

Переходный резонанс в схемах с кабелями 6–500 кВ

УДК 621.315.21

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

В статье анализируется влияние нового поколения кабельных линий на переходные процессы в электрических сетях, показывается, что современные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют малые волновые сопротивления. Это обстоятельство в схемах, содержащих воздушные линии или силовые трансформаторы, способно приводить к возникновению интенсивных переходных процессов, сопровождаемых перенапряжениями, опасными для изоляции оборудования.

С годами в сетях классов 6–500 кВ появляется все больше кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). В частности, их применяют для ремонта аварийных участков старых кабелей с бумажно-масляной изоляцией и для перевода в кабель отдельных участков воздушных линий, также и для питания трансформаторов.

Волновые параметры новых кабелей отличаются от параметров старых, и еще сильнее они отличаются от параметров воздушных линий и силовых трансформаторов. В результате этого в сетях становится все больше объектов, для которых следует ожидать возникновения сложных многочастотных переходных процессов, сопровождаемых опасными перенапряжениями.

Данная статья не является законченным исследованием, базирующимся на результатах подробного компьютерного моделирования. Здесь высказываются всего лишь гипотезы, однако они могли бы быть положены в основу целой научной работы, в ходе которой, возможно, удалось бы достоверно объяснить ряд уже случившихся повреждений изоляции и предотвратить новые.

ВВЕДЕНИЕ

В [1] отмечалось, что погонная емкость современных кабелей до нескольких раз может превышать таковую для старых кабелей с бумажно-масляной изоляцией, также новые линии нередко строятся большой длины и/или содержат по несколько кабелей на каждую фазу. Как следствие, емкость КЛ оказывается значительной.

Один из примеров негативных последствий большой емкости дан в статье [2], где рассматривался случай, когда в момент подключения к сборным шинам (СШ) кабельной линии происходили повреждения витковой изоляции обмоток питающего трансформатора, соединенных в треугольник (рисунок 1). Схема была такова, что КЛ имела емкость, в разы большую суммарной емкости других линий и оборудования, и из-за этого коммутация включения КЛ по сути вызывала трехфазное короткое замыкание на выводах трансформатора с соответствующим скачкообразным срезом напряжения почти до нулевых значений и его восстановлением в ходе интенсивного переходного процесса, сопровождавшегося перенапряжениями.

Ключевые слова:

кабельная линия, кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена, волновое сопротивление кабеля, переходные процессы, грозовые перенапряжения, коммутационные перенапряжения

Keywords:

power cable, XLPE cable, cable surge impedance, transient processes, lightning overvoltage, switching overvoltage

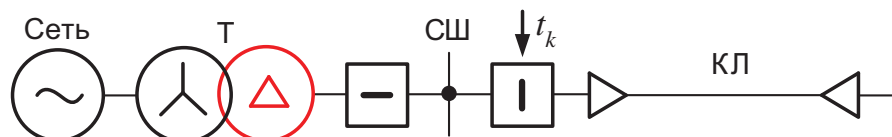


Рис. 1. Пример схемы, где трансформатор питает отходящую КЛ

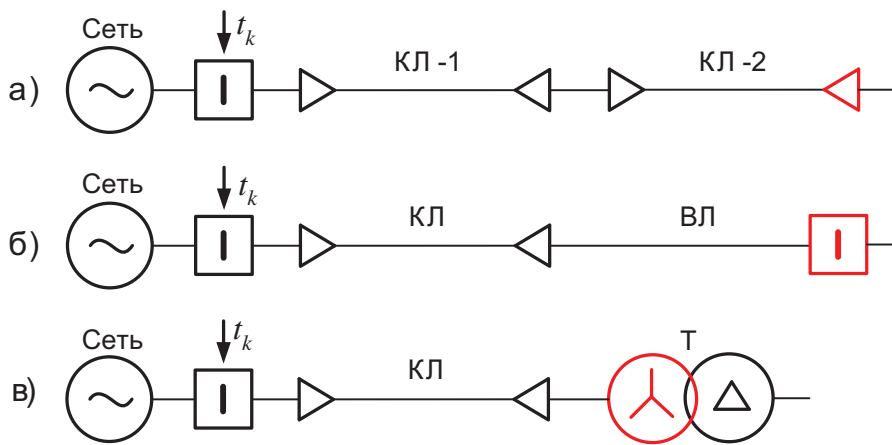


Рис. 2. Примеры схем с кабельными линиями и кабельными вставками

Другое негативное проявление большой погонной емкости заключается в том, что у современных кабелей очень маленькое волновое сопротивление, уровня 10–30 Ом, а прокладка нескольких кабелей на фазу еще сильнее его снижает. Неприятные последствия малого Z , как ожидается, могут возникать в схемах, где напряжение через такую КЛ подается на элементы сети с более высоким Z , например:

- на старую кабельную линию (рисунок 2а),
- на воздушную линию (рисунок 2б),
- на трансформатор (рисунок 2в).

Рассмотрим указанные случаи подробнее и сформулируем причины опасений.

ВОЛНОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАБЕЛЯ

Как правило, говоря о параметрах линии, имеют в виду ее погонную емкость и индуктивность. Однако существует целая серия задач, когда линию представляют не сосредоточенными параметрами, а иначе — при помощи волнового сопротивления Z и скорости распространения волны v . Одна из подобных задач — это исследование переходных процессов при вклю-

чении под напряжение линии длиной l (рисунок 3).

На рисунке 4 дана осциллограмма напряжения в конце линии при ее включении вблизи от максимума синусоиды фазного напряжения сети. В момент включения в линию уходит волна напряжения, величина которой равна амплитуде напряжения сети, а фронт имеет прямоугольную форму. Далее эта волна распространяется из начала линии в ее конец и обратно, претерпевает серию отражений и постепенно затухает в силу влияния потерь. В результате напряжение в конце линии получается в виде затухающих колебаний П-образной формы.

Скорость волны при ее распространении вдоль линии может быть оценена как

$$v = v_0 / \sqrt{\epsilon},$$

где v_0 — скорость электромагнитной волны в вакууме (300 м/мкс или $3 \cdot 10^8$ м/с), ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции линии (для воздуха это 1,0 о.е., для полиэтилена — 2,4 о.е.). Таким образом, для воздушной линии скорость составляет 300 м/мкс, а для кабельной в полтора раза меньше — около 200 м/мкс.

Период колебаний напряжения в конце линии T может быть рассчитан как 4 времени пробега τ волны из ее начала в конец

$$T = 4 \cdot \tau = 4 \cdot (l/v).$$

Связь волн напряжения и тока, которые уходят в линию в момент подачи на нее напряжения, определяется волновым сопротивлением линии Z . Его величина для современных КЛ представлена на рисунке 5 (по материалам каталога АВВ). Также волновое сопротивление зачастую известно как

$$Z = \sqrt{L^*/C^*},$$

где L^* и C^* — погонные индуктивность и емкость линии.

Из рисунка 5 видно, что волновое сопротивление современных кабельных линий может варьироваться в широком диапазоне значений от 5 до 40 Ом. Если говорить о наиболее распространенных сечениях жилы, то:

- на 6–35 кВ имеем $Z \approx 10 \div 15$ Ом
- на 110 кВ имеем $Z \approx 15 \div 20$ Ом;

