллограммы рис. 4а, 4б не позволяют сделать никакого конкретного вывода, кроме и без того известного: «чем короче провода, тем лучше». Никто не знает, куда ударит молния и какие у нее параметры, а значит никто не сможет быть уверен в том, подставлять ли в расчёты фронт волны 0 мкс, или 2 мкс, или какой-то другой. Здесь требуются статистические расчёты, способные учесть всё многообразие параметров грозовых волн, приходящих в кабель с воздушной линии. Их несложно провести, но они потребуют времени и финансирования.

В условиях существенного различия формы реальных импульсов в экранах (короткие) и испытательных (длинные), в условиях неопределённости с проч-

Рис. 4. Напряжение в узле транспозиции КЛ 110 кВ в зависимости от длины провода ППС:

а) грозовая волна с фронтом 0 мкс; б) грозовая волна с фронтом 2 мкс



ностью оболочки кабеля, в условиях статистической природы молнии и мест её разряда, глядя на рис. 4а, 4б нельзя сделать однозначного вывода, что длина провода ППС, например, 5 м ещё допустима, а скажем 20 м — нет. Всё, что остается — рекомендовать использование проводов ППС минимальной длины, но при этом не может быть и речи о каком-то запрете применения проводов длиной более 10 (15) м: если обстоятельства на стройплощадке потребовали применения проводов более 10 (15) м, то нет законных оснований, которые могли бы запретить это сделать.

ОЦЕНКА ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ 220—500 кВ

Рассмотрим, как изменятся осциллограммы рис. 4, если речь пойдёт о кабеле 220 кВ и выше. Для защиты кабеля 220 кВ применяют ОПН 220 кВ с остающимся напряжением около 500 кВ, и тогда напряжение в узле транспозиции можно оценить как $0,4 \cdot 500 = 200$ кВ, достигаемое лишь в случае грозовой волны с фронтом нулевой длительности. Однако для воздушных линий 220—500 кВ прочность изоляции ВЛ так высока, что риск обратных перекрытий минимален, а значит — в расчёты процессов в кабеле надо подставлять не фронт нулевой длительности, а другой, конечный, что снизит напряжение на оболочке с уровня 200 кВ до менее опасного.

Согласно главе 4.2 ПУЭ на подходах ВЛ к распределительным устройствам 35 кВ и выше следует предпринимать меры по снижению риска обратных перекрытий изоляции и возникновению грозových волн с крутым фронтом, способных вызвать опасные перенапряжения на изоляции оборудования. Для этого на ближайших к распределительным устройствам опорах ВЛ обеспечивают малые сопротивления заземления (не более 10—20 Ом), а также устанавливают 1—2 молниезащитных троса.

Выше было показано, что риск обратных перекрытий напрямую определяет воздействия на оболочку примыкающего к воздушной линии кабеля. Следовательно, в случаях, когда имеет место кабельно-воздушная линия 35 кВ и выше, переходной пункт (да и сам кабель с муфтами) следует также воспринимать как своеобразное распределительное устройство, и тогда, как этого требует ПУЭ, несколько опор ВЛ, примыкающих к переходному пункту, должны иметь сопротивление заземления не более 10—20 Ом и должны быть с тросами. В противном случае никакие экраны ОПН, даже при длине проводов ППС всего 5 м, уже не смогут обеспечить защиту оболочки кабеля и муфты, особенно для кабелей классов номинального напряжения 220, 330, 500 кВ.

ДОПУСТИМЫЙ РАЗБРОС В ДЛИНАХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

Несколько раз приходилось слышать, что длины соединительных проводов должны быть одинаковы. Прежде всего, подобные соображения высказываются про схемы транспозиции (рис. 16), и остается только догадываться о причинах таких требований и месте их публикации (это точно не CIGRE).

Импульсные процессы в каждом соединительном проводе происходят почти обособлено от проводов других фаз. Поэтому всё сводится к тому, что на оболочке той фазы кабеля и муфты, где провод до ОПН короче, будут возникать импульсы пониженной величины и/или длительности, но никакой проблемы в этом нет.

На промышленной же частоте все провода, являясь продолжениями экранов кабеля, объединяются в одну общую связанную систему, и здесь уже, теоретически, можно понять желание иметь все провода одинаковой длины, ведь благодаря этому все три экрана кабеля тоже окажутся равной длины и будут вести себя как система идеальной транспозиции. Эти соображения по сути являются вариацией на часто встречающееся заблуждение, заключающееся в том, что, мол, транспозиция экранов работоспособна лишь в случае равенства длин трёх участков L_1, L_2, L_3 (рис. 16).

Рассмотрим два примера, показывающие, что транспозиция экранов прекрасно выполняет свои функции даже в случае существенного различия длин L_1, L_2, L_3 . Для удобства основные исходные данные заимствуем из примера статьи [5], где линия 10 кВ длиной 6 км была выполнена кабелями 630/95 мм², проложенными сомкнутым треугольником, и для линии достаточным оказалось обустроить один полный цикл транспозиции экранов. Погонное наводимое на экран напряжение составляло 50 В на каждые 1000 м длины кабеля и 1000 А тока в жиле.

Пример № 1. Пусть линия длиной 6 км оказалась разбита на участки длиной $L_1 = 2500$ м, $L_2 = 2500$ м, $L_3 = 1000$ м. Тогда при токе жилы нормального режима 800 А наведённое на экран напряжение промышленной частоты составит: на 1-м участке $U_{\phi 1} = 50 \cdot 2,5 \cdot 0,8 = 100$ В, на 2-м участке $U_{\phi 2} = 100$ В, на 3-м участке $U_{\phi 3} = 50 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 40$ В.

