

Обзор мирового опыта строительства переходных пунктов кабельно-воздушных линий высокого напряжения

Традиционно линии электропередачи (ЛЭП) разделяют на воздушные линии (ВЛ) и кабельные линии (КЛ). Однако за последние десятилетия появилось большое число линий, которые нельзя однозначно отнести ни к ВЛ, ни к КЛ — это так называемые кабельно-воздушные линии (КВЛ), имеющие в своем составе одновременно и воздушные, и кабельные участки. Строительство и эксплуатация КВЛ требуют от энергетиков решения целого комплекса специфических задач, и одна из них заключается в выборе оптимальной конструкции переходных пунктов, которые приходится создавать в местах сопряжения друг с другом кабельных и воздушных участков трассы КВЛ.

ВВЕДЕНИЕ

Образование КВЛ часто происходит вследствие необходимости обустройства кабельного участка на ВЛ, например, в местах:

- прохождения линии в условиях плотной городской застройки;
- прохождения линии через территории промышленных и других производств, а также частных собственников с запретом землеуладельцев на прохождение ВЛ по своим территориям;
- захода линии в закрытое распределительное устройство (ЗРУ, КРУЭ);
- перехода линии через водную преграду.

Наибольшее число КВЛ можно встретить, прежде всего, в крупных динамично развивающихся городах, где по мере освоения новых территорий существующие ВЛ частями поэтапно переводятся в КЛ, а открытые распределительные устройства заменяются современными КРУЭ.

Энергосистема московского региона — лидер по числу КВЛ в России, поэтому именно ПАО «МОЭСК» первым в стране инициировало проведение анализа мирового опыта проектирования, строительства и эксплуатации КВЛ. Поскольку для Москвы и других крупных российских городов назрела необходимость разработки унифици-

Вычегжанин В.В.,
директор Департамента
эксплуатации сетей
35–500 кВ ПАО «МОЭСК»

Ткачук Я.В.,
начальник управления
эксплуатации высоко-
вольтных линий электро-
передачи ПАО «МОЭСК»

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент Санкт-
Петербургского
политехнического
университета

Ермошина М.С.,
к.ф.-м.н., руководитель
направления
альтернативного
проектирования
АО «НПО «Стример»



Рис. 1. ПП наземного исполнения на открытой площадке



Рис. 2. ПП наземного исполнения в здании

цированного переходного пункта (ПП) в местах соединения друг с другом кабельных и воздушных участков КВЛ, особый интерес для МОЭСК представляли применяемые в разных странах конструкции ПП.

Анализ большого числа международных публикаций и документов показал, что, к сожалению, ни один из источников не содержит исчерпывающей информации по проблемам ПП. Однако было бы несправедливо не отметить стандарты [1] и [2], где предприняты достаточно удачные попытки систематизировать вопросы создания и обслуживания ПП на линиях высокого и сверхвысокого напряжения. Опираясь на [1, 2], а также на другие материалы, ниже в статье представлены основные сведения о применяемых в мире переходных пунктах, которые будут учтены в дальнейшем при разработке для ПАО «МОЭСК» унифицированного переходного пункта на класс 110 кВ, а затем — и на другие классы номинального напряжения, в частности, на 220 кВ.

За пределами бывшего СССР практически не встречается класс напряжения 110 кВ, а распространены такие напряжения как 115, 132, 138 кВ и др. Наивысшим напряжением для кабельных сетей считается 550 кВ (тогда как в России это 500 кВ). Наиболее близкой классу 110 кВ является проблематика имеющихся в мире объектов напряжением 110–170 кВ.

ВИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПУНКТОВ

В общем случае в состав ПП может входить следующее оборудование:

- кабель и концевые кабельные муфты;
- ограничители перенапряжений (ОПН);
- трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН);
- коммутационные аппараты (разъединители и/или выключатели);
- шунтирующие реакторы для компенсации зарядной мощности КЛ;
- шкафы (терминалы) релейной защиты и автоматики;

- элементы питания собственных нужд (батареи и их зарядные устройства);
- прочее оборудование.

Для сооружения ПП также потребуются:

- фундаменты;
- заземляющее устройство с малым сопротивлением и молниезащита;
- подъездные пути и разворотные площадки;
- ограждение, озеленение территории.

