

Проверка экранов и оболочек КЛ 6–500 кВ

УДК 621.315.2

Отечественные нормативные документы предписывают проводить испытания линий 6–500 кВ с однофазными кабелями как после монтажа, так и периодически в процессе эксплуатации. В частности, следует проводить измерения токов, наведенных в экранах, с целью их сравнения друг с другом. Кроме того, надо проверять целостность оболочки путем приложения к ней постоянного напряжения 10 кВ на время 1 мин. В статье показано, что различие токов в экранах полностью исправной кабельной линии может быть заметно выше порога 10%, установленного нормами. Также показано, что применение в схемах заземления экранов специальных ОПН существенно сокращает время подготовки к испытаниям оболочки напряжением 10 кВ.

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

ВВЕДЕНИЕ

Для кабельных линий (КЛ), выполненных однофазными кабелями, согласно СТО [1]: «7.3.8. Неравномерность распределения токов по жилам и экранам кабелей не должна превышать 10%». Точно такое же требование есть и СТО [2]: «35.9. Неравномерность распределения токов по токопроводящим жилам и оболочкам (экранам) кабелей не должна быть более 10%».

Главная причина различия токов в экранах указана в самом же СТО [1]: «5.3. Неравномерность распределения токов в экранах может быть обусловлена несимметрией геометрического взаимного расположения кабелей». Хотя причина неравномерности названа верно, авторы стандартов [1] и [2] некорректно оценили ее предельное значение, ограничившись величиной 10%.

Опыт измерений на действующих КЛ 6–500 кВ, а также опыт моделирования, говорят о том, что для полностью исправных линий, проложенных в соответствии с действующими нормами, «неравномерность» может достигать 500%, не представляя при этом никакой опасности для КЛ. Столь большие различия токов связаны с наличием в каждом из экранов до четырех составляющих токов, имеющих разную природу и суммирующихся друг с другом сложным образом.

В статье токи в экранах рассмотрены для самых распространенных способов расположения фаз (рисунок 1) и схем заземления экранов. Отметим, что все расчеты и пояснения даны на примере одноцепных КЛ, а что касается двухцепных КЛ, то для них выводы сохраняются, хотя и появятся некоторые особенности

Ключевые слова:

однофазный кабель, заземление экранов, токи в экранах, испытания кабеля, ОПН

Keywords:

single-core cable, screen grounding, screen current, cable testing, surge arrester



Рис. 1. Основные способы прокладки однофазных кабелей: а) сомкнутым треугольником; б) в ряд (в плоскости)

(дополнительные контуры для токов нулевой последовательности [3]). Также обратим внимание, что моделирование КЛ выполнялось в программе EMTP, известной во всем мире.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ В ЭКРАНАХ

В общем случае токи в экранах трех фаз КЛ определяются наложением друг на друга четырех составляющих, среди которых:

- 1) емкостный ток прямой последовательности;
- 2) индуктивный ток прямой последовательности;
- 3) индуктивный ток обратной последовательности;
- 4) индуктивный ток нулевой последовательности.

Емкостные токи в экранах есть всегда, когда кабель находится под рабочим напряжением сети, в том числе и для ненагруженных («холостых») кабелей.

Индуктивные токи в экранах появляются только для кабелей под нагрузкой. Даже если токи в жилах образуют тройку токов прямой последовательности, токи в экранах могут иметь составляющие не только прямой последовательности, но еще и обратной, и нулевой. Наличие, величина, соотношение индуктивных составляющих прямой, обратной, нулевой последовательностей зависят от ряда принципиальных факторов, среди которых:

- наличие/отсутствие на трассе участков с несимметричным расположением трех фаз друг относительно друга (когда фазы не равноугловым треугольником);
- схема заземления экранов;
- степень «идеальности» транспозиции, если применена транспозиция экранов [4];
- наличие/отсутствие транспозиции самих однофазных кабелей [3];
- сопротивление заземления экранов по концам КЛ и то, на сколько оно больше/ меньше полного продольного активно-индуктивного сопротивления экранов.

