

Переходные процессы на КЛ 110–500 кВ с реакторами

УДК 621.315.21

После повреждения на воздушных линиях с шунтирующими реакторами нескольких элегазовых выключателей 500 и 750 кВ, произошедших из-за наличия в токе апериодической составляющей, ОАО «ФСК ЕЭС» в 2012 году выпустило распоряжение № 838р, регламентирующее расчеты процессов на линиях с реакторами и основные способы защиты выключателей. Формально данное распоряжение относится не только к воздушным, но и к кабельным линиям, однако с последними возникает ряд вопросов, ставших поводом для данной статьи.

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

ВВЕДЕНИЕ

Методика [1], разработанная ОАО «ФСК ЕЭС», скорее всего, была ориентирована в первую очередь на вопросы коммутации воздушных линий (ВЛ) с шунтирующими реакторами (ШР), а кабельные линии (КЛ) были включены туда «по остаточному принципу». В этом нет ничего странного, ведь все аварии элегазовых выключателей 500 и 750 кВ, произошедшие к 2012 году, случились именно на ВЛ. Что же касается КЛ с ШР, то таких объектов в России было мало.

Постепенно ситуация изменяется: в стране появляются и новые КЛ с ШР, и новые кабельно-воздушные линии (КВЛ) с ШР.

В ходе проектирования и проведения расчетов переходных процессов на КЛ с ШР (рисунок 1) был выявлен ряд положений методики [1], которые требуют обсуждения.

Первое, на что хотелось бы обратить внимание, — в [1] встречается упоминание исключительно о подстанциях (ПС), а про электрические станции нет ни слова. Зачем так сделано — не очень понятно, поскольку методы расчета процессов не зависят от того, подается ли напряжение на линию по стороны ПС или же со стороны станции. Линии 330 кВ (КЛ и КВЛ), которые были построены в Санкт-Петербурге, как раз относятся к схеме выдачи мощности ленинградской атомной станции (ЛАЭС), и если подойти к делу формально, то проектировщик не мог здесь использовать методику [1].

Второй и очень важный момент заключается в том, что [1] предлагает использовать в расчетах активное и индуктивное сопротивление КЛ, а также емкость КЛ, которую необходимо «взять из справочника» (см. п. 3.5 из [1]). Существенная проблема здесь заключается в том, что в настоящее время в нашей стране нет справочника, где были бы корректно представлены параметры КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Кроме того, даже в каталогах самих производителей кабелей не найти необходимой информации, чему была посвящена отдельная статья [2].

Третье. В п. 3.5 из [1] утверждается, что включение КЛ на короткое замыкание (КЗ) является маловероятным (в отличие от КВЛ и ВЛ), и в расчетах его можно не рассматривать — поэтому среди расчетных случаев (таблица 6.3 из [1]) включение КЛ на КЗ отсутствует. Вместе с тем, накопленный опыт эксплуатации новых отечественных КЛ 110–500 кВ свидетельствует, что КЗ на КЛ редкостью не является, в том числе и при включении КЛ под напряжение сети.

Четвертое. Согласно таблице 6.3 из [1] расчетным случаем является включение под напряжение КЛ, имеющей остаточный заряд, хотя, по всей видимости, длительное сохранение заряда на КЛ с СПЭ-изоляцией едва ли возможно. После отключения от сети КЛ время саморазряда емкости КЛ зависит от $\operatorname{tg} \delta$ и для СПЭ составляет не более 10 сек, а если же учесть наличие на КЛ реакторов, то и того меньше. Поскольку на КЛ запрещено автоматическое повторное включение (АПВ), то после отключения КЛ ее новое включение под напряжение навряд ли произойдет через несколько секунд — это означает, что к моменту включения КЛ емкость успеет разрядиться, и остаточного заряда на ней не будет.

Ключевые слова:

реактивная мощность, компенсация мощности, однофазный кабель, емкость кабеля

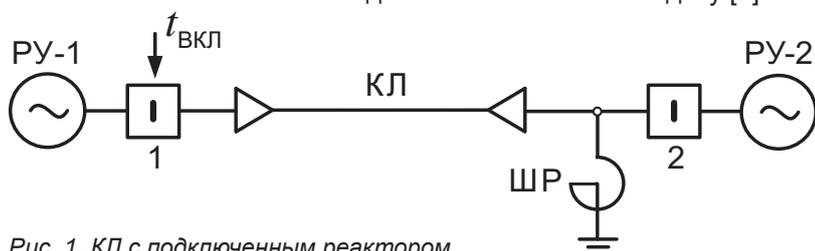


Рис. 1. КЛ с подключенным реактором

Перечисленные аргументы (и некоторые другие) склоняют в пользу того, что в вопросах расчета переходных процессов на КЛ с реакторами еще рано ставить точку, и методику [1], хорошо зарекомендовавшую себя для расчета ВЛ, в части КЛ было бы полезно обсудить и, возможно, несколько скорректировать.