С точки зрения размещения высоковольтного оборудования принципиально различают четыре варианта исполнения ПП:

- наземный ПП на открытой площадке (рисунок 1, применимо на любые классы напряжения вплоть до 550 кВ);
- наземный ПП в здании (рисунок 2, применимо на классы до 245 кВ);
- наземный компактный ПП с элегазовым оборудованием контейнерного исполнения;
- ПП на опоре ВЛ (рисунки 3–4, применимо на классы до 170 кВ).

Выбор конкретного варианта исполнения ПП (на земле, в здании, на опоре) зависит, прежде всего, от следующих факторов:

- класс номинального напряжения;



Рис. 3. Двухцепный ПП на опоре ВЛ



Рис. 4. Одноцепный ПП на опоре ВЛ

- климатические условия (низкие температуры, налипание снега и льда);
- предполагаемый состав высоковольтного оборудования (в том числе необходимость фиксации мест повреждений и сохранения АПВ);
- наличие свободной площадки, стоимость земли, соответствие требованиям городской архитектуры;
- удобство монтажа оборудования и его обслуживания;
- защита людей при взрывном разрушении оборудования;
- защита оборудования от действий третьих лиц (вандалов).

Преимущества ПП на опоре ВЛ

Мировая практика такова, что более 90% всех ПП на классы напряжения 110–170 кВ выполняются на опорах ВЛ, и этому есть две основные причины:

1. В подавляющем числе случаев состав оборудования ПП минимален и включает в себя только концевые муфты и ОПН — все они могут быть компактно размещены на опоре ВЛ. Также на опоре найдется место и для измерительных ТТ, необходимых для организации релейной защиты КВЛ (удобно применять ТТ разъемного типа, которые надеваются на кабель под муфту, или же применять оптические ТТ).

2. Установка оборудования ПП на опоре ВЛ, в особенности многогранной, позволяет отводить под ПП небольшую площадку, что весьма выгодно, если принять во внимание высокую стоимость земли в современных крупных городах.

Недостатки ПП на опоре ВЛ

Помимо преимуществ, ПП на опоре ВЛ обладают и недостатками.

1. Процесс непосредственного монтажа кабеля и концевых муфт представляет собой комплекс работ на высоте и сопряжен с некоторыми трудностями, требует организации специальных строительных лесов с кабельными палатками (рисунок 5), а также использования подъемников. Отчасти поэтому в мировой практике ПП выполняются на опоре ВЛ, в основном, для классов напряжения менее 170 кВ.
2. Эксплуатация ПП, техническое обслуживание оборудования, его испытания и ремонт сопряжены с необходимостью работы на высоте, требуют использования различных специальных приспособлений, инвентаря, материалов. На ПП аварийно-восстановительные работы могут дополнительно осложняться, если их приходится выполнять в период образования гололеда и снеговой нагрузки, наличия ураганных ветров и грозовой активности.
3. Оборудование ПП, размещенное на опоре ВЛ, в случае своего взрывного разрушения представляет опасность для находящихся поблизости людей. При этом, чем больше высота установки муфт и ОПН, тем больше радиус разлета элементов. Анализ мирового опыта неожиданно показал, что на большинстве ПП, даже когда они размещены в населенных районах, мероприятия по защите людей отсутствуют. Исключение составили типовые опоры Англии и Венгрии (рисунок 6а), а также одна из опор в Корее (рисунок 6б), где оборудование снизу и с боков закрыто специальными сетчатыми ограждениями.



Рис. 5. Сооружение лесов вокруг ПП, выполненного на опоре ВЛ, для последующего монтажа муфт

4. Оборудование ПП, имеющееся на опоре ВЛ, хуже защищено от действий третьих лиц в сравнении, например, с ПП в здании. Вандалы могут забрасывать оборудование различными предметами, расстреливать из оружия, подниматься на площадки и траверсы. При анализе мирового опыта оказалось, что на большинстве опор ВЛ с ПП нет мер защиты оборудования, среди которых могли бы быть:

- боковые щиты, расположенные вокруг оборудования на высоте и позволяющие защитить от забрасывания посторонними предметами;
- забор, расположенный вокруг опоры;
- сетка из колючей проволоки, натянутая на нижних ярусах решетчатой опоры;
- временный демонтаж стэп-болтов на нижних элементах конструкции опоры;
- сигнализация, видеонаблюдение и другие меры.