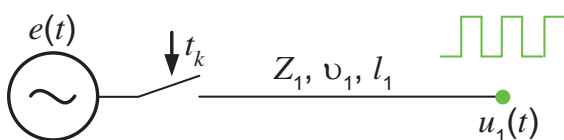


Рис. 3. Включение под напряжение линии длиной l

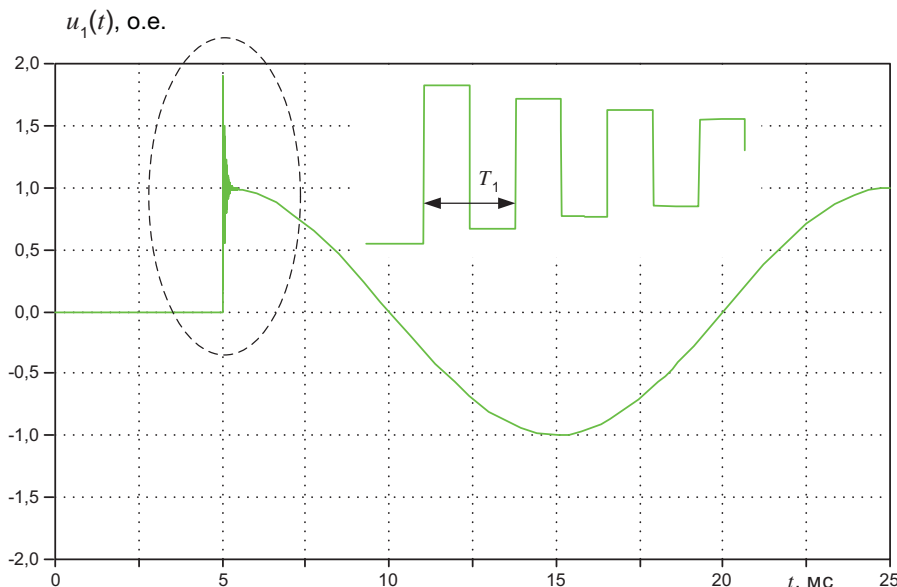


Рис. 4. Напряжение на конце линии при ее включении (схема рисунка 3)

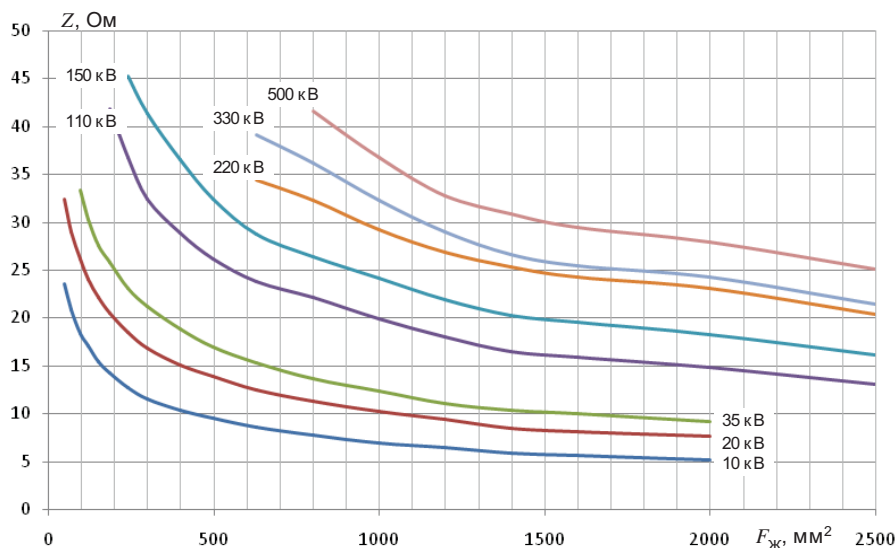


Рис. 5. Волновые сопротивления КЛ 6–500 кВ с двусторонним заземлением экранов экранов в зависимости от сечения жилы $F_{ж}$

- на 220–500 кВ имеем $Z \approx 20 \div 30$ Ом.

Указанные сопротивления характерны для двустороннего заземления экранов. При одностороннем заземлении экранов или их транспозиции поведение кабелей иное, нежели это показано на рисунке 4. Например, при одностороннем заземлении процессы зависят от того, включается ли линия под напряжение с той стороны, где экран заземлен, или с той стороны, где экран разземлен. Если говорить о кабелях с транспозицией экранов, то здесь процессы еще сложнее, поскольку помимо концов линии отражения волн происходят и в промежуточных точках трассы, а их характер зависит от того, какие волны распространяются не только по рассматриваемой фазе линии, но и по двум соседним. Однако не будем детализировать, а сосредоточимся на главном — на явлении переходного резонанса.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСА

При включении незаряженной линии напряжение в ее конце не превысит двух амплитуд фазного напряжения сети (рисунок 4). Импульсные перенапряжения кратности 1,5–2,0 о.е. не представляют опасности для изоляции исправного оборудования. Однако уровень перенапряжений может существенно возрасти, если коммутируется цепочка из двух последовательно расположенных линий (рисунок 6а).