КОЭФФИЦИЕНТ КОМПЕНСАЦИИ K

Для КЛ с ШР коэффициент компенсации зарядной мощности можно найти как отношение мощности реактора $Q_{\text{ШР}}$ к зарядной мощности линии $Q_{\text{ккл}}$:

$$K = Q_{\text{ШР}} / Q_{\text{ккл}}$$

Если мощность $Q_{\text{ШР}}$ известна и указана в паспорте на ШР, то вот мощность $Q_{\text{ккл}}$ необходимо вычислить через ее емкость:

$$C_{\text{ккл}} = C_{\text{ккл}}^* \cdot l_{\text{ккл}}$$

где $C_{\text{ккл}}^*$ — погонная емкость КЛ, $l_{\text{ккл}}$ — длина КЛ.

В статье [3] было показано, что коэффициент K позволяет достаточно быстро (без проведения компьютерного моделирования процессов) оценить, представляет ли опасность для выключателя линии (ВЛ, КЛ, КВЛ) ее включение под напряжение сети, и какие способы защиты выключателя от апериодической составляющей тока лучше применить. На рисунке 2 дана заимствованная из [3] кривая, удобная для проведения таких оценок.

Положим, что линия включается так, что синусоидальное напряжение в одной из фаз сети имеет на момент коммутации минимальное значение. Тогда в этой фазе в токе выключателя линии появится наибольшая апериодическая составляющая тока (этот случай на рисунке 2 соответствует $\Delta\Psi = 5$ мс). Если линия такова, что у нее $K < 0,5$, то апериодическая составляющая безопасна для выключателя (точка 1 на рисунке 2), а если $K > 0,5$, то уже опасна (точка 2 на рисунке 2), и требуется выполнить защиту выключателя одним из способов, указанных, например, в [1]:

- оснащение выключателя линии устройством управляемой коммутации УК (этим достигается $\Delta\Psi \approx 1$ мс, то есть линия включается вблизи от максимума синусоиды напряжения, что обеспечивает минимум апериодической составляющей тока);
- оснащение выключателя линии предвключаемыми резисторами (дают быстрое затухание апериодической составляющей тока);
- отключение от линии ШР перед ее постановкой под напряжение сети (снижение коэффициента компенсации K до безопасных значений $K < 0,5$).

Пусть линия имеет $K = 0,6$ и, следовательно, требуются мероприятия по защите выключателя, среди которых выбрали устройство УК, обеспечивающее включение линии вблизи от максимального значения синусоиды сетевого напряжения с ошибкой $\Delta\Psi = 1$ мс. При такой точности

включения коэффициент $K = 0,6$ попадает в зону под красной кривой, где опасных апериодических токов не возникает (точка 3 на рисунке 2).

Если бы линия имела $K = 0,9$, то согласно рисунку 2 при точности УК, отвечающей $\Delta\Psi = 1$ мс, этот коэффициент оказался бы в зоне над красной кривой (точка 4), где точности УК не достаточно для ограничения токов до безопасных уровней. В таком случае использование УК неэффективно, и приходится выбирать между применением резисторов или отключением ШР.

Если бы линия имела $K = 2$, то согласно рисунку 2 точность УК вновь оказалась бы достаточной для защиты выключателя (точка 5), и тогда не потребовались бы никакие мероприятия вроде резисторов или отключения ШР.

Итак, с помощью рисунка 2 показано, что величина коэффициента компенсации K существенно влияет на выводы об опасности/безопасности переходных процессов на линии, и на выбор защитных мер. Возможные неточности при определении K могут привести к тому, что линия будет неверно отнесена в ту или иную область диаграммы рисунка 2 с соответствующими последствиями. Поэтому, говоря о КЛ, особое внимание следует уделять ее полной емкости $C_{\text{ккл}}$, вычисляемой на основе погонной $C_{\text{ккл}}^*$.

ЕМКОСТЬ КЛ

В расчетах коммутационных переходных процессов КЛ можно представить или как линию с распределенными параметрами, или как линию с сосредоточенными (П-схема замещения вида рисунка 3). Для