Названные недостатки ПП на опорах (особенно в части защиты оборудования и людей) всегда воспринимались в ПАО «МОЭСК» достаточно серьезно, и поэтому в Москве большинство переходных пунктов класса напряжения 110 кВ выполнены не на опорах ВЛ, а в закрытых сооружениях.

Высокая стоимость земли в Москве и определенные трудности с возведением закрытых ПП вынудили искать разумную альтернативу сложившейся технической политике, для чего и была организована масштабная работа по анализу мирового опыта. Анализ показал, что в мире не существует такого ПП на опоре ВЛ, который бы удовлетворил современным высоким требованиям в части надежности электроснабжения потребителей, удобства монтажа, эксплуатации и ремонта ПП, безопасности жителей города и оборудования ПП, а также в части эстетичности внешнего вида конструкций ПП. Однако исследования все же показали, что разработка ПП на опоре ВЛ, удовлетворяющего современным требованиям безопасности и надежности электроснабжения потребителей мегаполиса, возможна.

При создании любого ПП специалистам, прежде всего, следует определиться с такими базовыми вопросами как:

- материал и конструкция опоры;
- число цепей ВЛ на опоре ПП;
- число кабелей на фазу ВЛ;
- варианты прокладки кабеля по опоре, его крепление и защита;
- тип концевых муфт;
- необходимость в ОПН, ТТ, ТН;
- необходимость в коммутационных аппаратах.



Рис. 6. ПП на опоре ВЛ, имеющей площадку для оборудования, закрытую сеткой: а) решетчатая опора; б) многогранная опора

В техническом задании на разработку унифицированного переходного пункта ПАО «МОЭСК» указало свои требования по каждому из перечисленных вопросов. В целом, как будет показано далее, эти требования не противоречат накопленному мировому опыту, а скорее дополняют и развивают его.

МАТЕРИАЛ И КОНСТРУКЦИЯ ОПОРЫ

В мире при сооружении ПП классов 110–170 кВ используют металлические (решетчатые или многогранные) опоры, а бетонные, деревянные, композитные — не применяются. Решетчатые чаще можно встретить в Европе, России, странах бывшего СССР, тогда как многогранные — в странах Америки и Азии.

Обычно ПП до 170 кВ являются двухцепными (рисунки 3, 6, 7), то есть представляют собой двухцепную опору ВЛ, на которую заведена двухцепная КЛ. Варианты одноцепных ПП (рисунок 4) достаточно редки. Также редки и случаи, когда число



Рис. 7. ПП на многогранной двухцепной опоре ВЛ. Используются сухие гибкие муфты

фаз ВЛ и число однофазных кабелей не совпадают друг с другом — например, на рисунке 8, где на каждую фазу одноцепной ВЛ приходится сразу два кабеля, включенных параллельно друг другу и тем самым повышающих допустимый ток КЛ до значений, которыми обладает воздушный участок КВЛ.

В документах [1, 2] для увеличения надежности электроснабжения и снижения сроков ремонтных работ предлагается вариант, когда на опоре ПП кроме основного комплекта из трех муфт и кабелей размещена резервная муфта с присоединенным к ней спускающимся к земле резервным кабелем (так называемая 4-я фаза). Однако встретить подобное решение на практике не удалось.

Анализ мирового опыта подтвердил, что оптимальной конструкцией для Москвы будет ПП на многогранной опоре по причине ее компактности и высокой степени заводской готовности.

ПРОКЛАДКА КАБЕЛЯ ПО Телу ОПОРЫ, ЕГО КРЕПЛЕНИЕ И ЗАЩИТА

Прокладку кабеля по телу опоры от уровня земли к установленным на высоте концевым муфтам можно выполнять как снаружи тела опоры, так и внутри. В мире удалось найти лишь несколько случаев, когда подъем кабеля осуществлялся внутри тела опоры — все они относятся к многогранным опорам ВЛ класса не более 60–70 кВ (рисунок 9). На остальных объектах, особенно напряжением 110–550 кВ, кабель всегда проходит снаружи тела опоры, поскольку имеет большой диаметр и допустимые радиусы изгиба, имеет значительный вес.