Если бы токи в экранах КЛ являлись лишь токами прямой последовательности (емкостными и индуктивными), то измерения этих токов, выполняемые на практике после монтажа КЛ и в процессе ее эксплуатации, показывали бы, что токи экранов фаз «А», «В», «С» не отличаются друг от друга (неравномерность токов 0%).

Поскольку в некоторых случаях в экранах КЛ также возникают компоненты обратной и нулевой последовательностей, то токи экранов «А», «В», «С» становятся различной величины. Это показано на рисунке 2, где к току экранов прямой последовательности $I_{ЭА1}$, $I_{ЭВ1}$, $I_{ЭС1}$ добавлены токи ну-

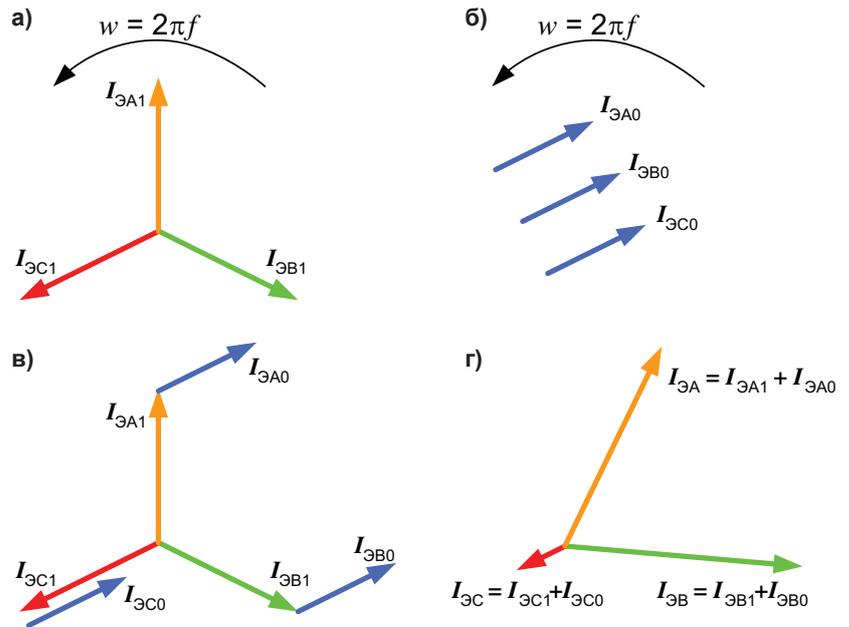


Рис. 2. Пример токов в экранах КЛ: а) составляющие прямой последовательности; б) составляющие нулевой последовательности; в) суммирование составляющих; г) результирующие токи в экранах трех фаз

левой $I_{ЭА0}$, $I_{ЭВ0}$, $I_{ЭС0}$, в результате чего суммарные токи экранов фаз «А», «В», «С» стали заметно отличаться.

В схемах без транспозиции экранов каждый из них на протяжении трассы КЛ принадлежит одной определенной жиле, и поэтому в обозначении экрана корректно использовать буквы «А», «В», «С». Если же сделана транспозиция экранов, то экран перестает принадлежать какой-то заданной жиле, а поочередно имеет отношение ко всем трем. Следовательно, для обозначения экранов лучше использовать, например, цифры 1, 2, 3 (не путать с последовательностями), что и будем делать впредь.

СХЕМЫ БЕЗ ТРАНСПОЗИЦИИ ЭКРАНОВ

На рисунке 3 приведены простые схемы заземления экранов однофазных кабелей:

- одностороннее заземление;
- двустороннее заземление.



Рис. 3. Простые схемы заземления экранов однофазных кабелей: а) заземление с одной стороны; б) заземление с двух сторон

Одностороннее заземление

При одностороннем заземлении в экранах нет индуктивных токов, поскольку контур, в котором они могли бы наводиться, разомкнут. Следовательно, из четырех составляющих в схеме рисунка 3а остается емкостный ток прямой последовательности, обусловленный приложением к изоляции КЛ рабочего напряжения, под действием которого ток с жилы стекает в экран и далее, пройдя вдоль экрана, уходит в место его заземления.