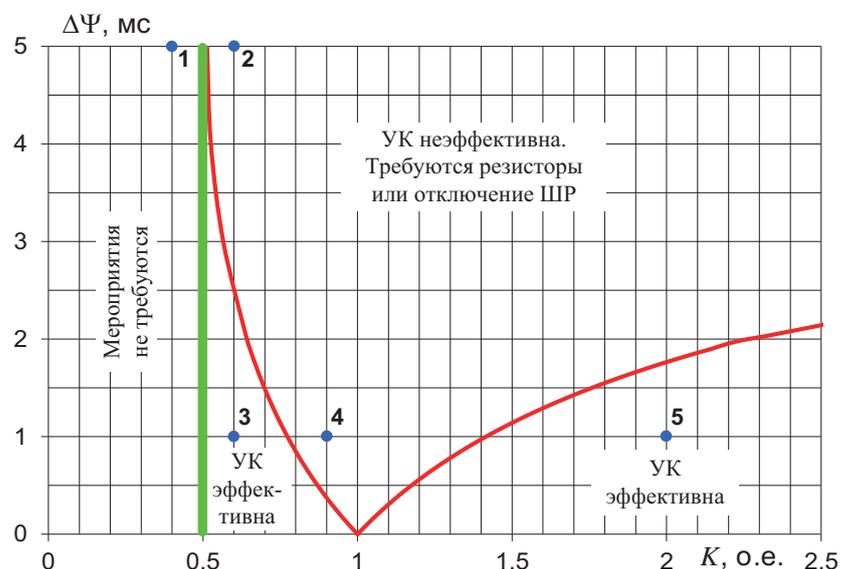


Рис. 2. Зависимость необходимой точности управляемой коммутации (УК) от коэффициента компенсации K

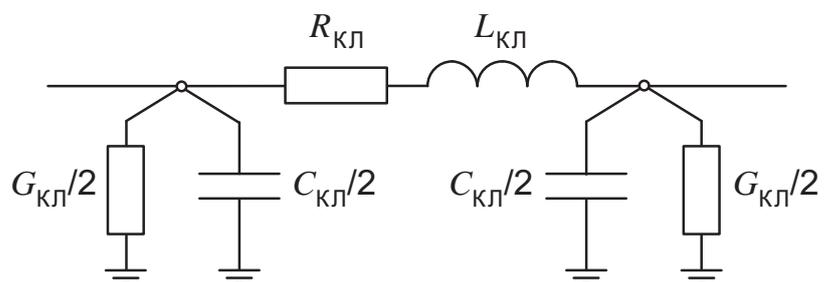


Рис. 3. П-схема замещения КЛ

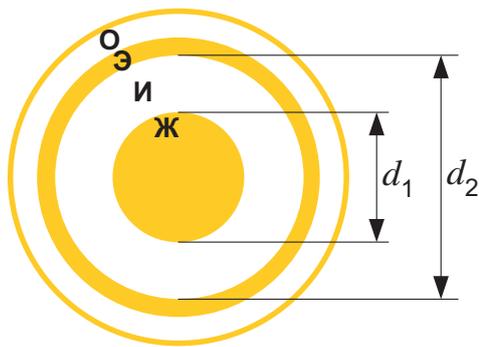


Рис. 4. Конструкция однофазного кабеля

использования П-схемы необходимы следующие параметры КЛ, на вычислении которых остановимся подробнее:

- емкость $C_{\text{кл}}^*$;
- активная проводимость $G_{\text{кл}}^*$;
- продольная индуктивность $L_{\text{кл}}^*$;
- продольное активное сопротивление $R_{\text{кл}}^*$.

В конструкции современного однофазного кабеля 110–500 кВ выделяют четыре наиболее важных элемента (рисунок 4):

- алюминиевая или медная жила (Ж);
- изоляция из сшитого полиэтилена (И);
- медный проволочный экран (Э);
- внешняя оболочка (О).

Погонную емкость однофазного кабеля (Ф/м) обычно вычисляют как:

$$C_{\text{кл}}^* = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln d_2 / d_1},$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость СПЭ-изоляции, о.е.; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; d_1 и d_2 — диаметры по жиле и по изоляции, мм.

Диаметры d_1 и d_2 можно найти в каталоге на кабель. Также там обычно дается и итоговое значение погонной емкости $C_{\text{кл}}^*$, выраженной в мкФ/км (вместо Ф/м). Для примера в таблице 1 для разных сечений жилы $F_{\text{ж}}$ кабеля 220 кВ приведены величины d_1 , d_2 , $C_{\text{кл}}^*$, заимствованные из каталога фирмы ABB. У ряда других заводов (в частности, у NEXANS) принципиальных отличий от ABB не замечено.

Перепроверим заводские значения таблицы 1, для чего в формулу $C_{\text{кл}}^*$ подставим d_1 и d_2 , а также проницаемость $\varepsilon = 2,4$ о.е. (она получена усреднением диапазона $\varepsilon = 2,3 \div 2,5$ о.е., декларируемого для СПЭ). Результаты вычислений размещены в двух последних столбцах таблицы 1.