Крепление кабеля к телу опоры выполняется при помощи хомутов, требования к которым изложены в стандарте [1]. Крепления должны быть достаточно прочными для того, чтобы они выдерживали вес кабеля и динамические воздействия от токов КЗ. Особое внимание к отсутствию каких-либо перемещений кабеля должно быть в тех местах, где он заходит в муфты (во избежание деформации герметизирующих элементов муфты и ее пробоя). Так, на рисунках 3 и 4 видно, что вблизи концевых муфт кабеля закреплены хомутами на специальных плавно изгибающихся направляющих, обеспечивающих их подвод от вертикальной стойки опоры к муфтам.

Кабельные крепления могут изготавливаться:

- из немагнитных металлов (рисунки 3, 4);
- из различных пластиков черного, красного (рисунок 7) или других цветов.



Рис. 8. ПП на многогранной опоре ВЛ, имеющей два кабеля на одну фазу ВЛ



Рис. 9. ПП на многогранной опоре ВЛ. Кабель проходит внутри стойки опоры

Если крепления металлические, то они, как правило, должны быть сделаны или из алюминия, или из немагнитной стали [1]. При этом желательно предусматривать между креплением и кабелем резиновые или иные мягкие подкладки, которые будут снижать риск повреждения кабеля в месте крепления, а также допускать некоторое тепловое движение кабеля. Обычно крепления кабеля размещаются с интервалом каждые 1–2 м, а конкретное расстояние между ними зависит от диаметра кабеля, его гибкости и веса, конструкции металлического экрана и брони. Важно также, что конструкция опоры должна предполагать возможность установки креплений КЛ, для чего она должна быть оснащена крепежными площадками или отверстиями, следующими с необходимым интервалом.

В мире на многогранных опорах (их используют, в основном, в Америке и Азии) чаще всего применяют металлические хомуты, а пластиковые — редко. Что же касается решетчатых опор, то там доли металла и пластика примерно равны.

В местах выхода кабеля из земли и его подъема на опору повсеместно в мире используются различные способы его механической защиты. Один из вариантов представлен на рисунке 4 и заключается в том, что три фазы кабеля закрыты специальным коробом из стали, поднимающимся на высоту 2–3 метра от земли. Возможны и любые другие варианты, но общее правило следующее — вокруг отдельных фаз кабеля не должно образовываться замкнутых контуров из магнитных материалов, и поэтому, если защищать кабель стальными конструкциями, то они обязательно должны охватывать сразу три фазы одновременно. Интересно, что поскольку допустимый ток кабеля в закрытом коробе или трубе несколько снижен, то желательно обеспечить движение воздуха в конструкции, для чего в ее нижней части можно предусмотреть серию от-

верстий, достаточных для воздуха, но исключающих проникновение животных.

Вариант крепления кабеля к опоре, показанный на рисунке 10, был применен на одной из линий 154 кВ в Турции и является уникальным, поскольку запас кабеля, необходимый на случай замены поврежденной концевой муфты, уложен не в грунте рядом с опорой, а организован непосредственно на ней. Такое решение потребовало обустройства на опоре специальных металлических направляющих, оно достаточно интересно, но не может быть реализовано на многогранной опоре. Поэтому, если в ТЗ за базовый для ПАО «МОЭСК» был принят вариант ПП на многогранной опоре, то запас кабеля придется организовывать в земле. Что же касается хомутов для крепления кабеля, то данный вопрос не является принципиальным, и его решение разумно оставить за поставщиками муфт и кабеля.

КОНЦЕВЫЕ МУФТЫ

В мировой практике концевые высоковольтные муфты классифицируются:

- 1) по типу исполнения (наружного, внутреннего);
- 2) по типу наружной изоляции (полимерная, фарфоровая);
- 3) по типу внутренней изоляции (масляная, газовая, сухая).

Ввиду значительной стоимости высоковольтных муфт изменение конструкции основного изолятора с наружного на внутреннее исполнение, как правило, не приводит к существенной экономии, а вот универсальность изолятора при его разделении на разные типы исполнения снижается. Именно поэтому многие заводы-изготовители делают основной упор на создание единой конструкции, пригодной для установки как в открытых, так и закрытых электроустановках.

С появлением концевых муфт с полимерными (композитными) изоляторами, популярность фарфоровых концевых муфт стала снижаться, и на сегодняшний день данные типы муфт применяются в основном на объектах нефтепереработки и в большинстве своем поставляются в страны Ближнего Востока, Южной Америки, Китая. Главные недостатки муфт с фарфоровыми изоляторами:

- большой вес;
- склонность к хрупкому растрескиванию;
- относительно низкие допускаемые механические напряжения;
- неопределенность прочностных свойств в состоянии «изгиб плюс кручение»;
- недопустимость наклона муфт;
- взрывоопасность (выход муфты из строя, как правило, сопровождается взрывом изолятора с разносом осколков на десятки метров; взрыв одной из муфт может привести к выходу из строя расположенного поблизости оборудования).