Если экран КЛ заземлен в одной точке (или нескольких точках), то он имеет близкий нулю потенциал, и за его пределами отсутствует электрическое поле. Поэтому у фаз КЛ нет взаимной емкости, а значит вне зависимости от вида прокладки КЛ (рисунок 1) рабочие емкости фаз одинаковы и определяются собственной емкостью «жила-экран». Если приложить к таким емкостям фаз напряжение сети прямой последовательности, то и токи в жилах, и токи в экранах также будут токами прямой последовательности, то есть они будут лишены «неравномерности».

Двустороннее заземление

При двустороннем заземлении в экранах кроме емкостных токов появляются также и индуктивные (индуктированные) токи. Индуктивные токи определяются:

- взаимной индуктивностью между жилой и экраном одной и той же фазы КЛ;
- взаимной индуктивностью между фазами.

Для случая прокладки трех фаз в ряд (рисунок 1б) взаимная индуктивность между соседними фазами «А, В» или «В, С» оказывается больше, чем между крайними «А, С». Это приводит к тому, что индуктивные токи в экранах фаз различаются, а значит не равны друг другу и полные токи экранов, представляющие собой сумму емкостной и индуктивных составляющих, то есть возникает «неравномерность».

Проведем расчеты токов в экранах КЛ 110 кВ, выполненной однофазными кабелями 1000/240 мм² с медной жилой и экраном, длиной 3 км. Погонная

емкость фазы КЛ составляет 0,25 мкФ/км, полная емкость 0,75 мкФ, емкостный ток 15 А. В расчетах положим, что КЛ имеет двустороннее питание, то есть подключена к сети 110 кВ с двух сторон, тогда емкостный ток в начале и конце КЛ будет по 7,5 А. Способ прокладки фаз КЛ — или сомкнутый треугольник (рисунок 1а), или ряд (рисунок 1б) с расстоянием 0,3 м между осями соседних фаз.

На данном этапе положим, что схема заземления экранов отвечает рисунку 3б, но позже будут рассмотрены и различные варианты транспозиции экранов. По концам КЛ экраны объединены вместе и далее соединены с контуром заземления, имеющим сопротивление 0,5 Ом — в нем будут фиксироваться (при наличии) составляющие нулевой последовательности $3I_0$.

На рисунке 4 приведены результаты расчетов токов экранов № 1, 2, 3 и тока в жиле $I_{ж}$ (он одинаков в трех жилах «А», «В», «С») в зависимости от передаваемой по КЛ трехфазной мощности $S_{кл}$. Определение «неравномерности» токов в экранах следует проводить по формуле:

$$\Delta_3 = (I_3^{max} / I_3^{min} - 1) \cdot 100\%.$$

Из рисунка 4 видно, что при двустороннем заземлении в экранах КЛ проходят токи уровня $I_3 / I_{ж} \approx 0,55$ для треугольника и $I_3 / I_{ж} \approx 0,83 \div 0,95$ для ряда — эти соотношения можно было бы получить и с помощью методики [4], хотя, строго говоря, она позволяет вычислять только лишь индуктивную составляющую прямой последовательности.

Также из рисунка 4 видно, что:

- для треугольника токи в экранах № 1, 2, 3 одинаковы, «неравномерность» — 0%;
- для ряда токи в экранах № 1, 2, 3 различаются, «неравномерность» — 15%;
- для треугольника и для ряда в экранах отсутствуют токи $3I_0$.

Для прокладки в ряд различие токов в экранах № 1, 2, 3 формально означает, что кроме индуктивной составляющей прямой последовательности в экранах есть также индуктивная составляющая обратной (а вот нулевой, согласно рисунку 4, там нет).

Различие токов в экранах при рядном расположении кабелей составляет 15%, превосходя порог в 10%, установленный нормами [1, 2]. Также интересно и то, что наибольшее различие достигается не между экранами крайних фаз (№ 1, 3) и средней фазой (№ 2), а между экранами крайних фаз № 1 и № 3 — этот эффект уже был замечен ранее некоторыми инженерами при теоретических и практических исследованиях.

