

С годами в сетях появляется всё больше воздушных линий, где приходится обустроить кабельные участки. Кабельно-воздушные линии требуют решения многих технических задач, одна из которых – это наладка цикла автоматического повторного включения (АПВ).

Свое мнение о факторах, влияющих на проведение АПВ, высказывает петербургский автор Михаил Дмитриев.

КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ 110–500 кВ

Цикл АПВ и коммутационные перенапряжения



Михаил Дмитриев,

к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Линии электропередачи (ЛЭП) традиционно разделялись на воздушные (ВЛ) и кабельные (КЛ). Однако всё чаще теперь приходится говорить о комбинированных линиях, имеющих как воздушные участки, так и кабельные. Такие линии называются воздушно-кабельными или кабельно-воздушными (КВЛ), и своим происхождением обычно они обязаны ситуациям, когда на ВЛ приходится организовывать кабельный заход в распределительное устройство (РУ) или кабельную вставку на трассе.

Заходы ВЛ в РУ удобно выполнять именно кабелями, поскольку многие РУ стали закрытого типа и ввод ВЛ в здание затруднен. Также кабели на подходах к РУ удобны тем, что позволяют провести в одном коридоре сразу много линий. Что касается кабельных вставок, то они возникают в местах перехода ВЛ через широкие водные преграды (реки, водоемы), в населенных пунктах и городах.

Проблематика КВЛ весьма разнообразна, и к ней можно отнести, например, такие темы, как:

- разработка переходного пункта (ПП) оптимальной конструкции;
- создание подходящего контура заземления ПП [1];
- защита от перенапряжений [2];
- наладка цикла АПВ [3, 4].

До сих пор вопросы АПВ рассматривались отдельно от перенапряжений, но в одной из работ [5] появилось утверждение, что АПВ на КВЛ следует запретить, поскольку повторное включение КВЛ под напряжение сети чревато возникновением коммутационных перенапряжений, опасных для кабелей. С этим положением нельзя согласиться, и поэтому рассмотрим, какие на самом деле факторы могут влиять на решение о применении/запрете АПВ и почему перенапряжения к таким факторам никак не относятся. В ходе рассуждений ряд вопросов будем изучать для некоторой обобщенной ЛЭП, не уточняя наличие на ней кабельных и воздушных участков, а ряд – для частного случая, когда ЛЭП является именно кабельно-воздушной линией.

Помимо коммутационных перенапряжений, на КВЛ могут возникать грозовые перенапряжения и другие явления, например «переходный резонанс», о причинах которого говорилось в [2]. Однако здесь, рассуждая об АПВ, затронем только коммутационные перенапряжения, поскольку именно они, по мнению автора [5], мешают применять АПВ на КВЛ.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ЛЭП

Цикл АПВ появился как эффективный способ оперативного восстановления нормальной работы ЛЭП после возникновения на ней короткого замыкания (КЗ). В основе идеологии АПВ лежит предположение, что некоторые повреждения носят временный, проходящий характер и требуют лишь кратковременного вывода линии из работы, необходимого для гашения дуги тока КЗ. Если повреждение проходящее, то АПВ будет успешным, а в противном случае – неуспешным.

На рис. 1 дана последовательность событий в случае АПВ, которая имеет следующие основные моменты времени:

t_1 – возникновение КЗ;

t_2, t_3 – отключение ЛЭП от сети выключателями, расположенными в ее концах;

t_4 – опробование ЛЭП напряжением сети;

t_5 – замыкание ЛЭП в транзит, если КЗ устранилось и опробование было успешным (рис. 1а), или отключение ЛЭП, если КЗ осталось и опробование было неуспешным (рис. 1б).

Интервал между моментами времени t_3 и t_4 составляет обычно до нескольких секунд и называется бестоковой паузой АПВ. Процессы, происходящие на ЛЭП в бестоковую паузу, теоретически способны повлиять на уровень коммутационных перенапряжений, которые возникнут в t_4 при опробовании ЛЭП напряжением сети.

ПРОЦЕССЫ НА ЛЭП В БЕСТОКОВУЮ ПАУЗУ АПВ

Рассмотрим подробнее, что же на самом деле происходит в бестоковую паузу АПВ и как это могло бы повлиять на уровень коммутационных перенапряжений, если бы на ЛЭП отсутствовали ограничители перенапряжений (ОПН). Внимание сосредоточим на тех фазах ЛЭП, на которых нет КЗ. Для таких фаз при отключении ЛЭП от сети:

- первый выключатель в момент t_2 (рис. 1) прерывает рабочий ток ЛЭП, переводя ЛЭП из нагрузочного режима в режим холостого хода;
- второй выключатель в момент t_3 (рис. 1) прерывает уже ток ненагруженной ЛЭП (или ток холостого хода), который носит емкостный характер.