Для России и, в частности, для Москвы оптимальным будет применение муфт с полимерными изоляторами.



Рис. 10. ПП на решетчатой опоре.
Запас кабеля обустроен на теле опоры

Муфты, заполненные изоляционной жидкостью

В мире муфты, заполненные изоляционной жидкостью, являются наиболее распространенными и часто применяемыми видами концевых муфт, изготавливаются на напряжение до 550 кВ, представляют собой традиционную конструкцию (в виде наружного фарфорового или композитного изолятора, заполненного изоляционным маслом), имеют широкую область применения (начиная с закрытых электроустановок и заканчивая промышленными зонами с высокой степенью загрязненности).

Преимуществами концевых муфт, заполненных изоляционной жидкостью, являются:

- низкая стоимость;
- хорошие эксплуатационные характеристики (высокая длина пути тока утечки, широкий диапазон температур эксплуатации от -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$, отсутствие ограничения по сечению применяемого кабеля вплоть до 2500 мм^2);
- высокая надежность при условии должного монтажа.

Монтаж концевых муфт, заполненных изоляционной жидкостью, не представляет собой сложную процедуру, однако требует ответственного и внимательного подхода. Качество разделки кабеля, соблюдение размеров, сборка узла герметизации, заливка компаунда и другие операции во многом определяют надежность и срок эксплуатации концевой муфты. Как правило, данные муфты не требуют обслуживания, однако в зависимости от места применения, а также потребностей эксплуатирующей организации, допускаются процедуры по чистке наружного изолятора, тепловизионному контролю, отбору проб масла для анализа его диэлектрических характеристик.

Муфты, заполненные изоляционной жидкостью, имеют ограничение по углу наклона от 0° до 30° в зависимости от класса напряжения и производителя. В качестве внутренней изоляции маслonaполненных муфт используют изоляционные компаунды, основными видами которых являются:

- минеральные масла;
- силиконовые масла;
- полиэфирные жидкости.

Газонаполненные муфты

Газонаполненные муфты, в отличие от масляно-полненных, требуют технического обслуживания, и помимо привычного периодического осмотра необходимо проведение постоянного контроля давления газа. Также существенным ограничением для данного типа муфт является низкая температура эксплуатации (до -30°C), из-за чего их применение в зонах с холодным климатом требует установки дополнительного обогрева. В настоящее время такие муфты делаются, в основном, на 300–550 кВ.

Сухие муфты

Сухие муфты не содержат жидкого или газообразного наполнителя (это снижает риск загрязнения окружающей среды, обеспечивает их взрывобезопасность и пожаробезопасность), не имеют ограничений по углу установки, не требуют технического обслуживания (не течет масло, нет необходимости в контроле давления газа, проверке диэлектрических и эксплуатационных характеристик изоляционного носителя), проще монтируются. В частности, конструкция сухих муфт позволяет проводить их монтаж на земле, не прибегая к сборке кабельных палаток на опорах ВЛ и других несущих конструкциях, и только затем выполнять подъем муфты на опору уже совместно с присоединенным к ней кабелем. Также интересно, что сухие концевые муфты могут быть гибкими, как это показано, например, на рисунке 7.

Сухие муфты отличает сложная и материалозатратная технология изготовления, поэтому у многих производителей данный тип оборудования не представлен на классы напряжения выше 170 кВ. Если говорить о стоимости, то они дороже традиционных маслянополненных муфт.

Обзор мирового опыта

При строительстве ПП для КВЛ классов до 170 кВ используются следующие типы концевых муфт:

- муфта, заполненная изоляционной жидкостью, с полимерным (композитным) изолятором (около 65% объектов);
- муфта, заполненная изоляционной жидкостью, с фарфоровым изолятором (около 20%);
- сухая муфта (около 15%);
- газонаполненная муфта (менее 1%).

Муфты с сухой изоляцией появились сравнительно недавно, обладают рядом существенных преимуществ, и число случаев их использования в мире будет только возрастать.