При включении под напряжение двух последовательно расположенных линий в месте сопряжения участков, имеющих $Z_1 \neq Z_2$, возникают процессы преломления и отражения волн. Наиболее интенсивные процессы характерны при существенном отличии волновых сопротивлений ($Z_1 \ll Z_2$ или $Z_1 \gg Z_2$). Однако интересен только лишь случай $Z_1 \ll Z_2$, когда волна, преломляясь при переходе

из 1-й линии во 2-ю, возрастает по величине, становясь опаснее для изоляции оборудования.

Ситуация, когда $Z_1 \ll Z_2$, примечательна еще и тем, что переход волн из 1-й линии во 2-ю почти не сопровождается их отражением назад в 1-ю линию. Если же волна дошла до конца цепочки линий, отразилась и вернулась в переходной пункт уже со стороны 2-й линии, то она отражается назад во 2-ю линию, не вызывая преломлений в 1-ю линию. Таким образом, условие $Z_1 \ll Z_2$ гарантирует, что 1-я линия нагнетает опасное напряжение во 2-й линии, однако при этом 2-я линия никак не способна влиять на процессы в 1-й линии. Следовательно, 1-ю линию допустимо рассматривать как источник напряжения, воздействующего на 2-ю линию (рисунок 6б).

В схеме рисунка 6б напряжение источника имеет периодическую форму сигнала П-образной формы с периодом колебаний T_1 и частотой $f_1 = 1/T_1$. Если говорить о 2-й линии, то здесь колебания напряжения также имеют форму П-образных импульсов с периодом T_2 и частотой $f_2 = 1/T_2$.

Известно, что в случае $f_1 = f_2$, когда совпадают частоты вынуждающей силы источника и собственных колебаний линии, в схемах вида рисунка 6б на конце линии возникает резонансное повышение напряжения. Например, частным случаем здесь можно считать достаточно хорошо изученный емкостный эффект дальних линий электропередачи, когда при увеличении длины односторонне питаемых ВЛ 330–750 кВ в их конце возрастает напряжение, достигая при длине 1500 км опаснейших значений, поскольку собственная частота колебаний ВЛ близка сетевым 50 Гц.

Итак, путем несложных рассуждений удалось показать, что в схемах с двумя последовательно включенными линиями условием для возникновения резонансных перенапряжений является:

- существенное отличие волновых сопротивлений $Z_1 \ll Z_2$;
- совпадение частот $f_1 = f_2$ (периодов $T_1 = T_2$, времени пробега $\tau_1 = \tau_2$).

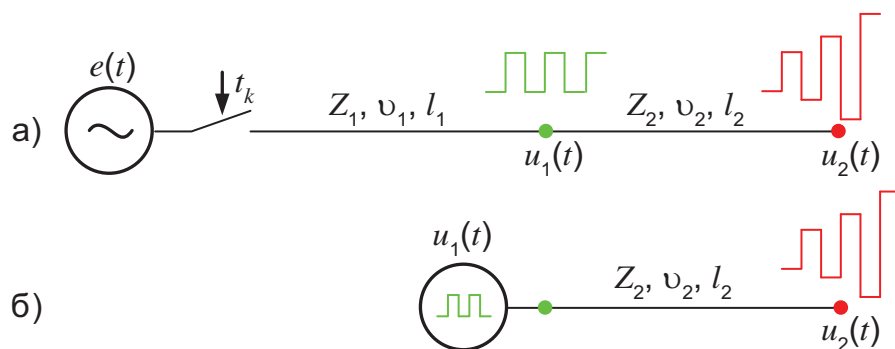


Рис. 6. Включение под напряжение цепочки из двух последовательно расположенных линий (а) и эквивалентная схема (б)

Примеры расчетов напряжения в конце линии представлены на рисунке 7. Видно, что чем сильнее различаются волновые сопротивления линий при условии равенства периодов, тем опаснее могут быть перенапряжения. На данном этапе пока не будем учитывать действие ограничителей перенапряжений ОПН.

Двухчастотные контуры рассматривались и ранее, например, в одной из глав научной работы [3], однако там речь шла об элементах сети с сосредоточенными индуктивностью и емкостью, а вовсе не о линиях с распределенными параметрами, характеризующимися тем или иным временем пробега волны. Также в [3] не было дано какого-то простого объяснения сущности наблюдаемого явления.

