

Повреждения силовых трансформаторов при коммутациях кабелей 6–35 кВ

СЕТИ
РОССИИ

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ



За последние годы в нашей стране на нескольких различных подстанциях были зафиксированы повреждения витковой изоляции обмоток среднего напряжения 6–35 кВ силовых трансформаторов при включениях связанных с ними кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена. Для всех случаев длина коммутируемой кабельной линии 6–35 кВ составляла несколько километров, а также зачастую линия имела по несколько кабелей на каждую фазу, то есть во всех случаях речь шла о подключении значительной емкости.

Михаил ДМИТРИЕВ,
к.т.н., доцент кафедры «Электрические системы и сети»,
Санкт-Петербургский политехнический университет

ВВЕДЕНИЕ

Повреждения витковой изоляции обмоток трансформаторов 6–35 кВ были на том классе напряжения, на котором коммутировался кабель значительной емкости. Обследование позволило установить, что обмотки, соединенные в треугольник, чаще повреждались в своей средней части, а обмотки, соединенные в звезду, чаще повреждались вблизи от высоковольтного ввода.

Рассмотрим возможные причины происходящего и предложим мероприятия, которые позволили бы снизить воздействия на обмотки. В качестве примера на рисунке 1 показан силовой трансформатор с повреждением обмотки 10 кВ.

ЕМКОСТЬ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Поскольку немаловажную роль в повреждениях трансформаторов играет большая емкость длинного (и порой сдвоенного, строенного и т.д.) коммутируемого кабеля, то уделим время понятию емкости кабеля и ее актуальным значениям.

У трехфазного кабеля есть собственная емкость жил относительно земли C_s и емкость между жилами C_M . В нормальном режиме, когда к кабелю приложена тройка фазных ЭДС, имеющих сдвиг 120° друг относительно друга (так называемая прямая последовательность), емкость кабеля определяется как

$$C_1 = C_s + 3 C_M$$

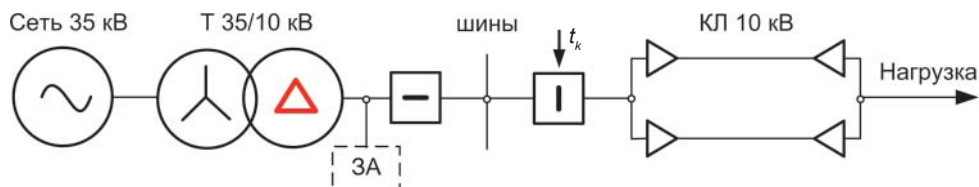


Рис. 1. Коммутация кабельной линии в сети среднего напряжения

Когда к кабелю приложена тройка фазных ЭДС, не имеющих углового сдвига друг относительно друга (так называемая нулевая последовательность), напряжения в трех фазах совпадают и по величине, и по углу. Тогда межфазная емкость кабеля уже не влияет на процессы, и емкость кабеля будет

$$C_0 = C_S.$$

У однофазного кабеля, обладающего заземленными медными экранами, нет емкости между жилами $C_M = 0$ (жилы отделены друг от друга заземленными экранами), и поэтому емкости прямой и нулевой последовательностей совпадают с собственной емкостью жилы

$$C_1 = C_0 = C_S.$$

Некоторые трехфазные кабели выполнены как три однофазных, объединенных вместе в заводских условиях, при этом каждая жила имеет свой индивидуальный медный экран. Разумеется, такой трехфазный кабель, так же, как и однофазный, лишен межфазной емкости $C_M = 0$, и для него верно $C_1 = C_0 = C_S$.

В сетях высокого напряжения 110–500 кВ специалистов чаще интересует емкость прямой последовательности C_1 , поскольку именно она определяет зарядный ток кабеля, определяет генерируемую кабелем реактивную мощность, влияет на баланс реактивной мощности и уровни напряжений в узлах сети. В настоящее время все вновь прокладываемые кабели 110–500 кВ имеют однофазную конструкцию, и поэтому вопрос о емкости прямой или нулевой последовательности на самом деле лишен смысла, ведь $C_1 = C_0 = C_S$, то есть в каталогах кабель характеризуется не парой емкостей C_1 и C_0 , а одной и той же «на все случаи жизни».