НЕОБХОДИМОСТЬ В ОПН И ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЗЕМЛЕНИЮ

Согласно [1] защитные силовые ОПН следует устанавливать на каждом конце кабельной линии, а характеристики ОПН должны быть выбраны с учетом условий их эксплуатации. В рамках обзора мирового опыта строительства ПП не удалось обнаружить ни одного ПП, где не было бы установленных ОПН. Это подтверждает уже упоминавшийся в отечественных публикациях факт, что положения 2-й главы ПУЭ, разрешающие не устанавливать ОПН

по концам кабельных вставок длиной более 1,5 км, ошибочны.

Выводы, которые можно сделать из обзора, таковы:

- ОПН требуются на всех переходных пунктах вне зависимости от длины КЛ;
- почти всегда ОПН установлены вертикально и жестко связаны с опорой;
- от вертикальной установки ОПН отказываются, в основном, только в США;
- случаи отказа от жесткого крепления ОПН (например, подвеска ОПН за верхние фланцы на фазные провода) достаточно редки;
- заземление ОПН выполняется прямо на металлоконструкции (исключение было обнаружено в Великобритании, где цепь заземления ОПН выполнена отдельно);
- оборудование для диагностики ОПН (счетчики и др.) не используется.

ОПН могут иметь как полимерную внешнюю изоляцию, так и фарфоровую. При повреждении ОПН с фарфоровым корпусом его куски представляют реальную опасность для оборудования ПП и для людей, оказавшихся рядом с ПП на момент аварии. Негативную роль здесь играет не только большая кинетическая энергия осколков фарфора, но их острая кромка. Если ОПН сделан с полимерной изоляцией, то последствия повреждения значительно менее опасны — поэтому для ПП, особенно при их размещении в населенной местности, предпочтительна именно эта изоляция.

Важным является вопрос о достаточной величине сопротивления заземления опоры ПП и обеспечение электромагнитной совместимости для того низковольтного оборудования, которое может быть установлено на опоре. В статье [3] показано, что для опоры ВЛ, на которой выполнен ПП, сопротивление заземления должно быть малым, близким к 0,5 Ом. Анализ требований, имеющихся в разных странах мира, неожиданно показал менее жесткие требования к этому сопротивлению:

- в Великобритании — до 10 Ом;
- в странах Восточной Европы — до 10 Ом (Венгрия, Литва, Россия, Украина и др.);
- в Германии, Австрии — в диапазоне от 2 до 4 Ом.
- по Америке — то, при котором обеспечивается безопасность при КЗ на опоре.

Иногда, когда ВЛ имеет короткие кабельные заходы в распределительное устройство (РУ), опоры ПП соединяют с контуром РУ при помощи металлической шины [1] (например, медного проводника в полимерной изоляции), что позволяет несколько снизить требования к величине сопротивления заземления непосредственно опоры ПП.

КОММУТАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ

При проектировании перехода из ВЛ в КЛ может встать вопрос о специальных легко демонтируемых перемычках между ними, которые позволят расцепить ВЛ и КЛ, например с целью испытаний или ремонта КЛ. Конструкция ПП может заметно усложниться, если для отделения кабельного и воздушно-го участков друг от друга планируется использовать не перемычки, а коммутационные аппараты.

Переключки или коммутационные аппараты могут быть полезны не только для расцепления ВЛ и КЛ, но также и для случаев, когда КЛ имеет два кабеля на фазу — для отключения кабелей друг от друга, чтобы испытания и ремонт одного из двух кабелей проводить без полного отключения КЛ [1].

Следует отметить, что, в отличие от переключек, коммутационные аппараты обеспечивают высокий уровень безопасности персонала, принимающего участие в испытаниях оборудования, его техническом обслуживании, поиске повреждений, ремонте. В качестве коммутационного аппарата может выступать или выключатель нагрузки (если необходимо коммутировать зарядные токи КЛ), или «полноценный» силовой выключатель (если требуется коммутация токов КЗ).

Обзор мирового опыта показал, что на обычных воздушных линиях класса до 170 кВ можно встретить коммутационные аппараты двух типов:

- разъединитель (рисунок 11);
- элегазовый выключатель нагрузки, имеющий последовательно установленный разъединитель, обеспечивающий создание видимого разрыва (рисунок 12).

Случаи использования указанных аппаратов на ПП КВЛ класса до 170 кВ, выполненных на опорах ВЛ, являются:

- редкими для разъединителей;
- очень редкими для выключателей.