Схема рисунка 6 и резонансное повышение напряжения в конце линии позволяют предположить, по какой причине и при каких условиях в сетях с современными кабелями может повреждаться оборудование. Если волновое сопротивление кабеля с изоляцией из СПЭ составляет всего не более 30 Ом, то у воздушной линии — уже на порядок выше, у трансформатора — на 2–3 порядка выше. Именно в схемах вида рисунка 2б и рисунка 2в, когда через кабель с малым волновым сопротивлением питание подается на элемент сети с большим волновым сопротивлением, могут выполняться обозначенные выше условия резонанса.

Особую опасность представляют случаи $T_1 \approx T_2$ ($\tau_1 = \tau_2$), характерные для схем, где длина кабельного участка оказывается одного порядка с длиной воздушного, или же с длиной обмотки трансформатора.

КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ

Для кабельно-воздушных линий в настоящее время имеется целый комплекс проблемных вопросов, среди которых:

- требования к составу оборудования переходных пунктов (ПП);
- требования к сопротивлению заземления ПП;

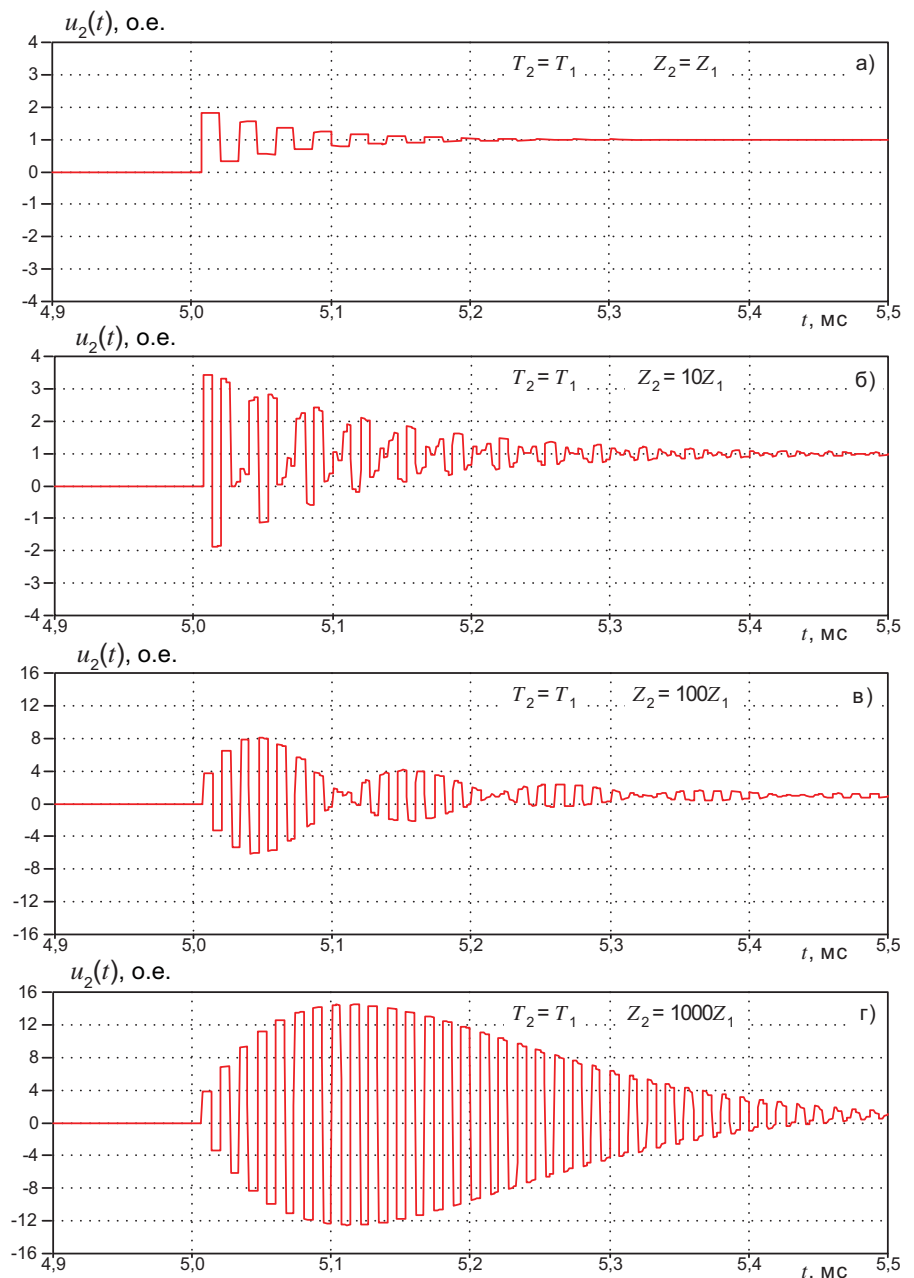


Рис. 7. Напряжение на конце цепочки из двух линий при ее включении (схема рисунка 6) в зависимости от соотношения волновых сопротивлений Z_1 и Z_2

- организация автоматического повторного включения (АПВ);
- организация защиты от грозовых перенапряжений.

Оптимальный состав оборудования ПП, то есть необходимость установки на ПП разъединителей и измерительных трансформаторов, является проблемой, которая не нашла пока еще единого решения. Также и требования к заземлению ПП.

Предложения по АПВ были высказаны в [4] и заключались в оснащении мест заземления экранов кабелей специальными измерительными трансформаторами тока, позволяющими в случае повреждения на кабельном

участке сформировать команду на запрет АПВ.

Соображения по защите от перенапряжений были высказаны в статье [5], где полагалось, что основную опасность представляют не коммутационные, а грозовые процессы. В частности, в [5] отмечена ошибочность положений ПУЭ, разрешающих не ставить ограничители перенапряжений (ОПН) по концам кабельных вставок длиной более 1,5 км. Отсутствие указанных ОПН уже привело к значительному ущербу на ряде объектов, и поэтому, безусловно, на всех переходных пунктах вне зависимости от длины кабельной линии следует разме-