В сетях среднего напряжения 6–35 кВ важна, прежде всего, емкость нулевой последовательности C_0 , поскольку именно она определяет ток замыкания на землю при однофазных замыканиях на землю — это было важно понимать тогда, когда в сетях массово применялись трехфазные кабели с бумажно-пропитанной изоляцией, обладающие несовпадающими друг с другом C_1 и C_0 . В настоящее же время новые линии 6–35 кВ чаще всего выполняются или однофазными (с медными экранами), или трехфазными с пофазно экранированными жилами, и, следовательно, в каталогах все такие кабели характеризуются не парой емкостей C_1 и C_0 (как это было ранее для старых типов кабелей), а одной и той же емкостью $C_1 = C_0 = C_S$.

Как видно, при решении широкого круга задач в сетях 6–35 кВ и 110–500 кВ, построенных с применением современных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена, хотя и по разным причинам, но интерес представляет одна и та же емкость $C_1 = C_0 = C_S$, иногда называемая «рабочей емкостью».

Емкость современных кабелей с полиэтиленовой изоляцией отличается от таковой для старых кабелей с бумажной изоляцией не только потому, что новые кабели обладают $C_M = 0$. Главным образом, отличие вызвано тем, что новые кабели имеют малую относительную диэлектрическую проницаемость

(2,4 о.е. против 4,2 для масла), а также другие геометрические размеры, ведь теперь:

- другая изоляция и другие рабочие напряженности поля;
- существенно возросли сечения жил прокладываемых кабелей.

В частности, все это означает, что известная еще со времен СССР формула, определяющая ток однофазного замыкания на землю в кабельной сети 6–35 кВ, больше не может применяться даже для оценочных расчетов. Она выглядела как

$$I_3 = (U_{НОМ} \cdot L_{КЛ}) / 10 \quad (1)$$

где I_3 — ток однофазного замыкания на землю (А) в сети 6–35 кВ;

$U_{НОМ}$ — номинальное напряжение сети (кВ);

$L_{КЛ}$ — суммарная длина кабельных линий (км) интересующего класса напряжения.

Например, для сети 35 кВ при суммарной длине 5 км подключенных к секции кабельных линий получаем по этой формуле ток замыкания на землю

$$I_3 = (35 \cdot 5) / 10 = 17,5 \text{ А},$$

что превышает установленный ПУЭ для класса 35 кВ предел тока 10 А и может трактоваться как повод установить в нейтраль сети компенсационный реактор.

Если сеть построена современным кабелем 35 кВ, то по данным каталогов его емкостный ток на фазу составляет 1,5 А/км (для жилы 400 мм²) или 2 А/км (для 800 мм²). Значит в условиях примера при суммарной длине кабельных линий 35 кВ, равной 5 км, ток замыкания на землю составит $3 \cdot [5 \cdot (1,5 + 2)] = 22,5 + 30 \text{ А}$.

Отметим, что вопросы установки реактора в сети 35 кВ здесь рассмотрены теоретически и потребовались, чтобы дополнительно проиллюстрировать различия старой формулы и нынешних реалий. На самом деле общепризнано, что в сетях среднего напряжения 6–35 кВ, содержащих кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена, однофазные замыкания должны отключаться как можно быстрее, и длительная работа с замыканием бессмысленна и даже вредна.

«Бессмысленна» на том основании, что повреждение в кабельной сети, скорее всего, не сможет самоустраниться, а потребитель наверняка получает питание по двум цепям. Поэтому ждать самоустранения нет никакого смысла, а отключение поврежденной цепи вряд ли вызовет перебой в электроснабжении потребителей.

«Вредна» на том основании, что при наличии в сети замыкания на землю на изоляцию неповрежденных фаз сети воздействует линейное напряжение (вместо нормального фазного). Дополнительно на изоляцию неповрежденных фаз могут воздействовать дуговые перенапряжения (если повреждение не имеет устойчивого характера), а также коммутационные перенапряжения (если поиск места аварии осуществляется поочередным отключением фидеров).