Сравнение расчетного и каталожного значений $C_{\text{кл}}^*$ указывает на их различие в среднем на 15%. Следовательно, в зависимости от используемой емкости $C_{\text{кл}}^*$ для КЛ с ШР на 15% могут отличаться и коэффициенты компенсации K , порождая тем самым значительную неопределенность в выборе способов защиты выключателя.

Интересно, что емкость из каталога больше найденной по формуле, а для того, чтобы формула дала такую же емкость, как в каталоге, в нее необходимо подставлять вовсе не $\varepsilon = 2,4$ о.е., а значение $\varepsilon \approx 2,8$ о.е., невозможное для сшитого полиэтилена. Почему так происходит и как выйти из сложившейся

Табл. 1. Погонная емкость однофазного кабеля 220 кВ

$F_{\text{ж}}, \text{мм}^2$	Каталог			Расчет при $\varepsilon = 2,4$ о.е.	
	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$C_{\text{кл}}^*, \text{мкФ/км}$	$C_{\text{кл}}^*, \text{мкФ/км}$	ошибка, %
630	30,2	78	0,16	0,141	14
800	33,7	81,9	0,17	0,150	13
1000	37,9	86,1	0,18	0,163	11
1200	44	94	0,21	0,176	19
1400	49	99	0,22	0,190	16
1600	52	102	0,23	0,198	16
2000	56	106	0,24	0,209	15
2500	66	116	0,27	0,237	14
3000	72	122	0,29	0,253	15

ситуации — автору не ясно, хотя, не исключено, что у специалистов кабельных заводов на это уже давно есть ответ.

Казалось бы, зачем разбираться в причинах расхождения двух емкостей $C_{\text{кл}}^*$, ведь в расчеты лучше закладывать емкость из каталога, которую заводы, скорее всего, не вычисляют, а получают путем прямых измерений на кабельных барабанах. Однако такой ответ не устроит тех, кто занимается моделированием переходных процессов, и вот почему.

Согласно [1] (и во многих других случаях) при проектировании КЛ требуется проведение подробного компьютерного моделирования процессов, выполняемого в программах вроде канадской EMTP и ее аналогов. Задание кабеля в таких программах происходит путем указания, в частности, диаметров d_1 , d_2 и др. (радиусов r_1 , r_2 и др.), а также диэлектрической проницаемости ε , на основе которых компьютер вычисляет погонную емкость КЛ по известной во всем мире приведенной выше классической формуле. Если пользователь укажет каталожные d_1 , d_2 и типовое значение $\varepsilon = 2,4$, то емкость $C_{\text{кл}}^*$ смоделированного таким образом кабеля окажется в среднем на 15% меньше реальной (см. таблицу 1) с соответствующими последствиями для коэффициента K и предлагаемых в проектной документации заключений.

Можно рекомендовать пользователям EMTP и других программ задавать $\varepsilon = 2,8$ вместо $\varepsilon = 2,4$, однако здесь надо быть осторожнее, ведь это изменит скорость распространения волны вдоль кабеля v , которая в некоторых случаях играет важную роль ($v = v_0 / \sqrt{\varepsilon}$, где $v_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость волны в вакууме). Вместе с тем, есть основания полагать, что при моделировании переходных процессов включения КЛ под напряжение сети и при оценке степени опасности апериодической составляющей тока все же вполне допустимо использовать в компьютерной модели корректировку ε до значений, обеспечивающих достижение кабелем каталожной емкости ($\varepsilon \approx 2,8$).

Строго говоря, сама по себе каталожная емкость $C_{\text{кл}}^*$ едва ли является очень уж надежным ориентиром, а лучше опираться на значения емкости, полученные при заводских измерениях каждого конкретного барабана с готовым кабелем. Дело в том,

что при производстве кабеля могут использоваться различные партии полиэтилена, имеющие проницаемость в диапазоне $\varepsilon = 2,3 \div 2,5$ о.е., а тогда кабели с изоляцией из $\varepsilon = 2,5$ автоматически будут иметь емкость на 8–9% выше, чем кабели с изоляцией из $\varepsilon = 2,3$. В каталогах, вероятно, указано некоторое среднее значение емкости $C_{\text{кЛ}}^*$, но тем, кто моделирует процессы в КЛ, приходится использовать именно его, ведь на стадии проектирования и расчетов еще нет никаких барабанов с готовым кабелем.

АКТИВНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ КЛ

В вопросах коммутаций КЛ проводимость $G_{\text{кЛ}}$ играет важную роль, поскольку от нее зависит время саморазряда линии. После отключения КЛ от сети на емкости $C_{\text{кЛ}}$ остается заряд, который постепенно стекает в землю (рисунок 5). Быстрое стекание заряда позволяет гарантировать, что к моменту включения КЛ ее емкость полностью разряжена, а значит переходные процессы не будут интенсивными, что положительно сказывается и на величине перенапряжений на изоляции КЛ, и на токах выключателя. Оценим время саморазряда емкости КЛ.