Подавляющее большинство переходных пунктов (более 99%) во всем мире обустраивается без каких-либо коммутационных аппаратов. Случаи установки коммутационных аппаратов относятся, в основном, к США, где (что весьма важно) значительная часть территории страны не имеет холодного климата.

Москва и регион чрезмерно перегружены транспортом, и обслуживающему персоналу порой сложно оперативно добраться до ПП и выполнить расцепление воздушного и кабельного участков КВЛ друг от друга с целью ремонта и испытаний КЛ. Потому, несмотря на холодный климат, оснащение опоры ПП разъединителями, управляемыми дистанционно, является необходимым условием для сокращения перерывов в электроснабжении потребителей.



Рис. 11. ПП класса 115 кВ, оснащенный V-образным разъединителем

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АПВ. НЕОБХОДИМОСТЬ В ТТ

Появление на ВЛ кабельного участка усложняет релейную защиту линии. Обустройство защиты зависит также и от того, будет ли организован простой ПП на опоре ВЛ или же сложный ПП наземного исполнения с силовыми выключателями, разъединителями и другим оборудованием. В любом случае, при построении защит КВЛ важно принять во внимание следующие моменты [1]:

- различие продольных сопротивлений воздушного и кабельного участков КВЛ;
- изменение продольного индуктивного сопротивления КВЛ, если КЛ имеет сразу несколько кабелей на фазу, и один из них выведен из работы;
- наличие шунтирующих реакторов, если они размещены на ПП;
- необходимость определять, где именно на трассе КВЛ случилось повреждение (на воздушном участке или на кабельном), чтобы верно принять решение о разрешении или запрете автоматического повторного включения (АПВ).

Также согласно [1] необходимо учитывать, что в случае применения АПВ могут потребоваться специальные мероприятия по разряду КЛ перед повторным включением КВЛ под напряжение сети. При этом, если для нужд разряда КЛ будут использоваться подключенные к линии электромагнитные ТН, то следует проверить на предмет перегрева обмоток ТН и их повреждения.

Из всех перечисленных вопросов, наиболее актуальным, имеющим отношение практически ко всем КВЛ, является АПВ. Многие повреждения на ВЛ проходящие, и поэтому на ВЛ широко используется АПВ. На кабельных же линиях, напротив, повреждения не проходящие, и повторное включение может вызвать существенное развитие последствий аварии. Поэтому для КВЛ целесообразно организовывать селективное АПВ, заключающееся в том, что при аварии на воздушном участке АПВ разрешается, а при аварии на кабельном участке — запрещается.

Обзор мирового опыта по организации АПВ на КВЛ, описанный, в частности, в [4], говорит о том, что

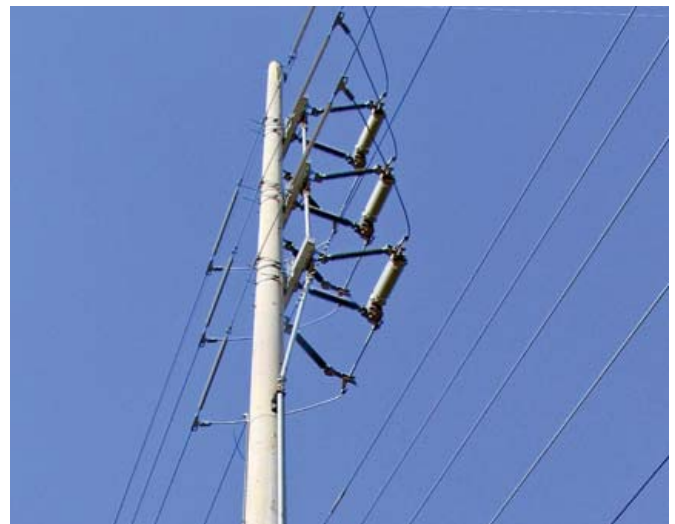


Рис. 12. Опора ВЛ 115 кВ, оснащенная выключателем нагрузки с функцией видимого разрыва

в большинстве стран АПВ разрешено (в той или иной форме) и лишь в некоторых странах АПВ полностью запрещено.

Варианты АПВ, которые применяются в мире, таковы:

- безусловное (включение КВЛ происходит вне зависимости от места КЗ);
- селективное (включение КВЛ возможно, если КЗ не на КЛ).