щать ОПН (#1 на рисунке 8а). Также по [5] ОПН нужны и на входе КЛ в распределительное устройство (#2 на рисунке 8а).

Новые исследования дали основания полагать, что для кабельно-воздушных линий серьезную опасность могут представлять не только грозовые, но даже и коммутационные перенапряжения, а именно — рассмотренное явление переходного резонанса. Для борьбы с этими перенапряжениями, которые при коммутациях могут возникать в конце воздушной линии, на ее входе в распределительное устройство должны быть установлены ОПН (см. #3 на рисунке 8а). Такие ОПН весьма полезны и для защиты изоляции распределительного устройства от набегающих с линии грозовых волн, но, увы, зачастую ОПН отсутствуют. Если этих ОПН действительно нет, то снизить воздействия на оборудование можно, если подавать напряжение на линию не со стороны ее кабельного участка, а со стороны воздушного (уровни грозовых перенапряжений не изменятся, но переходный резонанс будет исключен).

Только наличие комплектов ОПН на всех ПП, а также на всех входах КЛ и ВЛ в распределительные устройства, полностью защитит кабельно-воздушные линии от перенапряжений как грозовых, так и коммутационных (в том числе от переходного резонанса).

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Считается, что волновым сопротивлением можно характеризовать лишь те линии, которые расположены вдоль поверхности земли (или заземленного экрана), поскольку в таком случае погонные параметры, такие как индуктивность и емкость, неизменны вдоль трассы линии. Однако, например, в мировой литературе волновое сопротивление вводят и для опор ВЛ, хотя они перпендикулярны земле, и емкость на землю существенно различается для верхних и нижних элементов опоры. Также, волновое сопротивление вводится и для канала молнии на участке между облаком и зем-

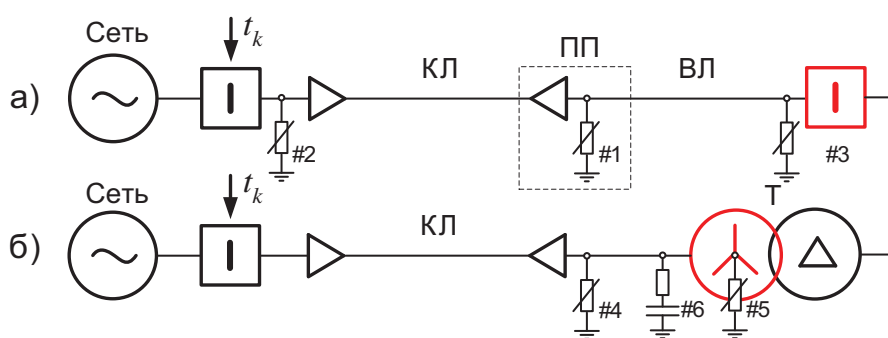


Рис. 8. Схемы защиты кабельно-воздушных линий (а) и трансформаторов (б)

