

Автоматическое повторное включение на воздушно-кабельных линиях электропередачи 110–500 кВ

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

В предыдущем номере журнала была опубликована статья [1], авторы которой справедливо обращают внимание на необходимость разработки алгоритмов работы автоматического повторного включения (АПВ) воздушных линий 110 кВ и выше, имеющих кабельные участки. Так, при повреждении и коротком замыкании на воздушном участке воздушно-кабельной линии цикл АПВ является эффективным способом восстановления электроснабжения потребителей, а вот при повреждении на кабельном участке АПВ линии не только бесполезно, но даже вредно, ведь оно может привести к ещё большим повреждениям изоляции кабеля.

Для изучения вопросов организации алгоритмов АПВ на воздушно-кабельных линиях, как следует из [1], электросетевые компании даже выступили за проведение научно-исследовательской работы на соответствующую тему.

Идеология АПВ на воздушно-кабельных линиях проста: если повреждение обнаружено на кабельном участке, то необходимо выдать команду на запрет АПВ такой линии.

Однако, как может показаться из [1], в рамках внедрения АПВ авторы собираются решать гораздо более серьёзную задачу — отыскание конкретного места повреждения кабельной линии (ОМП), т.е. вычисление точного расстояния от конца кабельной линии до её повреждённого участка.

Вообще термин ОМП имеет отношение прежде всего к выведенным в ремонт кабельным линиям. ОМП на отключённой кабельной линии занимает до нескольких часов, даже если работы ведут профессионалы высокого класса с большим опытом работы. При этом нужны соответствующая подготовка схемы заземления экранов кабеля, передвижная лаборатория, оснащённая целым комплексом приборов и установок, в которых реализованы различные методы ОМП, ведь повреждения бывают сложные, и не всегда их просто найти, применяя какой-то один метод. Учитывая изложенное, есть основания считать труднореализуемой идею авторов статьи [1] производить ОМП воздушно-кабельной линии автоматически, причём с высокой точностью, да ещё и за доли секунды,

которые имеются для принятия решения по запуску или отказу от АПВ.

Приведённый ниже материал показывает, как можно было бы сравнительно просто и надёжно организовать АПВ воздушно-кабельной линии, обойдясь без приобретения дорогих и капризных установок ОМП, а также сведя к минимуму научно-исследовательские работы.

ВОЗДУШНО-КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ И АПВ

Понятие «автоматическое повторное включение (АПВ)» — одно из базовых в электроэнергетике. Например, АПВ на линии электропередачи предполагает такую последовательность событий и действий:

- на линии возникает повреждение (короткое замыкание);
- релейная защита фиксирует снижение напряжения и рост тока на линии;
- защита даёт команду на отключение выключателей линии в обоих её концах;
- выдерживается некоторое время, которое может достигать нескольких секунд и называется «бестоковой паузой АПВ» и требуется для того, чтобы повреждение, если оно проходящее, имело возможность самоустраниться;
- выполняется попытка подачи напряжения от сети на линию с целью выяснения, устранилось ли повреждение или нет, для чего на одном из концов линии даётся команда на замыкание выключателей («опробование линии напряжением»);
- в случае отсутствия повреждения даётся команда на замыкание выключателей и на другом конце линии («замыкание линии в транзит»), т.е. линия возвращается к исходному нормальному режиму работы;
- в случае, если опробование линии напряжением было unsuccessfully и повреждение на линии не устранилось, линия вновь полностью отключается от сети и требует осмотра (также возможна повторная попытка опробования напряжением через какое-то время, называемая «повторное АПВ»).

Понятие «воздушно-кабельная линия» (или «кабельно-воздушная линия») стало широко использоваться не так давно. Как правило, под ним понимают:

- воздушную линию, имеющую кабельные заходы в концевые распределительные устройства (РУ), или же имеющую кабельные вставки по трассе;
- кабельную линию, размещённую на опорах воздушной линии (например, такая линия может быть выполнена универсальным самонесущим кабелем 6—35 кВ типа MultiWiski).