Гашение выключателем дуги всегда происходит вблизи от нулевого значения синусоиды отключаемого тока. Поэтому отключение в момент t_3 емкостного тока приводит к тому, что на фазах ЛЭП остается заряд, отвечающий амплитуде фазного напряжения E (на емкости ток и напряжение сдвинуты на 90°). Таким образом, после момента t_3 в зависимости от знака заряда (+ или –) напряжение отключенных фаз относительно земли может составить $u(t) = +E$ или $u(t) = -E$, где E – амплитуда фазного напряжения сети.

Пример для случая $u(t) = -E$ дан на рис. 2.

Заряд, оставшийся на фазах ЛЭП, постепенно стекает на землю, и связанное с ним напряжение фаз также постепенно снижается вплоть до нуля. Величина этого напряжения, оставшаяся к концу паузы АПВ, в момент времени t_4 включения ЛЭП под напряжение играет роль начального напряжения фаз U_H .

Максимальный уровень U_M коммутационных перенапряжений ЛЭП (без учета активных потерь и ОПН) зависит от U_H и составляет (согласно учебному курсу ТОЭ):

$$U_M = 2 \cdot e(t_4) - U_H.$$

В момент t_4 опробования ЛЭП напряжением сети мгновенное значение $e(t_4)$ ее синусоидальной ЭДС может иметь величину в диапазоне $-E \leq e(t_4) \leq +E$. Наиболее интенсивные переходные процессы и большие коммутационные перенапряжения возникают в случае, когда на момент t_4 :

- ЭДС сети $e(t_4)$ достигает амплитудного значения: $e(t_4) = +E$ или $e(t_4) = -E$;
- начальное напряжение U_H противоположно по знаку ЭДС сети $e(t_4)$.

На рис. 2 для случая $e(t_4) = +E$ даны несколько примеров переходных процессов включения ЛЭП в зависимости от

начального напряжения U_H , которое определяется степенью саморазряда ЛЭП в бестоковую паузу АПВ:

- рис. 2а, где $U_H = -E$ и $U_M = 3E$;
- рис. 2б, где $U_H = -0,5E$ и $U_M = 2,5E$;
- рис. 2в, где $U_H \approx 0$ и $U_M = 2E$.

Указанные цифры получены для однородной ЛЭП (целиком воздушной или целиком кабельной) с одной целью – продемонстрировать теоретическое влияние процессов саморазряда в бестоковую паузу АПВ на уровень коммутационных перенапряжений при опробовании напряжением.

В силу различных параметров кабельного и воздушного участков переходные процессы на КВЛ будут сложнее, чем показанные на рис. 2 для однородной ЛЭП, но это никак не изменит главного вывода: скорость стекания заряда в бестоковую паузу АПВ действительно влияет на уровень перенапряжений при повторном включении (если не учитывать установленные ОПН).

РАЗРЯД ЛЭП ЗА ВРЕМЯ БЕСТОКОВОЙ ПАУЗЫ АПВ

Процесс снижения напряжения ЛЭП в паузу АПВ описывается выражением:

$$u(t) = E \cdot \exp(-t / \tau),$$

где τ – эквивалентная постоянная времени разряда.

Если длительность бестоковой паузы составляет $T_{АПВ}$, то к моменту t_4 подачи напряжения на ЛЭП ее потенциал можно оценить:

$$U_H = E \cdot \exp(-T_{АПВ} / \tau),$$

- при $T_{АПВ} = \tau$ имеем $U_H = 0,37 \cdot E$,
- при $T_{АПВ} = 2\tau$ имеем $U_H = 0,14 \cdot E$,
- при $T_{АПВ} = 3\tau$ имеем $U_H = 0,05 \cdot E$.

Для ЛЭП, полностью состоящей только из ВЛ, скорость разряда зависит от значительного числа обстоятельств, среди которых:

- степень загрязнения и влажность боковой поверхности гирлянд изоляторов ВЛ;
- наличие подключенных трансформаторов напряжения (ТН) и их типа;
- наличие подключенных шунтирующих реакторов (ШР);
- наличие подключенных ОПН.

Обычно с учетом всех перечисленных обстоятельств для ВЛ $\tau < 1$ с, и тогда при типовом времени $T_{АПВ} = 3$ с имеем $U_H < 0,05 \cdot E$, то есть к моменту t_4 окончания паузы АПВ уже, по сути, произошел полный разряд ВЛ, а значит, коммутационные перенапряжения U_M при включении под напряжение будут минимальными.

Для ЛЭП, полностью состоящей только из КЛ, скорость разряда зависит от свойств изоляции кабеля и ее тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\phi$. Изучение процессов разряда можно провести в схеме рис. 3, где емкость КЛ $C_{КЛ}$ отводит свой заряд в землю через активное сопротивление изоляции КЛ $R_{КЛ}$. Постоянная времени разряда может быть найдена как $\tau = R_{КЛ} \cdot C_{КЛ}$.

По определению $\text{tg}\phi$ представляет собой соотношение активной и емкостной проводимостей изоляции:

$$\text{tg}\phi = \left(\frac{1}{R_{КЛ}} \right) / (\omega \cdot C_{КЛ}) = \frac{1}{\omega \cdot R_{КЛ} \cdot C_{КЛ}},$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота сети (рад/с), f – частота сети (Гц).