Несмотря на постепенную смену технической политики в делах компенсации токов замыкания на землю, величины этих токов по-прежнему надо определять, и здесь несложные исследования по-

казали, что для оценки тока замыкания на землю в современных кабельных сетях среднего напряжения 6–35 кВ в знаменателе формулы (1) вместо коэффициента 10 должен стоять какой-то другой.

Указать точное значение затруднительно из-за возросшей номенклатуры применяемых в сетях сечений жилы, и это, в частности, означает, что устарела сама идеология единой обобщенной формулы для оценки тока замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью. Таким образом, применять формулу (1) или ее модификации больше не рекомендуется, а оценку емкости сети на землю теперь лучше производить «честно», то есть путем суммирования емкостей всех отдельных присоединений электрически связанной сети.

ПРОТЯЖЕННОСТЬ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Погонная емкость (зарядный ток на единицу длины) современного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена отличается от кабелей предыдущего поколения. Низкая диэлектрическая проницаемость полиэтилена не означает, что в сети 6–35 кВ удалось снизить емкость и токи замыкания на землю. Скорее наоборот, емкость и токи замыкания с годами возрастают, и это обусловлено в том числе развитием сети, значительным ростом числа кабельных линий, а также увеличением протяженности единичных линий.

Нередко в энергосистемах возникает ситуация, когда не вполне соответствуют друг другу спланированная схема развития сети и неожиданно появляющиеся новые потребители со своими запросами. Это приводит к тому, что имеется ряд объектов, вблизи которых отсутствуют центры питания, и их электроснабжение вынужденно приходится организовывать по кабельным линиям 6–10 кВ длиной до 10–15 км, что конечно нельзя назвать нормальным.

Также в энергосистемах возрастают единичные мощности трансформаторов и потребителей, и поэтому их подключение к сети 6–35 кВ приходится выполнять по кабельным линиям, где на каждую фазу надо прокладывать не один, а сразу несколько однофазных кабелей (встречалось до трех кабелей на фазу и даже до пяти).

Таким образом, в настоящее время в России на среднем напряжении 6–35 кВ не так сложно найти кабельные линии значительной емкости, и это обусловлено двумя факторами:

- появление длинных кабельных линий в отсутствие центров питания 35–220 кВ, которые были бы расположены в непосредственной близости от потребителей;
- появление кабельных линий с большим числом однофазных кабелей на фазу из-за роста единичной мощности трансформаторов и потребителей.

Рассмотрим, какие процессы в сети среднего напряжения возникают, если в ней коммутируется кабельная линия, имеющая по тем или иным причинам большую емкость на землю (емкость $C_1 = C_0 = C_S$).

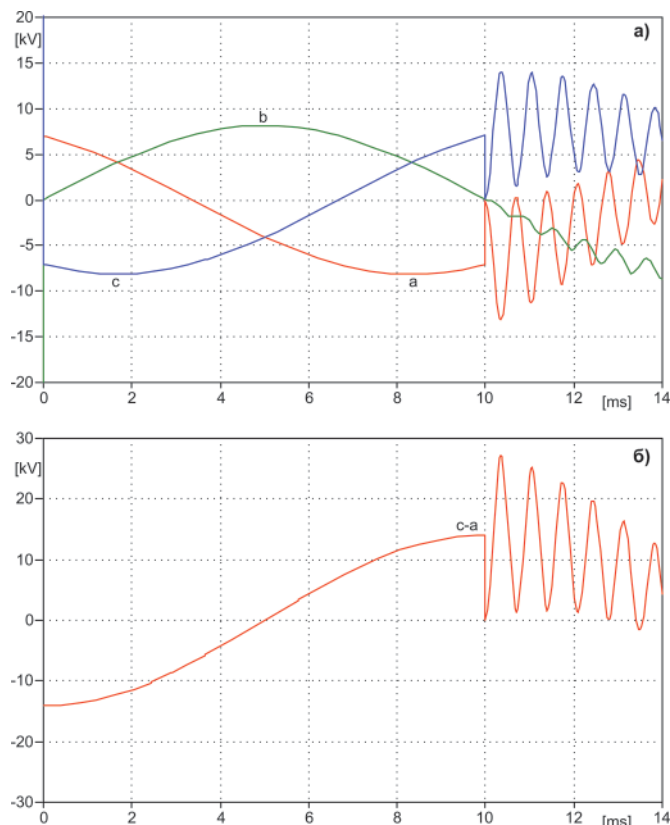


Рис. 2. Напряжение на стороне 10 кВ трансформатора, к которому в момент времени 10 мс подключается кабельная линия большой емкости и возникает переходный процесс: (а) фазные напряжения «а», «b», «с»; (б) линейное (межфазное) напряжение «с-а»