Коэффициент транспозиции [3,4]:

$$K_T = \frac{\sqrt{[U_{\phi 1} - 0,5(U_{\phi 2} + U_{\phi 3})]^2 + [0,5 \sqrt{3} (U_{\phi 2} - U_{\phi 3})]^2}}{(U_{\phi 1} + U_{\phi 2} + U_{\phi 3})} = 0,25.$$

Согласно [5] вообще без транспозиции относительное значение тока в экране $D_1 = 0,25$ о.е., абсолютное значение $I_{\phi} = D_1 \cdot I_{ж} = 0,25 \cdot 800 = 200$ А. После применения транспозиции с участками разной длины ток в экране снизится, но не до нуля, а до некоторого значения, отвечающего небалансу трёх наводимых напряжений.

В условиях неидеальной транспозиции относительное значение тока в экране $I_{\phi}/I_{ж} = D_1 \cdot K_T = 0,25 \cdot 0,25 = 0,0625$ о.е., абсолютное $I_{\phi} = (I_{\phi}/I_{ж}) \cdot I_{ж} = 0,0625 \cdot 800 = 50$ А. Как видно, из-за неидеальной транспозиции ток в экране снизился с 200 А не до нуля, а до 50 А, т.е. в 4 раза. Следовательно, потери в экранах снизились в 16 раз — так сильно, что основная цель транспозиции безусловно достигнута.

Пример № 2. Пусть в условиях примера № 1 на 3-м участке длиной $L_3 = 1000$ м фазы кабеля проложены сомкнутым треугольником лишь на отрезке 250 м, а 750 м проложены в пучке полимерных труб диаметром 225 мм каждая.

Для треугольника погонная наводка составляет 50 В на каждые 1000 м и 1000 А, а для трубно-

го участка отношение $s/d_3 = 225/40 = 5,625$ и согласно рис. 3 из [5] погонное наводимое на экран напряжение составит уже 150 В. Тогда при токе жилы нормального режима 800 А наведенное на экран напряжение промышленной частоты для 1-го и 2-го участка, как и в примере № 1, составит по 100 В, а на 3-м участке будет $U_{33} = 50 \cdot 0,25 \cdot 0,8 + 150 \cdot 0,75 \cdot 0,8 = 100$ В, т.е. совпадет с первыми двумя.

Коэффициент транспозиции [3,4] $K_T = 0$, ток в экране $I_3 = 0$, потери в экране $P_3 = 0$, или, иными словами, в рассмотренном случае транспозиция ведет себя как идеальная, хотя длины трёх её участков серьёзно отличаются (2500, 2500, 1000 м).

Два приведённых примера показывают, что нет никакого смысла добиваться равенства длин кабеля между узлами транспозиции, если при этом не задаваться вопросом о способах прокладки фаз кабеля и расстояниях между ними. Очевидно также, что различие длин в метры и даже десятки метров совершенно малозначимо, ведь в примерах различие длин достигало 2500—1000=1500 м, и это не помешало успешной работе транспозиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В схемах заземления экранов кабелей 6—500 кВ провода, соединяющие экранные ОПН с концевыми или транспозиционными муфтами, желательнее иметь малой длины в несколько метров. Однако никаких оснований для запрета применять провода длиной более 10 (15) м не существует, в том числе в международных документах CIGRE.

Для повышения надёжности кабельных линий, особенно 220—500 кВ, на опорах сопряжённых с ними воздушных линий рекомендуется выполнить мероприятия ПУЭ по организации защищённых подходов: снизить сопротивление заземления опор до уровня не более 10—20 Ом, установить 1—2 молние-защитных троса.

Нет никаких оснований требовать, чтобы в схемах заземления экранов кабелей 6—500 кВ длины соединительных проводов были одинаковы у разных фаз линии. Одностороннее заземление экранов или транспозиция остаются эффективными мероприятиями по снижению токов и потерь в экранах даже в случаях, когда длины проводов и длины участков кабеля отличаются на сотни метров.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110—500 кВ. Условия создания. Нормы и требования.
2. СТО 56947007-29.060.20.072-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110—500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.
3. СТО 56947007-29.060.20.103-2011. Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110—500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.
4. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6—500 кВ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с.
5. Дмитриев М.В. Выбор и реализация схем заземления экранов однофазных кабелей 6—500 кВ // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», № 6, 2013, с. 90—97.
6. Guide of the protection of specially bonded cable systems against sheath overvoltages. Cigre working group 07 of study committee n.21 (HV insulated cables). ELECTRA, № 128, 1990.

join the best:

4-8 апреля 2016

Дюссельдорф, Германия | www.wire.de

join the best – добро пожаловать на лидирующую мировую выставку проволоки и кабеля! Только здесь и сейчас, на лидирующей мировой выставке проволоочной и кабельной индустрии Вы можете получить полный спектр информации о самых современных инновациях и перспективных трендах отрасли, о современных станках и оборудовании для производства кабельной и проволоочной продукции – ведь именно здесь, в Дюссельдорфе, встречаются специалисты, эксперты, а так же ведущие предприятия индустрии. **В центре внимания wire 2016:** растущая роль медной проволоки в автомобилестроении, сфере телекоммуникаций и электронике.

Обязательный пункт Вашего делового календаря – визит на **wire 2016 в Дюссельдорфе!**

wire®

Düsseldorf



Лидирующая международная выставка проволоки и кабеля



Технологии кабельной индустрии
Технологии пружин
Металлы и сплавы
Оборудование для сварки и термической обработки

600 - Мессе Дюссельдорф Москва
119021 Россия - Москва
ул. Тимур Фрунзе, д. 3, стр. 1
Тел.: +7 (495) 985 91 99 (202)
Факс: +7 (499) 246 19 85
pkulevaE@messe-duesseldorf.ru
www.messe-duesseldorf.ru


Messe
Düsseldorf