Следовательно, постоянная времени τ может быть выражена через $\text{tg}\phi$ следующим образом:

$$\tau = R_{КЛ} \cdot C_{КЛ} = \frac{1}{\omega \cdot \text{tg}\phi}.$$

Для изоляции из спшитого полиэтилена, которая применяется для современных кабелей, справедливо $\text{tg}\phi \approx 0,001$, и тогда постоянная будет:

$$\tau = \frac{1}{\omega \cdot \text{tg}\phi} \approx \frac{1}{314 \cdot 0,001} = 3 \text{ с},$$

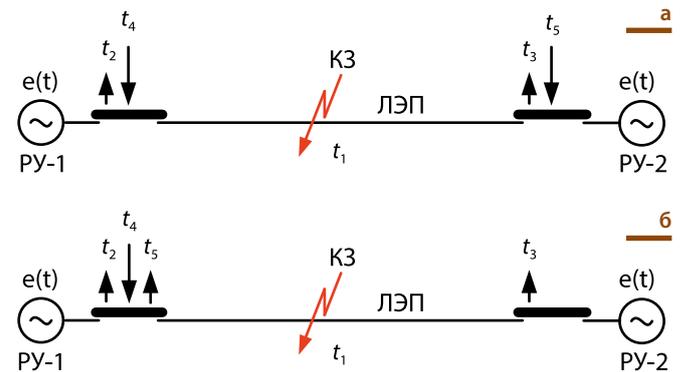
и, следовательно, при типовом времени $T_{АПВ} = 3$ с имеем $U_H \approx 0,37 \cdot E$.

Поскольку интерес представляет не чисто воздушная линия (у которой $U_H \approx 0$) и не чисто кабельная линия (у которой $U_H \approx 0,37 \cdot E$), а кабельно-воздушная, то на практике в конце паузы АПВ следует ожидать $U_H = (0 \div 0,37) \cdot E$. Конкретное же значение напряжения будет зависеть от соотношения длин кабельного и воздушного участков КВЛ.

АПВ на линии электропередачи:

- а) успешное;
- б) неуспешное

Рис. 1 •



Осциллограммы напряжения в конце ЛЭП (ОПН и потери отсутствуют) за время паузы АПВ:

- а) заряд не стекает;
- б) заряд стекает наполовину;
- в) заряд стекает полностью.

Рис. 2 •

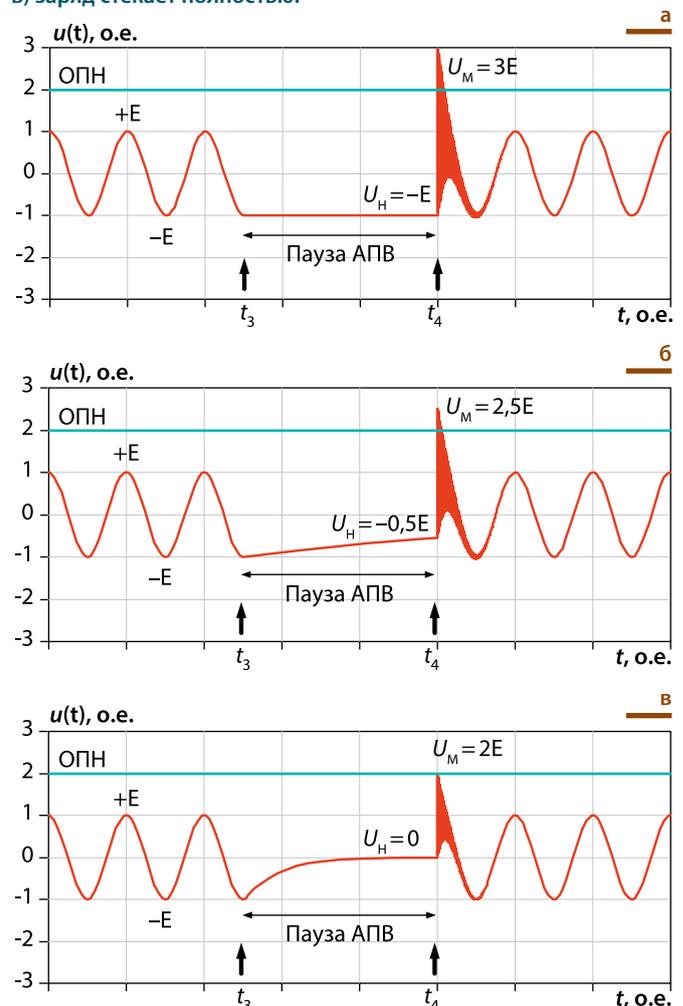
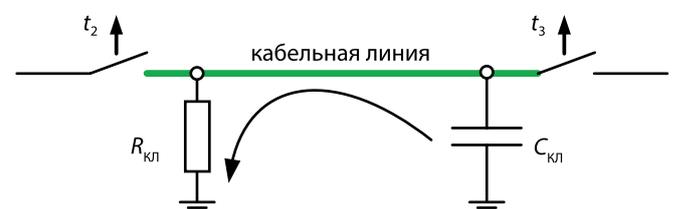
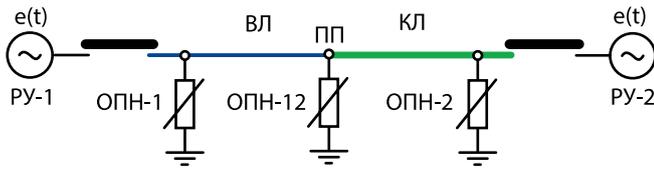