«Неравномерность» токов в экранах, характерную для рядной прокладки фаз, можно существенно снизить, если предусмотреть для КЛ транспозицию однофазных кабелей [3] (не следует путать с транспозицией экра-

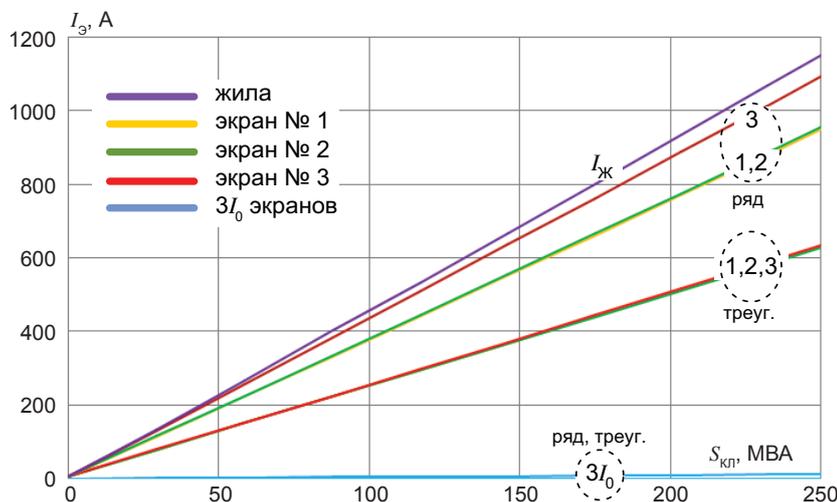


Рис. 4. Токи в экранах КЛ 110 кВ при их двустороннем заземлении



Рис. 5. Пример транспозиции однофазных кабелей

нов). Соответствующий пример предоставлен заводом «Таткабель» и показан на рисунке 5.

Для оценки опасности «неравномерности» экранных токов рассмотрим потери. Соотношение потерь в экране $P_{\text{э}}$ и жиле $P_{\text{ж}}$ по [4] будет равно:

$$P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} = (I_{\text{э}}/I_{\text{ж}})^2 \cdot F_{\text{ж}}/F_{\text{э}},$$

где $F_{\text{ж}}$ и $F_{\text{э}}$ — сечения медных жилы и экрана. При прокладке треугольником имеем $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} = 1,26$, при прокладке в ряд имеем $P_{\text{э}}/P_{\text{ж}} = 2,87 \div 3,76$ (значение 3,76 — экран № 3).

Видно, что $P_{\text{э}}$ больше, чем $P_{\text{ж}}$, то есть главным источником тепловыделения в КЛ являются экраны. Также видно, что потери в экране № 3 заметно превосходят потери в экранах № 1, 2. Вместе с тем, тепловые расчеты, сделанные в специализированных программах, показывают, что при прокладке трех однофазных кабелей в ряд самая высокая температура достигается все же у средней фазы, где условия охлаждения не такие хорошие, как у двух крайних фаз. Таким образом, повышенные потери экрана одной из двух крайних фаз КЛ никак не ограничивают пропускной способности КЛ, определяемой средней фазой.

ВИДЫ ТРАНСПОЗИЦИИ ЭКРАНОВ

Говоря о видах транспозиции экранов, обычно понимают термины [4]:

- идеальная транспозиция;
- неидеальная транспозиция.

Идеальная транспозиция — это такая, где два узла транспозиции делят трассу КЛ на три участка, а напряжения промышленной частоты, наведенные продольно на экраны на этих участках, оказываются равны друг другу по величине и имеют сдвиг 120° . Самым про-

стым примером идеальной транспозиции является случай, когда три участка трассы КЛ имеют равную длину и одинаковое взаимное расположение фаз, однако в [4] показано, что транспозиция может быть идеальной и в иных ситуациях. Степень «идеальности» транспозиции характеризуется коэффициентом K_T из [4].

Исследования показали, что при рассмотрении транспозиции экранов следует ввести еще одно понятие — «группа транспозиции» (оно близко известному понятию «группа соединения обмоток трансформатора»). Для трехфазных сетей транспозиция экранов кабелей может относиться только к одной из двух групп:

- группа «123–312» (рисунок 6а);
- группа «123–231» (рисунок 6б).