лей, и даже для обмоток силового трансформатора. Использование волновой модели обмоток трансформатора отчасти спорно, однако позволяет сделать новые предположения о возможных причинах повреждения изоляции, что может оказаться полезно, поскольку согласно [6] многие аварии до сих пор не нашли объяснения.

Если рассматривать обмотку трансформатора как линию с определенными параметрами, то ее волновое сопротивление можно оценить в тысячи Ом, скорость распространения волны — на уровне 150–200 м/мкс (и для обмоток в масле, и для сухих трансформаторов). Длина обмоток трансформаторов может достигать сразу нескольких километров, как и длина кабельных линий.

Волновые сопротивления кабеля и обмотки трансформатора гораздо лучше отвечают условию резонанса $Z_1 \ll Z_2$, нежели это было для кабеля и воздушной линии. Также и второе условие резонанса $T_1 = T_2$ чаще всего выполняется именно для кабелей и обмоток трансформаторов, поскольку скорости волн и длины у них могут быть сопоставимы (тогда как длина воздушной линии, как правило, в разы больше длины кабельных участков). Таким образом, самых опасных последствий от явления переходного резонанса следует ждать для схем с кабелями и трансформаторами, а вовсе не для кабельно-воздушных линий.

При включении силового трансформатора под напряжение через кабельную линию (схема рисунка 2в) процессы в нем будут зависеть от схемы соединения обмоток (звезда, треугольник), а также от состояния нейтрали трансформатора:

- при соединении обмоток в звезду с незаземленным выводом нейтрали наиболее опасные перенапряжения возникают вблизи от нейтрали обмотки, достигая максимальных значений при условии $T_1 = T_2$ (при $v_1 \approx v_2$ кабель и обмотка равной длины);
- при соединении обмоток в звезду с заземленным выводом нейтрали или при соединении в треугольник наиболее опасные перенапряжения возникают в средней части обмотки, достигая максимальных значений при условии $T_1 = T_2/2$ (при $v_1 \approx v_2$ кабель в 2 раза короче обмотки).

Например, если обмотка трансформатора имеет длину 2000 м и соединена в звезду с незаземленной нейтралью, то опасным будет ее включение под напряжение через кабель длиной около 2000 м, а если нейтраль заземлена, то опасной было бы включение через кабель длиной около 1000 м. Автору известно сразу несколько случаев пробоя изоляции соединенных в звезду обмоток в момент их включения на сетевое напряжение через кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Среди них:

- обмотки 6–35 кВ сухих трансформаторов без заземления нейтрали при длинах кабелей 6–35 кВ в диапазоне 1000–2000 м;
- обмотки 500 кВ блочных трансформаторов с заземленной нейтралью на ГЭС и АЭС в России и Китае при длинах кабелей 500 кВ в диапазоне 500–1000 м (ряд аварий был и когда вместо кабеля применялся элегазовый токопровод 500 кВ, также обладающий

малым волновым сопротивлением).

Дополнительно поясним, что принципиальными являются схема соединения обмоток (звезда или треугольник) конкретного трансформатора и состояние вывода его нейтрали (заземлена или не заземлена). При этом способ заземления нейтрали сети (изолированная, разземляемая, заземленная) и класс напряжения обмоток (6–35 кВ, 110 кВ, 220–500 кВ) здесь не имеют особого значения.

Также отметим, что для незаземленной нейтрали трансформатора напряжение в ней отсутствует, когда три фазы выключателя (рисунок 8б) работают синхронно. Если же одна из фаз в силу имеющегося разброса включается чуть раньше двух других (скажем, раньше всего на 0,1 мс), то этого уже достаточно, чтобы в незаземленной нейтрали трансформатора за это время успели развиться опасные перенапряжения и вызвать повреждения изоляции.