Схема отключения и саморазряда кабельной линии

Рис. 3 •

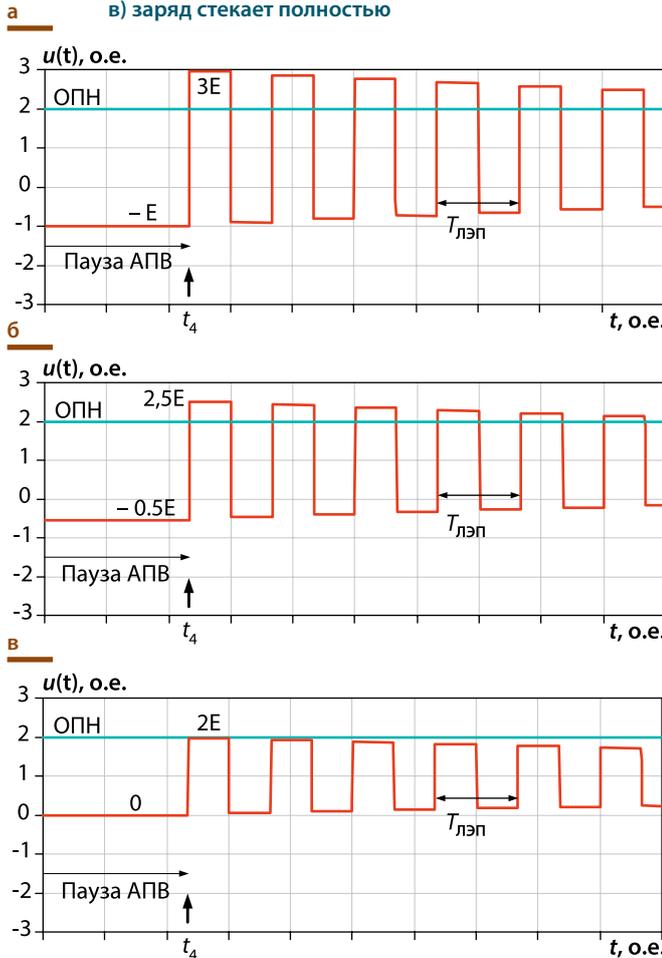


• Рис. 4. Пример расстановки ОПН вдоль КВЛ



• Рис. 5. Переходные процессы рис. 2 на ЛЭП с детализацией вблизи от момента включения t_4 :

- а) заряд не стекает;
- б) заряд стекает наполовину;
- в) заряд стекает полностью



Как видно, утверждение [5], что современная КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена может годами сохранять заряд, является ошибочным даже для целиком кабельной линии, не говоря уже о случае, когда КЛ является элементом КВЛ, где за счет воздушного участка скорость разряда значительно возрастает.

ЗАЩИТА КВЛ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Кабельные участки могут обустраиваться на ВЛ любого класса напряжения от 6 до 500 кВ, однако особый интерес вызывают линии классов 110–500 кВ, где:

- нет таких больших запасов прочности изоляции, как на линиях классов 6–35 кВ;
- дорогое оборудование и ущерб от аварии может составить миллионы рублей.

КВЛ классов 110–500 кВ, как правило, имеют ОПН, которые устанавливаются в местах захода в концевые РУ (ОПН-1 и ОПН-2 на рис. 4). Также, как было показано в [2], обязательно следует устанавливать ОПН на каждом ППП для защиты кабеля от грозовых перенапряжений (ОПН-12).

Наличие вдоль КВЛ сразу нескольких комплектов ОПН приводит к тому, что для изоляции оборудования степень опас-

ности коммутационных перенапряжений определяется уже не спецификой переходных процессов на КВЛ, а исключительно защитными характеристиками установленных ОПН.

Современные ОПН класса 110–500 кВ способны ограничить коммутационные перенапряжения до уровня не более 2E.

Для удобства на рис. 2 показана горизонтальная прямая 2E, демонстрирующая уровень коммутационных перенапряжений, который был бы в случае учета ОПН, установленных на линии. Перенапряжения величины 2E не представляют опасности для изоляции исправного оборудования (в том числе для изоляции КЛ), поскольку опасными считаются лишь коммутационные перенапряжения:

- не менее (3,0 ÷ 3,5)E для сетей 110–220 кВ;
- не менее (2,5 ÷ 2,7)E для сетей 330–500 кВ.