Далее в статье будем рассматривать только первый из двух перечисленных вариантов воздушно-кабельной линии, поскольку только для него можно говорить об АПВ.

На рис.1 показаны различные варианты воздушно-кабельной ли-

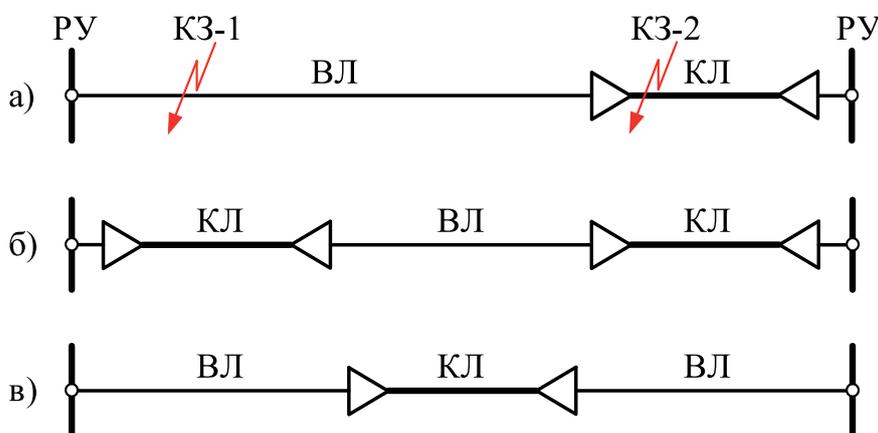
нии, которые отличаются числом и расположением кабельных участков. Организация кабельных участков стала возможна после того, как в сетях номинальным напряжением вплоть до 500 кВ получили широкое распространение однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Дело в том, что такие кабели имеют твёрдую изоляцию, т.е. для них сняты ограничения на перепад высот по трассе. Следовательно, без особых проблем муфты таких кабелей можно монтировать даже на значительной высоте над землей — например, на опорах воздушных линий, превращая их в так называемые переходные опоры в местах сопряжения воздушного и кабельного участков. Также удобство монтажа связано и с однофазной конструкцией кабелей.

Техническая возможность создавать воздушно-кабельные линии неразрывно связана с появлением нового поколения кабелей, а вот необходимость в подобных смешанных линиях возникает по следующим причинам.

1. РУ выполнено с элегазовой изоляцией (КРУЭ), и для завода воздушных линий в здание с КРУЭ приходится использовать кабели.
2. К РУ подходит большое число воздушных линий, и для экономии места заходы этих линий выполняются кабелями.
3. Воздушная линия подходит к РУ, которое расположено в населённом пункте, где её переводят в кабель по эстетическим соображениям и из-за высокой стоимости земли.
4. Переход воздушной линии через водные препятствия иногда требует организации в таких местах кабельной вставки.

Подавляющее число случаев организации на воздушных линиях кабельных участков происходит из-за причин, описанных в п.1—2, т.е. речь идёт об организации кабельных заходов воздушных линий в РУ (схемы рис.1а, б). Чаще всего эти заходы имеют длину не более 500 м, т.е. выполняются относительно короткими кабелями. Иными словами, кабельный участок составляет лишь малую часть протяжённости всей воздушно-кабельной линии.

Рис. 1. Различные варианты воздушно-кабельных линий



- а) — с кабельным заходом в одно из концевых РУ;
 б) — с кабельным заходом в оба концевых РУ;
 в) — с кабельной вставкой.

В расчёте на единицу длины удельная повреждаемость воздушного участка заметно выше, чем кабельного. Это происходит потому, что на воздушном участке на работу линии оказывают влияние климатические факторы (нагрузки при ветре и гололёде, перекрытия увлажнённой изоляции и перекрытия при разрядах молнии), действия сторонних лиц (наезды, вандализм), птицы и другие причины.