Процесс разряда емкости КЛ и снижения ее напряжения описывается выражением:

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

где E_m — амплитуда фазного напряжения сети, τ — эквивалентная постоянная времени разряда, которая может быть найдена как:

$$\tau = C_{\text{кЛ}} / G_{\text{кЛ}} = 1 / (\omega \cdot \text{tg} \delta),$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота сети, рад/сек; $f = 50$ Гц — частота сети.

Для СПЭ-изоляции, которая применяется для современных кабелей 110–500 кВ, справедливо $\text{tg} \delta \approx 0,001$, и тогда постоянная будет:

$$\tau = \frac{1}{\omega \cdot \text{tg} \delta} \approx \frac{1}{314 \cdot 0,001} = 3 \text{ сек.}$$

Саморазряд КЛ до напряжения $u(t) = 0,05 \cdot E_m$, то есть почти до 0, происходит за время $t = 3\tau \approx 10$ сек. Если учесть, что емкость КЛ может разряжаться также и через реакторы, имеющиеся на линии, то время окажется еще меньше.

На чисто кабельных линиях АПВ не применяется, и после отключения КЛ от сети ее повторное включение едва ли произойдет быстрее чем через 10 сек. Поэтому можно утверждать, что к моменту включения КЛ на ней не будет остаточного заряда. Таким образом, требование [1] проводить расчеты включения КЛ, где на жилах есть остаточный заряд, по всей видимости, желательно уточнить.

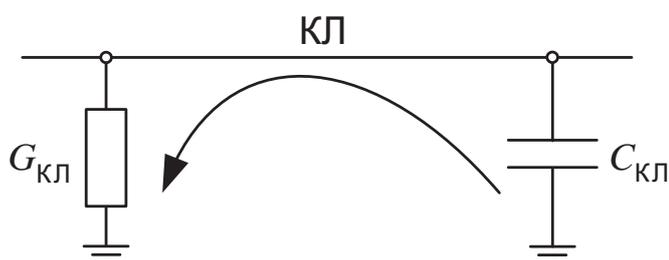


Рис. 5. Схема саморазряда отключенной КЛ

ИНДУКТИВНОСТЬ КЛ И АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КЛ

Методика [1] требует использовать в расчетах корректные значения $L_{\text{кЛ}}$ и $R_{\text{кЛ}}$, принимая их по справочнику или по данным каталога. В статье [2] уже было показано, что верных значений $L_{\text{кЛ}}$ и $R_{\text{кЛ}}$, учитывающих последовательность (прямая, нулевая) и схему заземления экранов (одностороннее, двустороннее, транспозиция экранов), в справочниках и каталогах нет. Поэтому здесь рекомендуется доверять компьютерной программе ЕМТР (и аналогам), которая самостоятельно определяет все необходимые активно-индуктивные параметры КЛ на основе заданной пользователем геометрии фазы кабеля, взаимного расположения трех фаз (А, В, С), схемы заземления экранов.

Нельзя не отметить, что при изучении переходных процессов включения КЛ под напряжение сети (на холостой ход) принципиальное значение имеют поперечные параметры КЛ, такие как емкость $C_{\text{кЛ}}$ и проводимость $G_{\text{кЛ}}$, а вот индуктивность $L_{\text{кЛ}}$ и сопротивление $R_{\text{кЛ}}$ на результаты расчетов влияния, по сути, не оказывают, что будет продемонстрировано далее на конкретном примере расчета. Следовательно, в рассматриваемом круге задач внимание следует обращать на точность задания $C_{\text{кЛ}}$ и $G_{\text{кЛ}}$, а вот к параметрам $L_{\text{кЛ}}$ и $R_{\text{кЛ}}$ все же не стоит относиться так серьезно.

ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим пример расчета переходного процесса включения КЛ 220 кВ под напряжение сети. Пусть КЛ выполнена тремя однофазными кабелями с медной жилой 1600 мм² и медным экраном 185 мм², пусть напряжение на КЛ подается со стороны распределительного устройства РУ-1 выключателем 1, а реактор мощностью 50 Мвар подключен на свободном конце КЛ (схема рисунка 1).

Расчеты проведены в ЕМТР, куда были заложены диаметры кабеля из таблицы 1, и где была задана скорректированная проницаемость изоляции $\varepsilon = 2,79$, позволившая выйти на значение погонной емкости, отвечающее каталожному $C_{\text{кЛ}}^* = 0,23$ мкФ/км. При напряжении 220 кВ такая емкость соответствует емкостному току на фазу 9,2 А/км.