Следовательно, для КВЛ не представляется возможным обосновывать запрет на АПВ необходимостью беречь кабель от коммутационных перенапряжений. Во-первых, перенапряжения не опасны из-за наличия ОПН, а во-вторых, даже без ОПН, они были бы не опасны по причине быстрого разряда КВЛ за время паузы АПВ.

«СКОРОСТЬ ВВОДА ЭНЕРГИИ» В ДИЭЛЕКТРИК КЛ

Помимо величины перенапряжений, процессы при АПВ в [5] характеризуются таким параметром, как «скорость ввода энергии» в диэлектрик. Утверждается, что наличие на КВЛ к концу паузы АПВ остаточного заряда приводит к возрастанию скорости ввода энергии в диэлектрик до значений, опасных для изоляции кабеля. Для анализа обратимся к рис. 5, который представляет собой укрупненную около момента t_4 временную развертку осциллограмм, представленных ранее на рис. 2.

В настоящее время еще недостаточно исследований, которые бы убедительно доказывали, что скорость ввода энергии в диэлектрик является важным параметром, определяющим срок службы кабелей. Тем не менее рассмотрим эту скорость V. Она могла бы быть определена как скорость изменения напряжения на изоляции ЛЭП в момент включения:

$$V = \frac{\Delta U_{\text{ЛЭП}}}{\Delta t} = \frac{U_M - U_H}{T_{\text{ЛЭП}}/4},$$

где $\Delta U_{\text{ЛЭП}}$ – скачок напряжения в момент t_4 включения; $\Delta t = T_{\text{ЛЭП}}/4$ – время роста напряжения (одна четвертая часть периода колебаний напряжения).

С помощью рис. 5 определим далее $\Delta U_{\text{ЛЭП}}$ и Δt , чтобы понять, действительно ли скорость ввода энергии в диэлектрик в цикле АПВ опаснее, чем, например, при обычном включении линии под напряжение сети.

Осциллограммы рис. 2 и 5 получены при моделировании ЛЭП как однородной линии с распределенными параметрами (волновое сопротивление Z и скорость v), и по этой причине переходный процесс включения в момент t_4 представляет собой колебания П-образной формы, постепенно затухающие за счет действия активных потерь. Если бы ЛЭП моделировалась как однородная линия с сосредоточенными параметрами (индуктивность и емкость), то колебания носили бы не П-образную, а синусоидальную форму.

Вне зависимости от способа моделирования ЛЭП из рис. 5 видно, что период колебаний $T_{\text{ЛЭП}}$ и частота $f_{\text{ЛЭП}} = 1/T_{\text{ЛЭП}}$ никак не связаны с остаточным зарядом, а являются одинаковыми для всех рис. 5а, 5б, 5в и диктуются исключительно длиной ЛЭП. Если говорить не об однородной ЛЭП (целиком воздушной или целиком кабельной), а о КВЛ, то для нее переходный процесс будет иметь сразу две частоты, одна из которых определяется длиной участка ВЛ, а другая – длиной участка КЛ. Однако остаточный заряд, как и ранее, на эти частоты влиять не будет.

Рассмотрим теперь скачок напряжения $\Delta U_{\text{ЛЭП}} = U_M - U_H$, который составляет:

- для рис. 5а $\Delta U_{\text{ЛЭП}} = 4E$;
- для рис. 5б $\Delta U_{\text{ЛЭП}} = 3E$;
- для рис. 5в $\Delta U_{\text{ЛЭП}} = 2E$.

Видно, что при АПВ диапазон скачков равен $\Delta U_{\text{ЛЭП}} = (2 \div 4)E$. Следовательно, даже при доказанном выше постоянстве периода $T_{\text{ЛЭП}}$ всё равно можно утверждать, что скорость ввода энергии в диэлектрик $V = \Delta U_{\text{ЛЭП}} / \Delta t$ зависит от начального заряда.

Если учесть действие ОПН, то по рис. 5 диапазон возможных скачков будет меньше и укладывается в рамки $\Delta U_{\text{ЛЭП}} = (2 \div 3)E$.

Если в качестве ЛЭП рассматривать КВЛ, где кабели имеют изоляцию из сшитого полиэтилена, то диапазон будет еще меньше и составит $\Delta U_{\text{лэп}} = (2 \div 2,37)E$, поскольку было показано, что $U_H = (0 \div 0,37)E$.

При обычном плановом включении КВЛ (не при АПВ) начальное напряжение (заряд) отсутствует: $U_H = 0$, а возникающие перенапряжения (по аналогии с рис. 5в) составляют не более $U_M = 2E$. Таким образом, скачок напряжения будет $\Delta U_{\text{лэп}} = 2E$, т. е. мало чем отличается от случая АПВ, где $\Delta U_{\text{лэп}} = (2 \div 2,37)E$. Поэтому было бы неверно утверждать, что при АПВ, в сравнении с другими коммутациями КВЛ, возникают какие-то особенно опасные для изоляции скорости ввода энергии в диэлектрик.