Безусловное АПВ чаще всего применяется:

- если КЛ примыкает к одному из концов КВЛ и имеет длину до 300 м;
- если длина всех участков КЛ менее 10% от длины трассы всей КВЛ.

Селективное АПВ чаще всего применяется:

- если КЛ расположена в средней части КВЛ;
- если КЛ имеет большую длину на фоне длины всей КВЛ.

Селективное АПВ может быть организовано следующим образом:

- дистанционная защита (эффективна, если КЛ примыкает к концу КВЛ);
- дифференциальная защита (возможна при любом положении КЛ на КВЛ).

Для создания дифференциальной защиты КЛ чаще применяются на выбор:

- ТТ, которые надеваются на сам кабель у муфты (очень распространено);
- ТТ, которые надеваются на экран кабеля у муфты (только Франция);
- оптические ТТ, которые крепятся на кабель у муфты (Дания, Испания — рисунок 13).

Установка ТТ непосредственно под кабельной муфтой позволяет включить в зону дифференциальной защиты только сам кабель. Если же установить ТТ вблизи фазного вывода муфты (на высоком потенциале), то только тогда в зону защиты окажется включена и концевая муфта. Из высоковольтных ТТ наиболее компактным будет оптический ТТ, измерительная петля которого размещена на верхнем фланце муфты.

Итак, при построении защит КВЛ и организации селективного АПВ целесообразно использовать оптические ТТ, смонтированные вблизи от верхнего фланца концевых муфт. Передача инфор-

мации будет осуществляется по оптическому волокну, встроеному в грозотрос ВЛ и в медный экран КЛ.

ПИТАНИЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Согласно [2] оборудование, отвечающее за АПВ, должно быть установлено на ПП в специальном контейнере таким образом, чтобы он хорошо вентилировался и имел поддержку климата (охлаждение и нагрев). Это нужно, поскольку:

- необходимо исключить риск образования конденсата, опасного для электроники;
- защиты работают только в диапазоне от -10°C до $+55^{\circ}\text{C}$;
- время работы батарей зависит от температуры.

Для организации работы дифференциальной защиты кабельного участка КВЛ и передачи сигнала между соседними ТТ, а также для обогрева терминалов в зимнее время, необходимо обеспечение питания собственных нужд. Кроме того, питание может потребоваться для работы приводов коммутационных аппаратов ПП, систем мониторинга и диагностики оборудования, видеонаблюдения и контроля доступа.

В общем случае, существуют следующие варианты питания нужд ПП:

- от высоковольтных ТН, которые через выпрямитель заряжают батарею;
- от возобновляемых источников энергии, размещенных на ПП;
- от местных низковольтных сетей.

Москва является густонаселенным мегаполисом с хорошо развитыми сетями различных классов напряжения, поэтому наиболее выгодным вариантом питания собственных нужд ПП будет подключение к ближайшей сети 0,4 кВ, желательно через разделительный трансформатор, который позволит исключить занос высокого потенциала в низковольтную сеть при КЗ на опоре ПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление большого числа кабельно-воздушных линий ставит инженерам целый комплекс актуальных технических задач, одной из которых является создание конструкции переходного пункта, удовлетворяющей ряду требований, таких как:

- компактность;
- безопасность;
- эстетичный внешний вид;
- удобство монтажа и обслуживания.


Изучение мирового опыта не позволило найти переходных пунктов, в полной мере обладающих перечисленными качествами. Поэтому ПАО «МОЭСК» приняло решение разработать собственный переходной пункт на класс напряжения 110 кВ с возможностью распространения идей на другие классы. Новому ПП будет посвящена отдельная статья. 



Рис. 13. Измерительная петля оптического ТТ, установленная на кабель под муфтой

ЛИТЕРАТУРА

1. Guide for Planning and Designing Transition Facilities between Overhead and Underground Transmission Lines // IEEE 1793-2012. New York, USA, 2012, 40 p.
2. Short Circuit Protection of Circuits with Mixed Conductor Technologies in Transmission Networks // CIGRE Working Group B5.23. 2014, 241p.
3. Дмитриев М.В. Заземление переходных опор КВЛ 35-500 кВ // Новост
4. Дмитриев М.В. Кабельно-воздушные линии. Цикл АПВ и коммутационные перенапряжения // Новости Электротехники, № 5-6, 2017. С. 80-84.
- сти Электротехники, № 1(103), 2017. С. 48-51.