Мощность реактора 50 Мвар достигается при его рабочем напряжении 242 кВ, а при напряжении 220 кВ потребляемая мощность меньше и отвечает индуктивному току 108 А. Тогда коэффициент компенсации КЛ может быть оценен по отношению токов реактора $I_{\text{ШР}}$ и кабеля $I_{\text{кЛ}}$ по формуле:

$$K = \frac{Q_{\text{ШР}}}{Q_{\text{кЛ}}} = \frac{I_{\text{ШР}}}{I_{\text{кЛ}}} = \frac{108 \text{ А}}{9,2 \text{ А/км} \cdot l_{\text{кЛ}} [\text{км}]} = \frac{11,7 \text{ км}}{l_{\text{кЛ}} [\text{км}]}$$

Видно, что в условиях задачи при длине $l_{\text{кЛ}} = 12$ км достигается практически полная компенсация зарядной мощности линии $K \approx 1,0$.

На рисунке 6 даны осциллограммы тока одной из фаз выключателя КЛ, полученные в схеме рисунка 1, где для примера принято, что активное сопротивление сети составляет $R_c = 0,5$ Ом, а индуктивное сопротивление сети на промышленной частоте

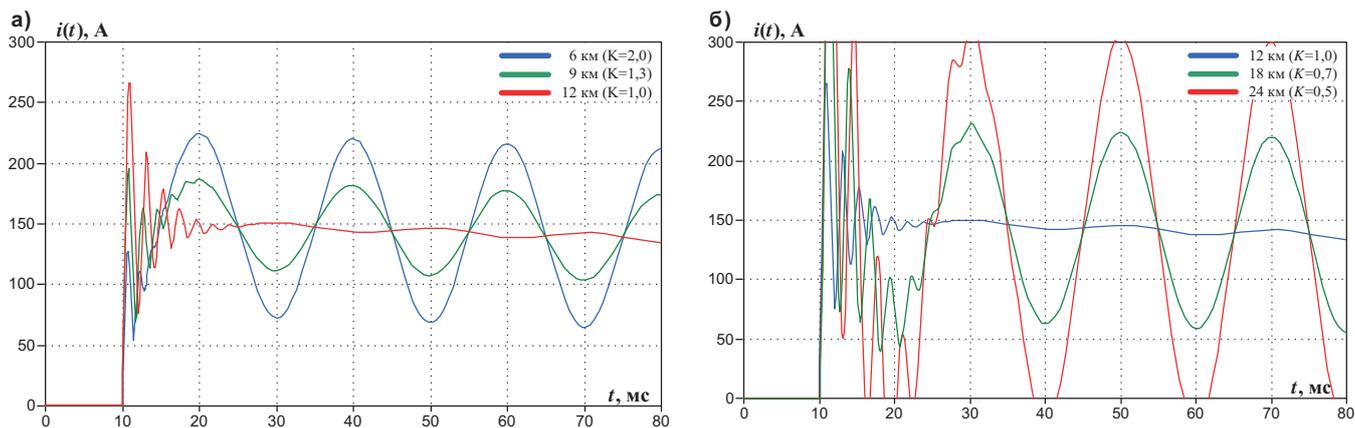


Рис. 6. Ток выключателя КЛ в схеме рисунка 1. Варьируется длина КЛ: а) менее 12 км ($K > 1$); б) более 12 км ($K < 1$)

$X_C = 12,7$ Ом (это отвечает току КЗ от шин РУ-1, равному 10 кА). Видно, что ток выключателя содержит:

- затухающую высокочастотную составляющую;
- затухающую апериодическую составляющую;
- периодическую составляющую частоты 50 Гц.

По мере затухания апериодической составляющей суммарный ток получает нулевые значения, что очень важно, если вслед за включением КЛ вдруг потребуются ее быстрое отключение. Согласно п. 4.10.3–4.10.4 методики [1] успешным отключение будет, только если после включения суммарный ток получил нулевые значения быстрее суммы минимального времени срабатывания защит и минимального собственного времени отключения выключателя. Опираясь на это условие, обычно получается, что после включения КЛ первые нулевые значения тока выключателя должны появляться не позднее, чем через 30–50 мс с момента коммутации КЛ. Следовательно, в условиях рисунка 6 успешное отключение КЛ и отсутствие риска повреждения выключателя будут лишь в случае $l_{\text{кл}} = 24$ км ($K \approx 0,5$), что полностью отвечает соображениям рисунка 2.

Хотя при включении КЛ ток выключателя имеет сразу три составляющие, в [1] подразумевались лишь последние две (апериодическая и 50 Гц), и условия перехода суммарного тока через нулевое значение необходимо проверять именно по ним. Тем не менее, к сожалению, прямых указаний о неучете высокочастотной составляющей тока в [1] нет, что чревато ошибочными техническими решениями.