Рассмотрим вопросы, которые согласно мировой практике [6] обычно следует принимать во внимание при определении возможности применения АПВ на КВЛ. Среди них отсутствуют коммутационные перенапряжения и скорость ввода энергии в диэлектрик.

ОРГАНИЗАЦИЯ АПВ НА КВЛ

Использование АПВ оправдано тогда, когда КЗ являются проходящими, т.е. способными к самоустраниению за время бестоковой паузы АПВ. По этой причине АПВ традиционно применяется на ВЛ, но не применяется на КЛ. Отсутствие АПВ на КЛ связано не только с тем, что невозможно самостоятельное восстановление поврежденной изоляции. Еще одной причиной отсутствия АПВ на КЛ является то, что повторное включение под напряжение КЛ с имеющимся на ней повреждением изоляции, скорее всего, приведет к увеличению объема ремонтных работ.

Для КВЛ, в составе которой есть участки ВЛ и КЛ, наиболее верным было бы разрешать АПВ в случае повреждения на участке ВЛ и запрещать АПВ в случае повреждения на участке КЛ. Такое АПВ называется селективным. Например, на рис. 6а в случаях КЗ-1 или КЗ-2 следует разрешить АПВ в надежде, что за время бестоковой паузы повреждение устранится. Если же имеет место КЗ-3, то АПВ следует запретить как бесполезное (повреждение не устранится) и даже как опасное (увеличится объем повреждений КЛ).

Сложности с определением поврежденного участка КВЛ привели к тому, что в мире селективное АПВ применяется далеко не всегда. В общем случае для КВЛ есть три варианта АПВ:

- селективное АПВ (повторное включение КВЛ под напряжение производится только тогда, когда КЗ приходится на участок ВЛ);
- безусловное разрешение АПВ (повторное включение КВЛ под напряжение производится вне зависимости от того, относится КЗ к участку ВЛ или КЛ);
- безусловный отказ от АПВ (повторное включение КВЛ запрещено).

Рассмотрим их подробнее, опираясь, в частности, на опыт [6].

СЕЛЕКТИВНОЕ АПВ НА КВЛ

Существует два главных способа обеспечения селективного АПВ:

- дистанционный (оценивается расстояние от РУ до места КЗ);
- дифференциальный (определяется участок, на котором произошло КЗ).

Дистанционный принцип

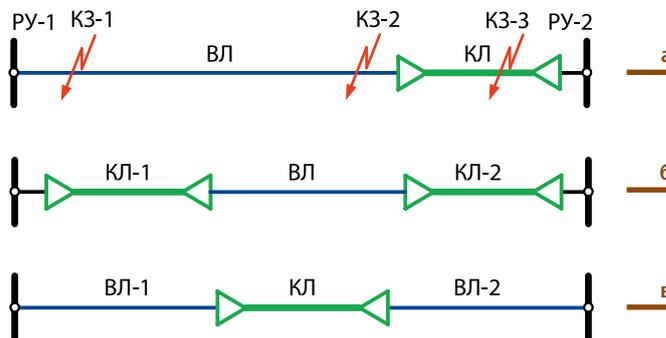
Дистанционный принцип основан на вычислении расстояния от конечных РУ до места КЗ и на принятии на основе данной информации решения, приходится ли это КЗ на участок ВЛ или же на участок КЛ. Такой алгоритм может быть реализован исключительно в простых схемах вида рис. 6 путем оценки сопротивления от РУ до места КЗ и его сравнения с сопротивлением примыкающего к РУ участка ВЛ или же участка КЛ.

К сожалению, оценка сопротивления от РУ до места КЗ, сделанная на основе измеренных в РУ параметров тока КЗ, зависит от вида КЗ, характера повреждения. Поэтому в случае КЗ вблизи от переходного пункта не представляется возможным с высокой точностью гарантировать, относится ли повреждение именно к участку ВЛ или же к КЛ. Чтобы избежать ошибочного включения КВЛ на повреждение на участке КЛ, необходимо проводить отстройку, примеры которой даны на рис. 7.

Примеры наиболее распространенных КВЛ:

- ВЛ-КЛ (кабельный заход),
- КЛ-ВЛ-КЛ (кабельные заходы),
- ВЛ-КЛ-ВЛ (кабельная вставка)

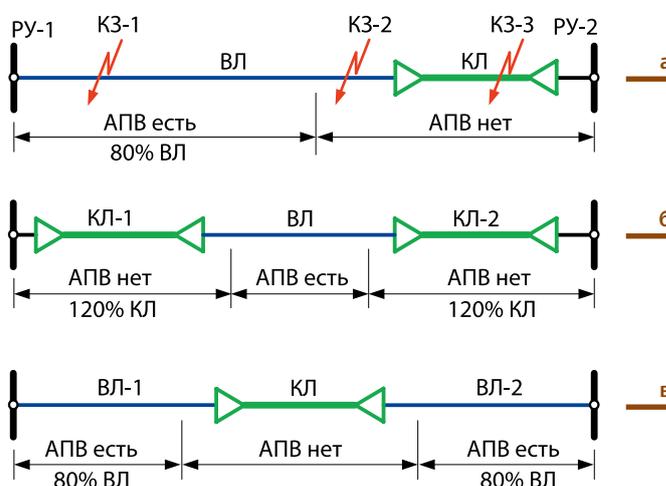
Рис. 6 •



Обеспечение селективного АПВ без установки дополнительного оборудования на ПП:

- ВЛ-КЛ, б) КЛ-ВЛ-КЛ, в) ВЛ-КЛ-ВЛ

Рис. 7 •



Так, на рис. 7а АПВ разрешено лишь при тех КЗ, для которых сопротивление от РУ-1 до места КЗ составляет не более чем 80% сопротивления ВЛ (это КЗ-1). Остальные 20% трассы ВЛ (это КЗ-2), примыкающие к участку КЛ, на всякий случай исключены из АПВ во избежание ошибки.

На рис. 7б АПВ разрешено при совместном выполнении двух условий:

- сопротивление от места КЗ до РУ-1 более 120% сопротивления КЛ-1;
- сопротивление от места КЗ до РУ-2 более 120% сопротивления КЛ-2.

На рис. 7в АПВ разрешено при выполнении какого-то одного из двух условий:

- сопротивление от места КЗ до РУ-1 менее 80% сопротивления ВЛ-1;
- сопротивление от места КЗ до РУ-2 менее 80% сопротивления ВЛ-2.

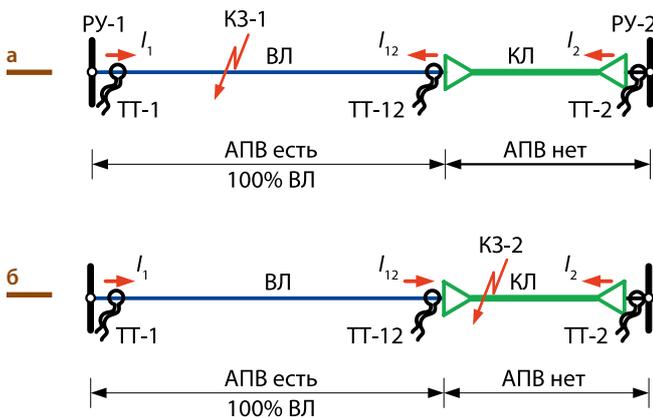
Главными недостатками дистанционного принципа обеспечения селективного АПВ являются его применимость лишь для простейших КВЛ, имеющих не более 1–2 кабельных участков. Также недостатком можно назвать и то, что часть трассы ВЛ вынужденно выводится из под АПВ во избежание ошибок.

Дифференциальный принцип

Дифференциальный принцип основан на сравнении токов по концам КЛ и ВЛ. Для его реализации все ПП трассы должны быть оснащены трансформаторами тока (ТТ), объединенными в единую выверенную систему. Поврежденным считается тот участок, для которого измеренные по концам токи направлены встречно друг другу.

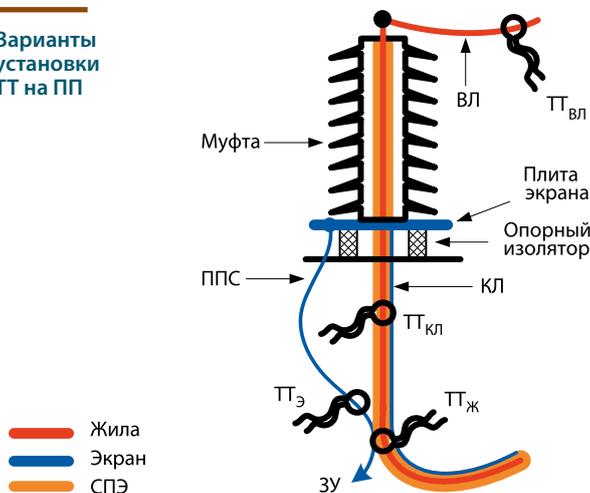
В качестве примера на рис. 8 показана простая КВЛ и три ТТ, установленные на входе в РУ-1 (ТТ-1), на входе в РУ-2 (ТТ-2), непосредственно на ПП (ТТ-12). Так, в случае повреждения

• Рис. 8. Обеспечение селективного АПВ за счет установки ТТ на ПП: а) КЗ на ВЛ, б) КЗ на КЛ



• Рис. 9.

Варианты установки ТТ на ПП



КЗ-1 (рис. 8а) измеренные токи I_1 и I_{12} направлены встречно, и авария будет классифицирована как относящаяся к участку ВЛ, что позволит дать разрешение на АПВ. В случае повреждения КЗ-2 (рис. 8б) направленными встречно будут I_{12} и I_2 , и тогда повреждение будет классифицировано как авария на КЛ, что обусловит запрет на АПВ.

В качестве ТТ могут использоваться электромагнитные ТТ или оптические. Если говорить об электромагнитных ТТ, то они могут быть или «классическими» колонковыми ТТ, вроде тех, что применяются в открытых РУ (подключаются к фазному проводу ВЛ), или же разъемными (надеваются на кабель).