ХАРАКТЕР ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

На рисунке 2а приведена расчетная осциллограмма напряжений на выводах 10 кВ силового трансформатора при подключении к нему в момент $t_k = 10$ мс кабельной линии (рисунок 1), а на рисунке 2б отображено межфазное напряжение «с-а».

Подключение к трансформатору незаряженной кабельной линии большой протяженности (большой емкости) приводит к мгновенному падению фазных напряжений «а» и «с» до нулевых значений (рисунок 2а). По этой причине до нуля упадет и разность этих напряжений, то есть линейное напряжение «с-а» (рисунок 2б).

На осциллограмме рисунка 2 при подключении кабельной линии 10 кВ мгновенное значение фазного напряжения фазы «b» равно нулю, а напряжения фаз «а» и «с» равны друг другу и противоположны по знаку. Такой момент коммутации подобран специально для того, чтобы мгновенное значение синусоиды линейного напряжения «с-а» при подключении кабельной линии было максимально, а значит возникающий провал (срез) напряжения «с-а» также был наиболее ощутим (рисунок 2б).

В дальнейшем по мере заряда емкости кабельной линии 10 кВ от сети 35 кВ через продольную индуктивность трансформатора 35/10 кВ напряжение на этой линии восстанавливается до нормальных значений. Как видно из рисунка 2, процесс заряда емкости кабельной линии 10 кВ через индуктивность трансформатора 35/10 кВ имеет характер затухающих колебаний.

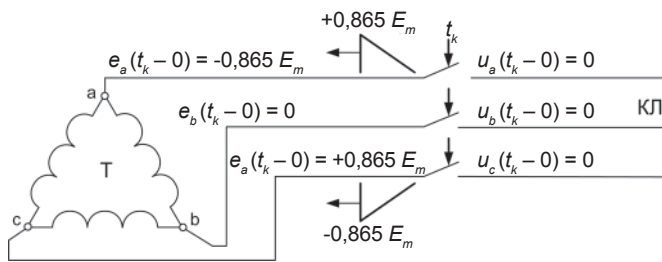


Рис. 3. Подключение кабельной линии к обмотке 10 кВ трансформатора и образование воздействующих на обмотку импульсов напряжения

Согласно рисунку 2 в момент подключения к шинам (к трансформатору) кабельной линии возникают просадки напряжения или, иначе говоря, импульсные напряжения с крутым фронтом. Подобные импульсы распространяются от выводов обмотки в ее среднюю часть как это показано на рисунке 3, где $(t_k - 0)$ — момент непосредственно до коммутации кабеля.

Особенность возникающих импульсов — небольшая величина, но очень крутой фронт. Так, в условиях рисунка 2 величина импульсов всего $0,865 E_m$, то есть не превосходит амплитуды фазного напряжения сети E_m . Опасность таких импульсов для изоляции трансформатора следует связывать не с их величиной, а прежде всего с их крутым фронтом. Крутой фронт означает, что в двух соседних рядом расположенных точках обмотки напряжения могут существенно отличаться. Например, в начале какого-то витка напряжение уже есть, и приближается к амплитуде фазного E_m , а в конце витка напряжения еще нет, потому что импульс еще не дошел до него. Из-за этого вдоль витка возникает градиент напряжения, величина которого способна достичь даже амплитуды фазного напряжения сети E_m .

Если вдоль обмотки распространяется не один импульс, а два, направленные навстречу друг другу, то в средней части обмотки эти импульсы окажут совместное воздействие на средний виток (катушку). Так на рисунке 4 показано, как два импульса различной полярности с крутым фронтом подошли к среднему витку (катушке) обмотки трансформатора и дают пробой его продольной изоляции.