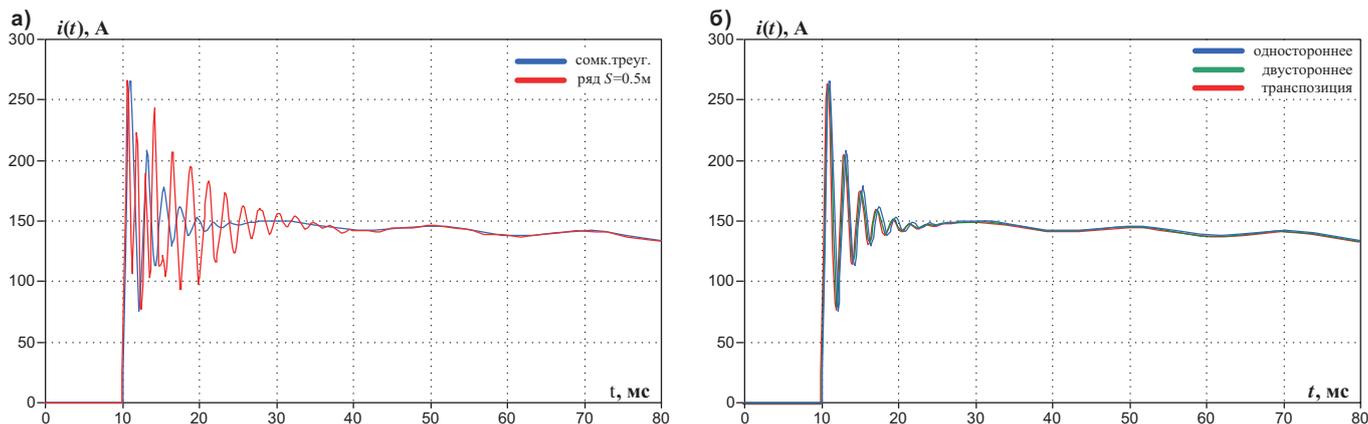


Рис. 7. Ток выключателя КЛ в схеме рисунка 1. Варьируется: а) взаимное расположение трех фаз КЛ; б) схема заземления экранов КЛ

Наличие высокочастотной составляющей тока выключателя зависит от многих факторов, среди которых и параметры КЛ, и параметры сети, и способ моделирования кабелей и сети. Известны случаи, где в расчетах инженеры получали осциллограммы тока с очень высоким содержанием высокочастотной составляющей, обеспечивавшей переход суммарного тока выключателя через нулевое значение в широком диапазоне коэффициентов K (даже при $K > 0,7 \div 0,8$), что приводило к выводу об отсутствии опасности повреждения выключателя, едва ли заслуживающему доверия. Учитывая изложенное, в [1] следует добавить положения, которые разъясняют, нужно или нет принимать во внимание наличие в токе составляющих высокой частоты и связанных с ними «быстрых» переходов тока через ноль (считается, что вакуумные выключатели способны гасить дугу в ноль высокочастотного тока, но вот элегазовым это дается сложнее).

ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

При расчете процессов включения КЛ и анализе токов выключателя главным является коэффициент компенсации K , определяемый емкостью линии (ее зарядной мощностью) и мощностью подключенных к линии ШР — это показано на рисунке 2. Что касается других факторов, то многие из них, хотя и упомянуты в [1], принципиальной роли не играют, что продемонстрировано на рисунках 7 и 8.

Из рисунка 7а следует, что взаимное расположение фаз, влияющее, в частности, на продольную

индуктивность $L_{к\lambda}$ [2], не изменяет апериодическую составляющую и составляющую 50 Гц. Также на осциллограммы не влияет и схема заземления экранов кабелей (рисунок 7б), хотя от нее зависит активное сопротивление $R_{к\lambda}$ [2].

Согласно рисунку 8 ничего не поменяет и смена расположения ШР на линии. Иногда полагают, что если ШР подключен в конце КЛ, то апериодическая составляющая тока проходит из сети в реактор вдоль всей трассы линии, и тем самым подвергается дополнительному затуханию за счет действия сопротивления линии $R_{к\lambda}$. Однако из-за большого сечения медной жилы КЛ, сопротивление $R_{к\lambda}$ в разы меньше активного сопротивления фазы реактора, и поэтому затухание апериодической составляющей определяется самим реактором, а не активным сопротивлением КЛ. В частности, на это желательно обратить внимание тем, кто пытается расставлять реакторы на КЛ, руководствуясь п. 5.2 методики [1], где как раз рекомендуется включать линию под напряжение сети таким образом, чтобы ШР оказался в ее конце. Данный пункт имеет отношение только лишь к ВЛ, ведь у ВЛ (по сравнению с КЛ) в разы выше активное сопротивление (как из-за материала проводов и их сечения, так и по причине большой протяженности ВЛ, достигающей десятков и сотен км).