Преимуществом дифференциального принципа АПВ можно назвать высокую точность и применимость для КВЛ с любым числом участков КЛ. Недостатки есть, и связаны они прежде всего с необходимостью организации связи между всеми ПП для объединения всех ТТ в единую систему. Обычно такая связь налаживается за счет оптического волокна, встроенного в грозозащитный трос ВЛ, и оптического волокна, встроенного в экраны КЛ или же уложенного в траншею вдоль КЛ. Также на ПП может потребоваться организация питания собственных нужд и обогрева.

Основные способы установки ТТ на ПП показаны на рис. 9:

- на фазный провод ВЛ вблизи от муфты КЛ (ТТ_{вл});
- на кабель непосредственно под муфтой КЛ (ТТ_{кл});
- на кабель и одновременно на его экран, чтобы выделить ток в жиле (ТТ_ж);
- только на экран кабеля ТТ_э (подробнее см. [3]).

Описанное многообразие способов подключения ТТ связано не только с тем, что на рынке представлены ТТ различного типа и конструкций, но и с желанием принимать верное решение по пуску/запрету АПВ в тех ситуациях, когда КЗ случилось непосредственно в концевой муфте на ПП.

Наилучшим вариантом, гарантирующим, что КЗ в муфте будет распознано как авария на кабельном участке с последующим запретом АПВ, является установка ТТ_{вл}. Однако данный вариант является наиболее дорогостоящим.

Варианты с установкой разъемных ТТ (оптических или электромагнитных) на кабель или на экран заметно проще и дешевле, но для них существует вероятность, что КЗ в муфте будет классифицировано как повреждение на ВЛ с последующим АПВ и серьезными разрушениями оборудования ПП (вследствие разлета частей муфты).

БЕЗУСЛОВНОЕ АПВ НА КВЛ

Необходимость установки ТТ на ПП, наладки связи и питания делает вариант селективного АПВ не самым привлекательным. Поэтому зачастую на некоторых КВЛ приходится принимать решение раз и навсегда: или полностью разрешать АПВ вне зависимости от места КЗ, или полностью его запрещать.

Разрешение АПВ считается оправданным, когда:

- участок ВЛ заметно длиннее участка КЛ, то есть подавляющее число повреждений заведомо приходится на воздушную линию;
- длина участка КЛ составляет не более 300–500 м и отвечает строительной длине кабеля (службы не хотят ремонтировать такие короткие участки кабельной линии и ставить на них соединительные муфты, им проще перетянуть кабель заново);
- КЛ проходит по частной территории или в пределах видимости персонала (по территории РУ или на заходах в РУ), что исключает риск повреждения кабеля третьими лицами при выполнении несогласованных работ;
- КЛ имеет экраны, рассчитанные не только на одно прохождение тока КЗ, но и на повторное, причем с малым интервалом времени после первого;
- кабельная линия имеет фазы, проложенные в ряд, т.е. авария одной фазы едва ли перекинется на другие.

Запрет АПВ считается оправданным, когда в силу договорных КЛ и проблем с организацией ремонтных работ (например, подводный кабель) опасаются развития аварии при повторном включении КВЛ на КЗ. Кроме того, известны случаи, когда АПВ выводили из работы лишь временно, на период работы персонала на многоцепных КЛ, проложенных в кабельных тоннелях и других сооружениях. Коммутационные перенапряжения и связанные с ними процессы нигде в мире причиной запрета АПВ не являются [6]!

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление на ВЛ одного или сразу нескольких кабельных участков приводит к необходимости решения вопросов АПВ. В статье перечислены разнообразные факторы, влияющие на организацию АПВ кабельно-воздушных линий, и показано, что к этим факторам нельзя отнести ни время саморазряда, ни коммутационные перенапряжения, ни скорость ввода энергии в диэлектрик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление переходных опор КВЛ 35–500 кВ // Новости ЭлектроТехники. 2017. № 1(103). С. 48–51.
2. Дмитриев М.В. Переходный резонанс в сетях с кабелями 6–500 кВ // Электроэнергия: передача и распределение. 2017. № 1(40). С. 78–83.
3. Дмитриев М.В. АПВ на воздушно-кабельных линиях класса 110–500 кВ // Электроэнергия: передача и распределение. 2015. № 1. С. 68–73.
4. Догадкин Д., Марин Р., Линт М. и др. Устройство АПВ кабельно-воздушных линий электропередачи мегаполисов // Электроэнергия: передача и распределение. 2016. № 5. С. 114–119.
5. Епифанов А.М. Особенности эксплуатации кабельно-воздушных линий с СПЭ изоляцией 110 кВ и выше: Презентация к докладу на 6-м Всероссийском совещании главных инженеров-энергетиков. Сочи, 21 апр. 2016. [https://minenergo.gov.ru/node/5932]
6. CIGRE Working Group B5.23. Short circuit protection of circuits with mixed conductor technologies in transmission networks: CIGRE technical brochure № 587. 2014. 241 p.