В общем случае величина импульсного воздействия на средние витки обмотки зависит от того, ка-

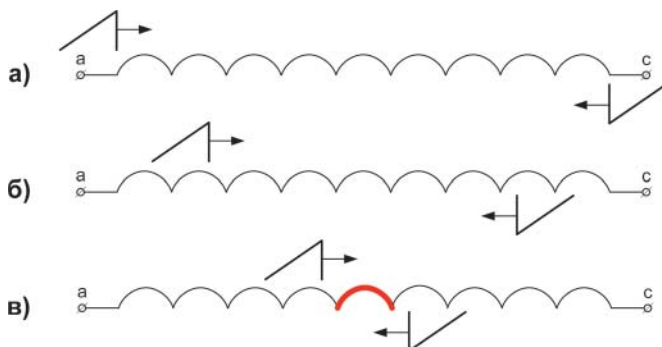


Рис. 4. Распространение импульсов напряжения противоположной полярности вдоль соединенной в треугольник обмотки 10 кВ «с-а» трансформатора в схеме рисунка 1: (а) импульсы у вводов обмотки «с» и «а»; (б) импульсы продвинулись вглубь обмотки «с-а»; (в) импульсы встретились в средней части обмотки «с-а» и привели к пробоям витковой изоляции

ким было значение синусоиды 50 Гц линейного напряжения этой обмотки на момент коммутации t_k . Импульсное воздействие на средние витки может варьироваться по величине от 0 до $1,73 E_m$. В условиях рисунка 2 для обмотки «с-а» как раз имеет место $1,73 E_m$, то есть срез отвечает амплитуде линейного напряжения сети.

Очевидно, возможность пробоя изоляции зависит и от прочности витковой изоляции, и от параметров воздействующих импульсов, которые определяются характером переходных процессов, возникающих при коммутациях во внешней по отношению к трансформатору сети. Теоретически возможно сделать витковую изоляцию настолько прочной, что каждый ее виток (катушка) сможет выдерживать импульсное воздействие с крутым фронтом и максимальным значением до $1,73 E_m$. Однако такой трансформатор будет дорогим, а его обмотки станут громоздкими.

Конструкции силовых трансформаторов 6–35 кВ проверены годами успешной эксплуатации. Поэтому решение проблемы коммутации длинных кабельных линий 6–35 кВ следует искать вовсе не в изменении конструкции обмоток, а в снижении воздействий на изоляцию.

Главной особенностью схемы рисунка 1 является тот факт, что очень сильно отличаются емкости по разные стороны от коммутируемого выключателя. Если слева от выключателя (со стороны трансформатора) присутствует лишь небольшая емкость, то с другой стороны — значительная емкость кабельной линии, которая может быть на 1–2 порядка выше емкости со стороны трансформатора.

Причины, по которым различие емкостей дает нежелательные эффекты, будут пояснены далее, а пока можно лишь предположить, что повышение емкости с той стороны от выключателя, где установлен трансформатор, позволит исправить ситуацию.

СООТНОШЕНИЕ ЕМКОСТЕЙ ПО РАЗНЫМ СТОРОНАМ ОТ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

При коммутациях кабельных линий на самом деле не так важна их емкость, сколько соотношение емкости сети и конкретной кабельной линии. Поясним это на примере схемы рисунка 1, где к шинам 10 кВ подключается кабельная линия 10 кВ.

Хотя на схеме рисунка 1 отображена лишь одна кабельная линия 10 кВ, на самом деле на стороне 10 кВ у трансформатора может быть большое число кабелей. Все они подключены к шинам 10 кВ, которые в свою очередь получают питание от показанного на рисунке 1 трансформатора 35/10 кВ. На рисунке 5 дана упрощенная схема такой сети, где приняты следующие обозначения: L_T — индуктивность короткого