У трансформаторов «группа» обозначается числом (от 0 до 12), означающим взаимную ориентацию векторов первичной и вторичной обмоток. Числа от 0 до 12 аналогичны тем, что указываются на циферблате часов. Для кабелей «группу» также можно было бы обозначить одним числом (от 0 до 12), определяемым в зависимости от ориентации векторов напряжений (или токов) в жилах и экранах. Однако проще и понятнее напрямую указывать в названии «группы» тот или иной вариант соединения экранов № 1, 2, 3 (рисунок 6), что и было сделано.

Отличие групп удобно проследить, обратив внимание на чередование экранов до и после узла транспозиции Т1. Роль «группы» заключается в том, что от нее зависит ориентация векторов емкостной составляющей тока в экранах, а это, в свою очередь,

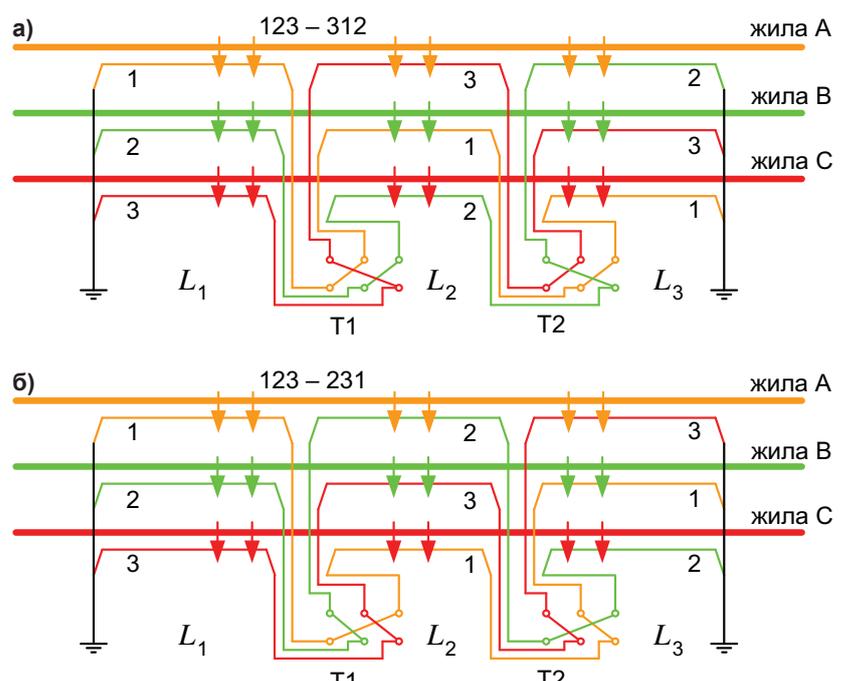


Рис. 6. Возможные «группы» транспозиции экранов КЛ: а) «123–312»; б) «123–231»

оказывается очень важно при суммировании данных векторов с векторами индуктивных составляющих. Иными словами, «группа» влияет на фиксируемую для КЛ неравномерность токов в экранах.

Некоторые пояснения влияния «группы» на векторы емкостных токов можно сделать с помощью рисунка 7, где для экрана № 1, имеющего три участка, образованные узлами транспозиции Т1 и Т2, показаны емкостные токи, стекающие в него с жил «А», «В», «С». На крайних участках токи идут в ближайšie места заземления, а на среднем участке для удобства можно положить, что половина тока отправляется по экрану в начало КЛ, половина — по экрану в конец.

Если полный емкостный ток (ток «холодного хода») фаз составляет I_{XA}, I_{XB}, I_{XC} , то на каждом из трех участков трассы КЛ на экран № 1 через изоляцию стекает один из емкостных токов $I_{XA}/3, I_{XB}/3, I_{XC}/3$. Например, в начале КЛ емкостный ток экрана № 1 равен векторной сумме тока $I_{XA}/3$ левого участка (L_1) и половине тока среднего участка (L_2), который для группы «123–321» будет равен $I_{XB}/6$ (рисунок 7а) и $I_{XC}/6$ для группы «123–231» (рисунок 7б). В обоих случаях величина емкостного тока экрана № 1 в начале КЛ будет одинаковой, но вот ориентация вектора будет разной.