Итак, для большинства воздушно-кабельных линий короткие замыкания будут приходиться на воздушный участок, поскольку:

- повреждаемость единицы длины воздушного участка существенно выше, чем единицы длины кабельного участка;
- длина воздушного участка, как правило, существенно больше, чем кабельного.

Учитывая изложенное, вводить запрет на АПВ воздушно-кабельной линии из-за наличия на ней кабельного участка было бы неоправданным расточительством, ведь АПВ для воздушного участка является очень хорошим способом повышения надёжности электроснабжения потребителей, поскольку повреждения приходятся на воздушный участок и значительная часть из них — проходящие. Поэтому вместо полного отказа от АПВ на воздушно-кабельных линиях надо научиться различать, где именно произошло повреждение, и если оно на кабельном участке — то только тогда давать команду на запрет АПВ.

Ещё один вопрос, который может возникнуть — а стоит ли вообще вводить какие-то запреты на АПВ в случае повреждения на кабельном участке? Ведь если перечитать вышеизложенное, то повреждение на кабельном участке представляется настолько исключительным событием, что не стоит и говорить о нём за весь срок службы кабеля. Иными словами, почему бы не сделать АПВ безусловным, т.е. проводить АПВ каждый раз, не разбираясь, а где именно произошло повреждение?

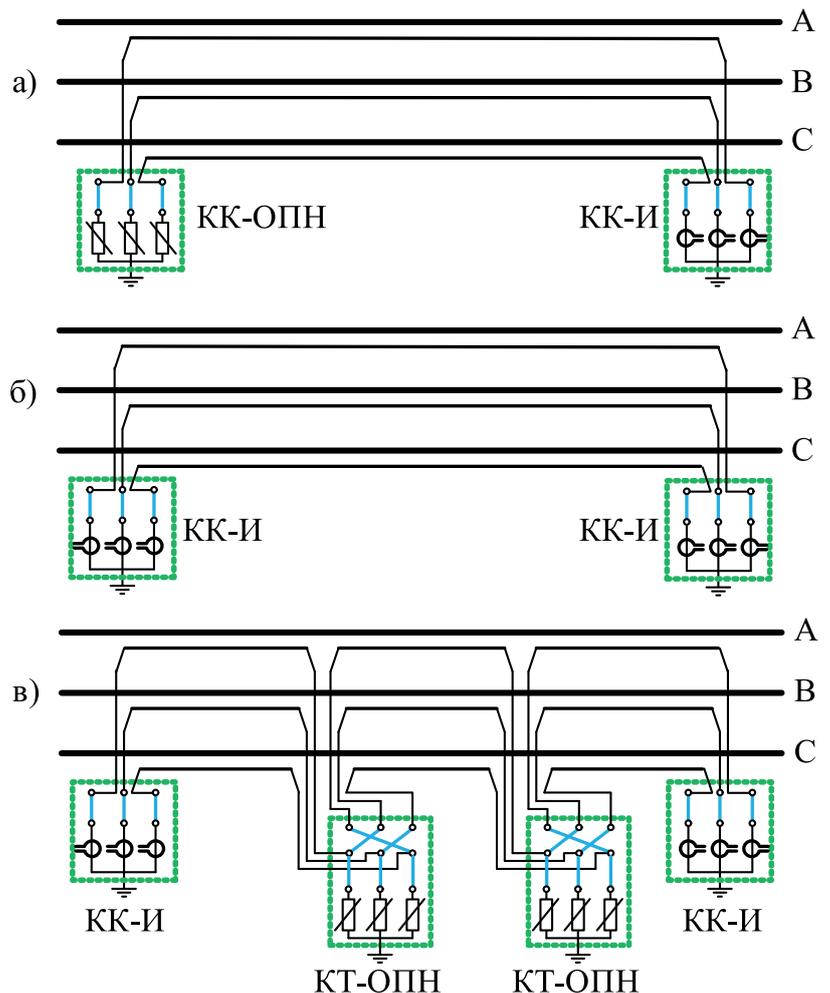
Да, действительно короткое замыкание главной изоляции кабеля является редким событием, но и последствия от повторной подачи напряжения на аварийный кабель могут быть крайне неприятными:

- повторное протекание тока короткого замыкания по жиле и экрану повреждённой фазы способно вызвать перегрев изоляции кабеля сверх допустимой температуры и её оплавление не только в месте первоначального повреждения, но и вдоль всей трассы кабеля; это может потребовать полной замены аварийной фазы по всей её длине, что крайне дорого;
- продукты горения дуги в месте повреждения одной фазы кабеля могут затронуть и повредить соседние фазы (такая фотография дана в статье [1]);

Ясно, что нельзя признать верным безусловное АПВ на воздушно-кабельных линиях (оно чревато опасными последствиями для кабеля) и нельзя считать верным отказ от АПВ (это чревато частыми отключениями потребителей). Именно запрет АПВ при повреждениях на кабельном участке и разрешение АПВ при повреждениях на воздушном участке — единственный разумный вариант организации эксплуатации воздушно-кабельных линий электропередачи.

В сетях переменного тока напряжением 110—500 кВ на линиях применяется два вида АПВ — трёхфазное (ТАПВ) и однофазное (ОАПВ). Если ТАПВ используют в сетях всех классов напряжения, то ОАПВ нашло применение прежде всего для линий 330 кВ и выше, поскольку для них до 95% повреждений носят однофазный характер. Из-за этого применение однофазного АПВ позволяет экономить коммутационный ресурс выключателей неповреждённых фаз линии и одновременно с этим сохранить на время отключения аварийной фазы передачу мощности по двум другим фазам. И только если ОАПВ было неуспешно или на линии повреждено сразу несколько фаз, то делается попытка ТАПВ.

Рис. 2. Схемы соединения и заземления экранов кабельных линий с однофазными кабелями



- а) — одностороннее заземление экранов;
- б) — двустороннее заземление экранов;
- в) — двустороннее заземление экранов с их транспозицией.

Разумеется, что при появлении на воздушной линии кабельного участка было бы желательно, чтобы алгоритмы работы АПВ не поменялись, т.е. если линия была заведена под ОАПВ, то его удалось бы сохранить. Поскольку кабельные участки выполняются однофазными кабелями, а не трёхфазными, то для сохранения ОАПВ на воздушно-кабельной линии есть все необходимые предпосылки, ведь имеется техническая возможность для пофазного контроля за состоянием кабеля и выдачи запрета на АПВ не для всей воздушно-кабельной линии, а только для повреждённой фазы.

Всё перечисленное относится к линиям переменного тока. Однако на линиях постоянного тока имеется своя специфика, и АПВ можно делать безусловным, т.е. использовать АПВ всегда, не выясняя, было ли повреждение на воздушном участке или же на кабельном. Дело в том, что линии электропередачи постоянного тока имеют в своём составе так называемый регулятор тока, действие которого серьёзно ограничивает ток короткого замыкания практически на уровне номинального тока. Иными словами, на любых воздушно-кабельных линиях постоянного тока короткие замыкания на кабельном участке даже при использовании АПВ не вызовут развитие аварии в тех масштабах, в которых это могло быть на линиях переменного тока, где ток короткого замыкания в разы или в десятки раз больше номинального тока.

В частности, на воздушно-кабельной линии постоянного тока напряжением ± 300 кВ, которую планируется построить в России в Ленинградской области между Северо-Западной ТЭЦ и Выборгской преобразовательной подстанцией (кабельный участок линии будет проложен по дну Финского залива) никаких запретов на АПВ вводить не следует. Для этой линии АПВ можно делать всегда вне зависимости от места повреждения: просто если повреждение было на кабельном участке, то такое АПВ с вероятностью 100% будет неуспешно, но не вызовет при этом развития числа дефектов уже повреждённого кабеля.