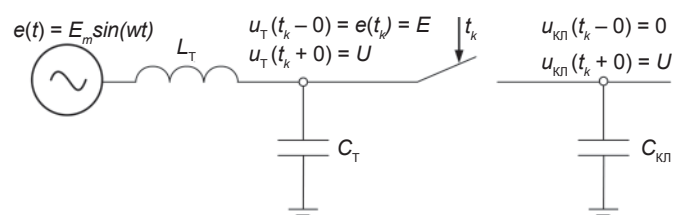


Рис. 5. Упрощенная схема замещения кабеля и сети в условиях рисунка 1

замыкания трансформатора 35/10 кВ, приведенная к стороне 10 кВ; C_T — емкость на землю сети, расположенной слева от коммутируемого выключателя 10 кВ, то есть со стороны трансформатора 35/10 кВ (в эту емкость входят емкости всех кабельных линий 10 кВ, которые подключены к шинам 10 кВ за исключением той линии, коммутация которой рассматривается); $C_{кп}$ — емкость на землю ($C_1 = C_0 = C_S$) коммутируемой кабельной линии с учетом ее длины и числа кабелей на фазу; E — мгновенное значение напряжения «фаза — земля» на выводах трансформатора непосредственно до коммутации (оно же — напряжение на шинах 10 кВ); U — мгновенное значение напряжения на выводах трансформатора непосредственно после коммутации (оно же — напряжение на шинах 10 кВ); t_k — момент коммутации кабельной линии; $(t_k - 0)$ и $(t_k + 0)$ — моменты непосредственно до и после коммутации кабеля.

Запишем закон сохранения заряда для моментов до коммутации (–) и после коммутации (+). Получим $q_T^- = q_T^+ + q_{кп}^+$, откуда с учетом известного соотношения $q = CU$ найдем $C_T E = (C_T + C_{кп}) U$,

$$\frac{U}{E} = \frac{C_T / C_{кп}}{1 + C_T / C_{кп}} \quad (2)$$

Величина U/E характеризует напряжения на выводах трансформатора после коммутации по отношению к такому напряжению до коммутации. В момент, когда к шинам 10 кВ подключается кабельная линия, обладающая значительной емкостью, напряжение на шинах скачком (мгновенно) снижается с уровня E до уровня U , то есть скачок напряжения составляет $E - U$, или же в относительных единицах E он будет $1 - U/E$.

Величина $1 - U/E$ показывает, какой «скачок» сделало напряжение в момент коммутации, то есть, по сути, является относительным значением величины импульса напряжения, который, возникнув на шинах 10 кВ (или на выводах трансформатора), воздействует на продольную витковую изоляцию обмотки 10 кВ трансформатора.

Результаты вычислений по формуле (2) даны в таблице 1. Видно, что по мере роста емкости C_T со стороны обмотки трансформатора величина импульсной составляющей $1 - U/E$ снижается. Например, при равенстве емкостей C_T и $C_{кп}$ импульсная составляющая оказывается в 2 раза меньше наиболее опасного значения для случая $C_T = 0$. Таким образом, на практике следует стремиться к исключению ситуаций, когда $C_T \ll C_{кп}$.

ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

При включениях под напряжение кабельных линий снижение воздействий на изоляцию трансформатора произойдет, если удастся добиться повышения емкости со стороны трансформатора. Например, это возможно в следующих случаях:

- коммутация с предварительно замкнутым секционным выключателем;
- установление такого порядка коммутации линий, подключенных к секции шин, при котором в первую очередь коммутируются линии с малой емкостью, а линии с большой емкостью коммутируются в последнюю очередь;

Табл. 1. Влияние емкости со стороны трансформатора (со стороны шин) на просадку напряжения при подключении к трансформатору (шинам) кабельной линии.

$C_T/C_{кп}$ (соотношение емкостей)	U/E (оставшееся напряжение)	$1 - U/E$ (скачок напряжения)
0	0,00	1,00
0,25	0,20	0,80
0,5	0,33	0,67
1,0	0,50	0,50
1,5	0,60	0,40
2,0	0,67	0,33

- размещение защитных аппаратов (ЗА) на выводах трансформатора, в качестве которых могут выступать емкости так называемых RC-цепочек.

Влияние секционного выключателя

Положим, как это зачастую и бывает на практике, что есть две одинаковые секции шин 10 кВ, каждая из которых получает питание от своего трансформатора 35/10 кВ, однако в нормальном режиме работы секционный выключатель 10 кВ разомкнут (поэтому на схеме рисунка 1 и показана только одна секция). Пусть каждая из секций имеет отходящую кабельную линию 10 кВ примерно одинаковой длины.