Если для защиты кабельно-воздушных линий достаточно было разместить в необходимых местах комплекты ОПН, то с трансформаторами в кабельных сетях так поступить получается не всегда. Например, ОПН на вводах трансформатора (#4 на рисунке 8б) не повлияет на перенапряжения переходного резонанса в середине обмотки или вблизи от нейтрали. Или при разземленной

нейтрали не всегда можно установить в нее ОПН (#5 на рисунке 8б), так как она не каждый раз выводится на корпус трансформатора.


В названных случаях, когда применение ОПН невозможно, следует избегать схем коммутации трансформатора через кабель опасной длины. Также здесь можно предложить устанавливать на выводах трансформатора специальные RC-цепи (#6 на рисунке 8б), сопротивление которых близко волновому сопротивлению кабеля, однако конечно речь может идти только о сетях 6–20 кВ, где габариты таких цепей еще разумны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование переходных процессов в линиях и трансформаторах — весьма сложная задача, которой посвящены многие обстоятельные исследования. Не ставя под сомнение их результаты, в статье предложен доступный для понимания простой механизм, который позволяет предположить, по какой причине в сетях с кабелями нового поколения возможны повреждения различного оборудования.

1. Современные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена классов 6–500 кВ имеют повышенную емкость и сниженное волновое сопротивление.
2. По причине малого волнового сопротивления данные кабели

при коммутациях вместе с воздушными линиями или силовыми трансформаторами могут оказаться склонны к провоцированию такого явления, как переходный резонанс.

3. Опасность переходного резонанса в кабельно-воздушных линиях исключается путем размещения защитных ОПН на вводе ВЛ в распределительное устройство. Что касается ОПН по концам кабельного участка, то их тоже надо устанавливать, но уже по условиям защиты от грозовых перенапряжений (даже если вставка очень короткая или, напротив, длиной более 1,5 км).
4. Опасность переходного резонанса в схемах питания силовых трансформаторов проявляется в случаях, когда длина кабельной линии близка к 0,5–1,0 от длины обмотки трансформатора. Для защиты трансформаторов можно рекомендовать исключать опасные схемы путем рационального выбора центра питания и длины кабеля. При невозможности этого рекомендуется хотя бы что-то из следующего:
 - размещать в нейтрали (если выведена, но не заземлена) защитные ОПН;
 - устанавливать на фазных выводах RC-цепи;
 - осторожнее выбирать схему соединения обмоток трансформатора. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление нейтрали в кабельных сетях 6–35 кВ // «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ: передача и распределение», 2016, № 5(38). С. 76–81.
2. Дмитриев М.В. Повреждения силовых трансформаторов при коммутациях кабелей 6–35 кВ // «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ: передача и распределение», 2016, № 2(35). С. 86–91.
3. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ // Издательство Терция, 2004. 188 с.
4. Дмитриев М.В. АПВ на воздушно-кабельных линиях // «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ: передача и распределение», 2015, № 1(28). С. 68–73.
5. Дмитриев М.В. Применение ОПН для защиты кабелей 6–500 кВ // Кабель-news, 2014, № 4. С. 14–19.
6. Никонец Л.А. и др. Моделирование электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений сети // Известия Томского политехнического университета, 2015, т. 326, № 4.

REFERENCES

1. Dmitriev M.V. Neutral grounding in cable networks of 6–35 kV // ELECTRIC POWER: Transmission and Distribution, 2016, No. 5(38), pp. 76–81.
2. Dmitriev M.V. Damage of power transformers at switching cables 6–35 kV // ELECTRIC POWER: Transmission and Distribution, № 2(35), 2016. P. 86–91.
3. Evdokunin G.A., Titenkov S.S. Internal overvoltages in the networks 6–35 kV // Publisher Tertsiya, 2004. 188 p.
4. Dmitriev M.V. Single phase automatic reclosing on mixed air and cable lines // ELECTRIC POWER: Transmission and Distribution, № 1(28), 2015. P. 68–73.
5. Dmitriev M.V. Application of arresters for protection of cables 6–500 kV // Cable-news, № 4, 2014. P. 14–19.
6. L.A. Nikonec and others. Modeling of electromagnetic processes in transformer windings under the action of network overvoltage // Izvestia of Tomsk Polytechnic University, 2015, vol. 326, № 4.