АПВ И ЗАЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ

Силовые однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, которые используются в сетях 110—500 кВ, и в частности на воздушно-кабельных линиях электропередачи, имеют в своей конструкции медные экраны, требующие особого внимания к выбору схемы соединения и заземления [2].

На рис. 2 представлены три основные схемы соединения и заземления экранов однофазных кабелей 6—500 кВ, отличающиеся величинами наведённых в экранах напряжений и токов промышленной частоты 50 Гц, а также вызванных ими потерь активной мощности. Для некоторых из схем требуется применение специальных нелинейных ограни-

чителей перенапряжений ОПН, размещаемых или в концевых коробках (КК-ОПН), или в коробках трансформации (КТ-ОПН).

На воздушно-кабельной линии запрет АПВ должен быть сформирован при повреждении на кабельном участке. В свою очередь наличие повреждения на кабеле или за его пределами легко выявить, измеряя токи в экранах в местах их заземления. Поскольку три основные схемы заземления экранов кабелей, показанные на рис. 2, отличаются числом мест заземления экранов, то для них потребуется разный объём измерений — различное число концевых измерительных коробок (КК-И), внутри которых установлены трансформаторы тока (ТТ).

Проще всего организовать АПВ на воздушно-кабельных линиях с кабельными участками, имеющими одностороннее заземление экранов, т.е. всего одно место, где заземлены экраны (схема рис. 2а). В случае заземления экранов сразу в нескольких точках (схемы рис. 2б и рис. 2в) выявление повреждённого участка воздушно-кабельной линии и организация АПВ будут уже несколько сложнее. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

АПВ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ЗАЕМЛЕНИИ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ

Ранее отмечалось, что подавляющее большинство воздушно-кабельных линий имеют лишь короткие кабельные участки, причём преимущественно в местах захода линий в распределительные устройства станций и подстанций.

В статье [2] и другой литературе показано, что для коротких кабельных линий лучше всего применять одностороннее заземление экранов (схема рис. 2а). Поэтому для кабельных заходов воздушных линий именно эта схема заземления используется чаще всего, ведь заходы как раз небольшой длины, до нескольких сотен метров.

Экраны кабельных заходов, выполненных однофазными кабелями, со стороны РУ глухо заземляются с помощью специальной измерительной концевой коробки КК-И, имеющей три однофазных трансформатора тока, а со стороны воздушной линии соединяются с переходной опорой через ограничители перенапряжений ОПН, размещаемые в специальной кабельной концевой коробке типа КК-ОПН (рис. 3).