Для иллюстрации влияния соотношения емкостей $C_T/C_{кп}$ рассмотрим, как изменятся воздействия на трансформатор, если перед подключением интересующей кабельной линии секционный выключатель 10 кВ был предварительно замкнут, то есть на момент коммутации со стороны трансформатора уже подключена одна кабельная линия примерно такой же длины, как и коммутируемая, то есть имеет место $C_T \approx C_{кп}$.

Предварительное замыкание секционного выключателя означает, что емкости по обе стороны от коммутируемого в момент t_k выключателя оказываются примерно равны друг другу. Эффект от такого выравнивания хорошо виден на рисунке 6. Если при разомкнутом секционном выключателе напряжение на выводах трансформатора скачком падало до нулевого значения ($U/E = 0$ по таблице), то есть на все 100%, то в случае предварительного замыкания секционного выключателя напряжение падает до уровня $U/E = 0,5$, то есть лишь на 50%.

Порядок коммутации линий

Предположим, от секции шин отходят сразу несколько кабельных (или даже воздушных) линий различной протяженности и емкости на землю. Если секция шин была отключена, и теперь на нее подано напряжение, и предстоит поочередное подключение всех отходящих линий, то нежелательно, чтобы в первую очередь коммутировались линии с большой емкостью, поскольку при таких коммутациях на шинах возникнет значительная просадка напряжения, опасная для трансформатора. Порядок коммутации должен быть таким, что в первую очередь к шинам подключались линии небольшой емкости, затем линии средней емкости и только в самую последнюю

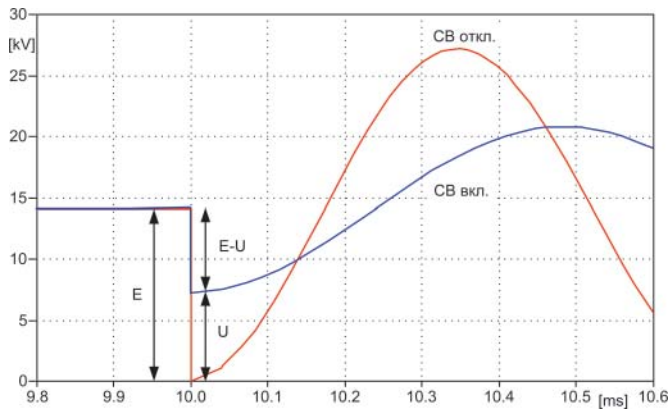


Рис. 6. Линейное напряжение «с-а» на стороне 10 кВ трансформатора, к которому в момент времени 10 мс подключается кабельная линия большой емкости. Варьируется состояние секционного выключателя 10 кВ

очередь — линии большой емкости. Указанное правило позволит каждый раз при коммутации очередной линии не допускать опасного для трансформаторов соотношения емкостей $C_T \ll C_{кл}$.

Установка защитных аппаратов (ЗА)

Причиной повреждения витковой изоляции трансформаторов являются, по всей видимости, импульсные напряжения, обладающие небольшой величиной, но очень крутым фронтом.

Поскольку в условиях рисунка 1 больших по величине напряжений не возникает, то наличие на выводах трансформатора ограничителей перенапряжений (ОПН) не способно повлиять на ситуацию, а в качестве защитных аппаратов требуются те, которые способны снизить не величину напряжений, а снизить их крутизну. Такими аппаратами традиционно считаются RC-цепи. Можно предложить две возможные схемы подключения RC-цепей к выводам трансформатора — они даны на рисунке 7.

На рисунке 8 в качестве примера дана осциллограмма напряжения на выводах 10 кВ трансформатора при двух различных схемах подключения RC-цепей. В качестве параметров для определенности приняты $R = 10$ Ом и $C = 0,5$ мкФ. Коммутируется сдвоенная кабельная линия 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена длиной 2 км с кабелями сечением 185 мм^2 , тогда как других кабелей на шинах нет.