Один из факторов, который действительно оказал бы влияние на получаемые осциллограммы — это наличие на КЛ короткого замыкания (рисунок 9). К сожалению, в существующей редакции [1] такой случай для КЛ не является расчетным, хотя согласно опыту эксплуатации, накопленному в России за последние годы, включение КЛ 110–500 кВ на КЗ вполне возможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сетях 110–500 кВ России постепенно расчет число протяженных КЛ, а также КЛ, выполняемых сразу 2–3 кабелями на фазу. Для подобных объектов встает вопрос о необходимости компенсации зарядной мощности за счет шунтирующих реакторов.

В ряде публикаций показано, что в режимах одно-стороннего питания КЛ от сети на изоляции КЛ не

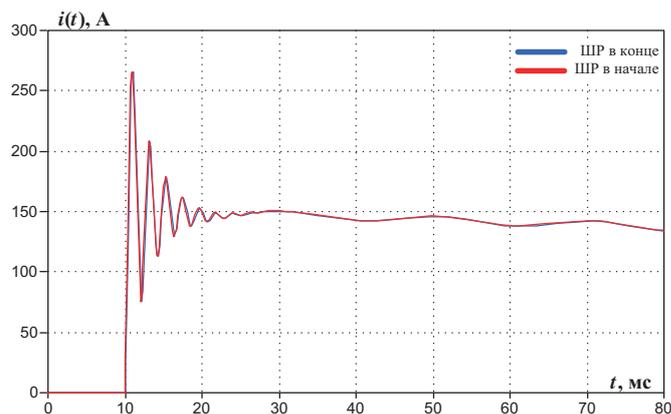


Рис. 8. Ток выключателя КЛ в схеме рисунка 1. Варьируется место подключения ШР

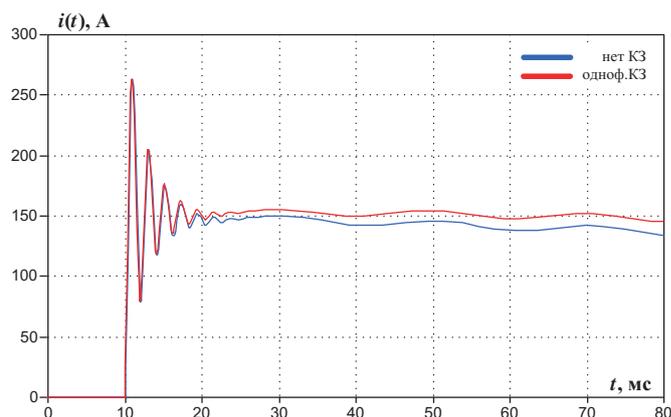


Рис. 9. Ток выключателя КЛ в схеме рисунка 1. Рассмотрен случай без КЗ на КЛ и с ним

возникает опасных повышений напряжения 50 Гц, и поэтому размещение реакторов достаточно выполнить на шинах РУ, а подключение реакторов непосредственно к линии не требуется.

Если реакторы все же планируется подключить именно к КЛ, а не к шинам, то согласно распоряжению [1] следует провести серию расчетов переходных процессов, возникающих при коммутациях КЛ с реакторами. При выполнении таких расчетов рекомендуется обратить внимание на соображения, изложенные в статье. Возможно, некоторые из них после обсуждения было бы полезно отразить в новой редакции методики [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика расчета и выбора средств, обеспечивающих отключение элегазовых выключателей при коммутациях линий электропередачи и сборных шин, оснащенных шунтирующими ре-

акторами // Москва, ОАО «ФСК ЕЭС», введена приказом № 838р в 2012 г.

2. Дмитриев М.В. Продольные параметры кабельных линий 6–500 кВ с однофазными кабелями // Журнал «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Пере-

дача и распределение», 2018, № 1(46). С. 84–90.

3. Дмитриев М.В. Методика выбора мероприятий по борьбе с апериодическими токами // Новости Электротехники, 2012, № 5(77). С. 62–64.

REFERENCES

1. The method of calculating and selecting means to ensure gas-insulated circuit breakers opening when switching power transmission lines and busbars equipped with shunt reactors. Moscow, "FGC UES" PJSC Publ., 2012. (in Russian)

2. Dmitriev M.V. Direct-axis parameters of 6-500 kV single-phase cable lines. *ELEKTROENERGIYA: peredacha i raspredelenie* [ELECTRIC POWER: Transmission and Distribution], 2018, no. 1(46), pp. 84-90. (in Russian)

3. Dmitriev M.V. Methods for selecting measures to control aperiodic component of current. *Novosti Elektrotehniki* [Electrical engineering news], 2012, no. 5(77), pp. 62–64. (in Russian)