Рис. 3. Кабельный заход воздушной линии в распределительное устройство

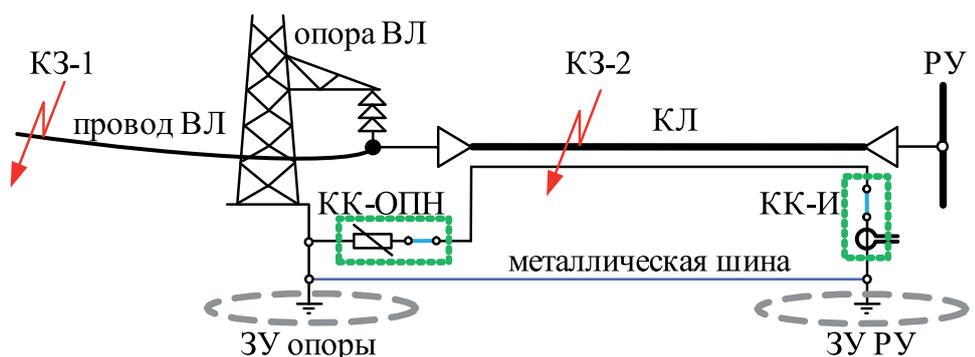
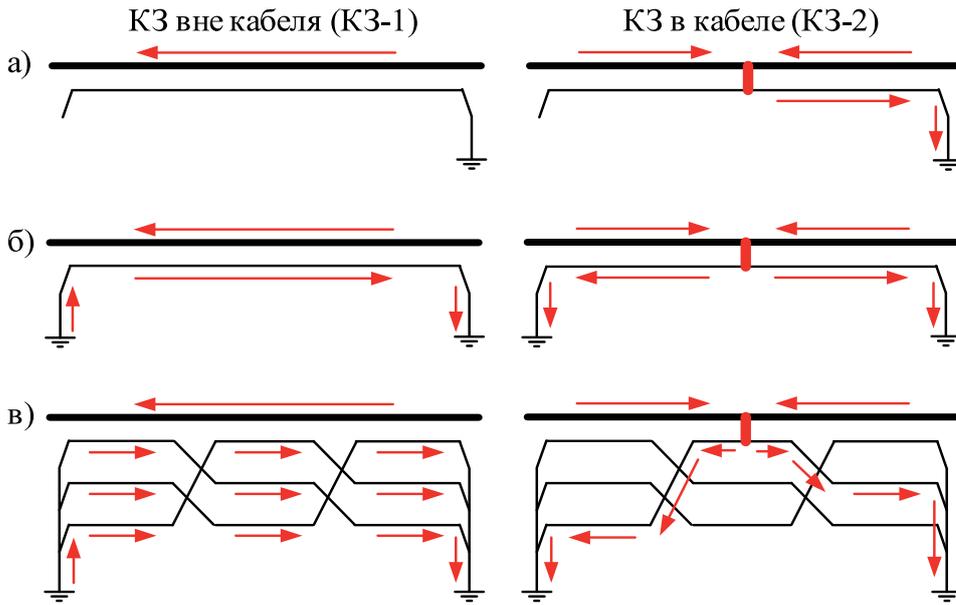


Рис. 4. Прохождение токов в экранах однофазных кабелей в зависимости от места повреждения



а) — при одностороннем заземлении экранов (показана только повреждённая фаза);
 б) — при двустороннем заземлении экранов (показана только повреждённая фаза);
 в) — при транспозиции экранов (показаны все три фазы).

Также вдоль всей кабельной линии в некоторых случаях целесообразно проложить металлическую шину [3], позволяющую:

- снизить напряжение промышленной частоты, наводимое на экраны при внешних по отношению к кабелю коротких замыканиях (на воздушном участке линии или же во внешней сети);
- снизить сопротивление заземления переходной опоры и уравнивать её потенциал с потенциалом заземляющего устройства (ЗУ) распределительного устройства с целью минимизировать риск повреждения ОПН в коробке КК-ОПН при разрядах молнии в переходную опору ВЛ или при коротких замыканиях на территории РУ.

На рис. 4а изображены направления протекания тока короткого замыкания в зависимости от места короткого замыкания по отношению к кабельному участку, имеющему одностороннее заземление экранов. Как видно, при внешнем коротком замыкании (например, при коротком замыкании на воздушном участке линии) тока в экране кабеля нет, тогда как при повреждении кабеля в месте заземления экрана аварийной фазы будет проходить ток короткого замыкания. Поэтому для воздушных линий, имеющих кабельные заходы, выявление повреждённого участка может быть выполнено очень просто — достаточно со стороны РУ в цепь заземления экранов однофазных кабелей установить измерительные трансформаторы тока, и по факту появления в них тока промышленной частоты давать команду на запрет АПВ линии.

Если на кабельном участке произошло повреждение сразу трёх фаз и возникло трёхфазное короткое замыкание, то ток будет в экране каждого из трёх однофазных кабелей (токи I_{3A} , I_{3B} , I_{3C} на рис. 5), а вот суммарный ток I_{ABC} будет отсутствовать. По этой причине контролировать токи в экранах надо именно отдельно

в каждой из фаз, т.е. нужны три отдельных однофазных трансформатора тока ТТ, а не один общий на три фазы трансформатор тока (на рис. 5 он обозначен как ТТ-3). Наличие трёх ТТ также позволяет выдавать команду на запрет АПВ пофазно, т.е. требуется для организации ОАПВ воздушно-кабельной линии.