Из рисунка 8 следует, что в условиях рисунка 1 для защиты соединенных в треугольник обмоток предпочтительнее отдать RC-цепям, подключенным по схеме «фаза-фаза». Выбор оптимальных сопротивлений и емкости RC-цепей должен проводиться в каждом конкретном случае отдельно, в том числе

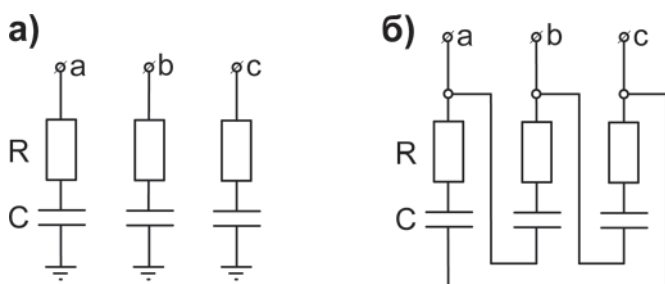


Рис. 7. Различные варианты подключения защитных RC-цепей к трансформатору: (а) RC-цепи, включенные по схеме «фаза-земля»; (б) RC-цепи, включенные по схеме «фаза-фаза»

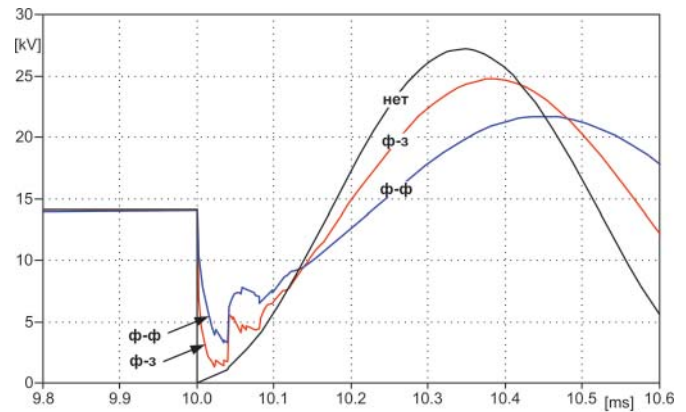


Рис. 8. Линейное напряжение «с-а» на стороне 10 кВ трансформатора, к которому в момент времени 10 мс подключается кабельная линия. На выводах трансформатора установлены (или «нет») RC-цепи ($R = 10$ Ом, $C = 0,5$ мкФ), включенные по схеме «фаза-земля» («ф-з») или «фаза-фаза» («ф-ф»)

с учетом величины потерь в активном сопротивлении RC-цепи под действием рабочего напряжения сети.

Важно обратить внимание, что установка RC-цепей не должна быть массовой, а задумываться о ней следует лишь в тех схемах вида рисунка 1 (или ее аналогах), где обычным делом является подключение к трансформатору емкостей, которые в разы превосходят емкость со стороны трансформатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известен ряд схем, где на шинах среднего напряжения 6–35 кВ есть кабельные линии с повышенной емкостью, что обусловлено или большой протяженностью линии, или же большим числом кабелей на каждую ее фазу.

Подача напряжения на такие кабельные линии от шин среднего напряжения может привести к существенной кратковременной просадке напряжения на этих шинах и, как следствие, опасным воздействиям на витковую изоляцию обмоток подключенных к шинам силовых трансформаторов и повреждениям их изоляции. Снизить просадки напряжения и воздействия на трансформаторы можно, если исключить ситуации, когда емкость включаемой под напряжение кабельной линии в разы больше суммарной емкости линий и оборудования, подключенного к шинам и уже находящегося под сетевым напряжением. Этого можно достичь различными способами, среди которых:

- на время подачи напряжения от шин на наиболее длинные кабельные линии 6–35 кВ желательно предварительно замкнуть секционный выключатель, обеспечив параллельную работу секций шин 6–35 кВ с соответствующим ростом емкости шин относительно земли;
- включение под напряжение отходящих от шин кабельных линий целесообразно проводить в порядке увеличения их емкости, в первую очередь вводя в работу наиболее короткие линии с малой емкостью, а в последнюю очередь — линии с большой емкостью относительно земли;
- устанавливать на выводах 6–35 кВ трансформаторов RC-цепочки, параметры которых подобраны в результате серии расчетов переходных процессов в сети.