Итак, для наладки АПВ на воздушно-кабельной линии, имеющей кабельный участок с односторонним заземлением экранов, для каждой из трёх фаз в месте заземления в экран надо установить трансформатор тока. Появление в какой-то из трёх фаз кабеля заметного тока трансформаторов тока означает необходимость дать запрет АПВ той фазы, где это зафиксировано (или дать запрет на АПВ всей линии, если на ней нет ОАПВ или если повреждения сразу в нескольких фазах).

Если одностороннее заземление экранов выполнено со стороны РУ, то тогда не возникает проблемы в выборе места для размещения ТТ и организации передачи информации от них к устройствам релейной защиты линии. Если же одностороннее заземление применено на кабельном участке, не являющимся кабельным заходом, а расположенным где-то на удалении от РУ (случай рис. 1в), то тогда потребуются решить проблемы по размещению ТТ на переходной опоре линии и организации канала связи этих ТТ с одним из концевых РУ линии.

АПВ ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ЗАЗЕМЛЕНИИ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ

подавляющее большинство воздушно-кабельных линий имеют лишь короткие кабельные участки, выполняющие роль кабельных заходов. Для них рекомендуется применение одностороннего заземления экранов, и, как следствие, организация АПВ может быть выполнена очень просто — за счёт установки трёх трансформаторов тока в месте заземления экранов на территории РУ.

Для некоторых воздушно-кабельных линий, которых явное меньшинство, кабельные участки имеют более сложные схемы заземления экранов (с точки зрения наладки АПВ) — это или двустороннее заземление (рис. 1б), или же транспозиция экранов (рис. 1в). Каждая из двух этих схем имеет свои особенности.

При двустороннем заземлении экранов токи промышленной частоты есть в экранах и местах их заземления не только при коротком замыкании в кабеле, когда ток короткого замыкания попадает из жилы прямо в экран через место повреждения изоляции кабеля, но и в ряде других случаев. Например, токи в экранах есть даже тогда, когда кабель вовсе не имеет повреждений изоляции — они наводятся в экранах магнитным полем токов жил кабеля [2]:

- в нормальном установившемся режиме работы кабеля;
- при внешнем по отношению к кабелю коротком замыкании.

Как следует из рис. 4б, при внешнем по отношению к кабелю повреждении (и в нормальном режиме работы) токи в местах заземления экранов любой фазы кабеля равны друг другу, но имеют противоположный знак. Иными словами, сумма этих токов будет равна нулю. Если же повреждение произошло в кабеле, то сумма токов будет равна току короткого замыкания сети.

Итак, для наладки АПВ на воздушно-кабельной линии, имеющей кабельный участок с двусторонним заземлением экранов, для каждой из фаз с обоих концов в экран надо установить по трансформатору тока (один — в начале кабеля, другой — в его конце), а их показания суммировать. Появление в какой-то из трёх фаз кабеля заметного суммарного тока пары ТТ означает необходимость дать запрет АПВ той фазы, где это зафиксировано (или дать запрет на АПВ всей линии, если на ней нет ОАПВ или если повреждения сразу в нескольких фазах).

АПВ ПРИ ТРАНСПОЗИЦИИ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ

При транспозиции экран кабеля теряет принадлежность к какой-то конкретной фазе кабеля (А, В, С), поскольку на протяжении трассы кабеля он расположен то рядом с одной фазой, то рядом с другой. Поэтому очень сложно организовать ОАПВ на воздушно-кабельных линиях с транспозицией экранов кабельного участка, если для этих целей использовать идею контроля токов в местах заземления экранов. Из-за этого далее будем говорить лишь о способах организации ТАПВ.

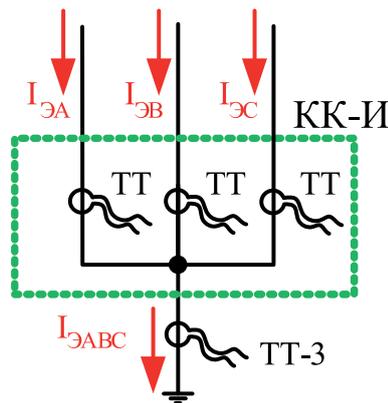
Разделяют идеальную и неидеальную транспозицию экранов. При идеальной транспозиции в нормальном установившемся режиме работы кабеля токи в экранах отсутствуют, и условиями для этого являются:

- равенство длин участков кабеля между узлами транспозиции;
- одинаковое расстояние между фазами кабеля на его участках между узлами транспозиции (везде фазы проложены треугольником или везде в ряд).

Случаев идеальной транспозиции почти не встречается, и поэтому в экранах кабелей с транспонированными экранами в нормальном режиме всё равно проходят токи промышленной частоты, хотя они и заметно меньше, чем при двустороннем заземлении экранов без их транспозиции. Если взять любой из трёх экранов линии с неидеальной транспозицией, то в местах его заземления токи равны друг другу по величине, но противоположного знака.

При внешнем по отношению к кабелю коротком замыкании токи в местах заземления любого из трёх экранов также равны друг другу по величине и имеют противоположный знак (рис. 4в).

Рис. 5. Узел заземления экранов трёх однофазных кабелей



Иными словами, и в нормальном режиме (при идеальной или неидеальной транспозиции), и при внешнем коротком замыкании сумма токов любого из трёх экранов будет равна нулю. Если же повреждение произошло в кабеле, то сумма этих токов будет равна току короткого замыкания сети (рис. 4в).

Итак, для наладки АПВ на воздушно-кабельной линии, имеющей кабельный участок с транспозицией экранов, для каждого из трёх экранов с обоих концов в экран надо установить по ТТ (один — в начале кабеля, другой — в его конце), а их показания суммировать. Появление в каком-то из трёх экранов заметного суммарного тока пары ТТ означает необ-

ходимость дать запрет АПВ всей линии (речь идёт только о ТАПВ, поскольку ОАПВ на таких линиях наладить очень сложно). Во время монтажа важно правильно разбить шесть ТТ на пары для последующего суммирования их показаний, ведь каждый из трёх экранов с одной стороны линии принадлежит одной фазе кабеля, а с другой стороны — уже другой фазе кабеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в России эксплуатируется большое число воздушных линий, которые имеют кабельные вставки. С годами число таких линий будет расти. Для воздушных участков АПВ является хорошим способом повышения надёжности электропитания потребителей, а для кабельных, напротив, крайне нежелательно. Поэтому у проектных и эксплуатирующих организаций возникает вопрос о том, как организовать АПВ на подобных воздушно-кабельных линиях.

Пока одни специалисты предлагают вовсе отказаться от АПВ на воздушно-кабельных линиях, другие категорически с ними не согласны, но для выявления повреждённого участка предлагают излишне сложные, ненадёжные, дорогостоящие технические решения, требующие закупок зарубежного оборудования. Вместе с тем, как было показано выше, для организации АПВ на воздушно-кабельных линиях вполне достаточно организовать простейшую схему измерений токов в экранах фазных кабелей, используя для этих целей успешно выпускаемые отечественной (!) промышленностью концевые измерительные коробки типа КК-И.

ЛИТЕРАТУРА

1. Догадкин Д., Марин Р., Реттлинг А., Линт М. «Выбор метода ОМП для разработки устройства АПВ с функцией контроля состояния ЛЭП» // Журнал «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», № 6(27), 2014, с. 88—91.
2. Дмитриев М.В. Выбор и реализация схем заземления экранов однофазных кабелей 6—500 кВ // Журнал «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», № 6(21), 2013, с. 90—97.
3. Дмитриев М.В. Безопасность кабельных линий 6—500 кВ // Журнал «КАБЕЛЬ-news», № 3, 2014, с. 30—36.