Можно показать, что если вместо транспозиции экранов «123–321» применить «123–231», то тройка векторов емкостных токов экранов № 1, 2, 3, являющихся токами прямой последовательности, повернется на комплексной плоскости против часовой стрелки на угол 60° . Такой поворот изменит токи в экранах и их «неравномерность», но только при наличии в экранах индуктивных составляющих обратной и нулевой последовательностей — докажем это отдельно для треугольника и отдельно для ряда.

ТРАНСПОЗИЦИЯ ЭКРАНОВ (ТРЕУГОЛЬНИК)

Пусть взаимное расположение фаз одинаково на протяжении всей трассы КЛ и отвечает схеме рисунок 1а. Следовательно, степень идеальности транспозиции зависит только от соотношения длин L_1, L_2, L_3 трех участков трассы, на которые она была разделена двумя узлами Т1 и Т2. На рисунке 8 даны расчеты токов в экранах КЛ 110 кВ длиной 3 км для случаев:

- идеальная транспозиция (участки 1 км, 1 км, 1 км);
- неидеальная транспозиция (участки 1 км, 0,8 км, 1,2 км).

Идеальная транспозиция

Согласно методике [4] коэффициент транспозиции $K_T = 0$, и поэтому экранные токи не имеют индуктивной составляющей прямой последовательности. Также, по причине симметрии расположения трех фаз, в экранах не возникнет

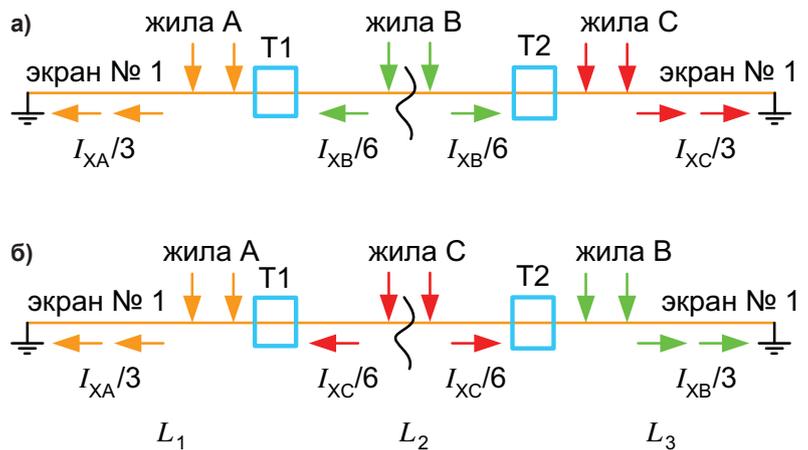


Рис. 7. Схема прохождения емкостных токов на примере экрана № 1: а) группа «123–312»; б) группа «123–231»

и каких-то иных индуктивных составляющих (обратной и нулевой последовательностей). Это значит, что из четырех возможных составляющих токи экранов КЛ имеют лишь емкостную составляющую прямой последовательности, и тогда «неравномерность» будет 0% (рисунок 8). «Группа» транспозиции не оказывает влияния, поскольку поворот на 60° векторов емкостных токов ничего не меняет в отсутствие других составляющих.

Неидеальная транспозиция

Согласно методике [4] $K_T = 0,115$, и поэтому токи экранов содержат индуктивную составляющую прямой последовательности. Если при двустороннем заземлении она была $I_3 = 0,55 \cdot I_{ж}$, то при транспозиции по [4] она станет $I_3 = (0,55 \cdot K_T) \cdot I_{ж}$. Например, при токе в жиле $I_{ж} = 1150$ А ($S_{кл} = 250$ МВА) индуктивный ток прямой последовательности будет равен $I_3 = 72$ А. Каких-то других индуктивных составляющих в экранах нет в силу симметрии расположения трех фаз. Поэтому токи в экранах КЛ представляют собой сумму только емкостной (около 5 А) и индуктивной (до 72 А) составляющих прямой последовательности, а значит, так как есть только прямая последовательность, «неравномерность» будет 0% (рисунок 8).

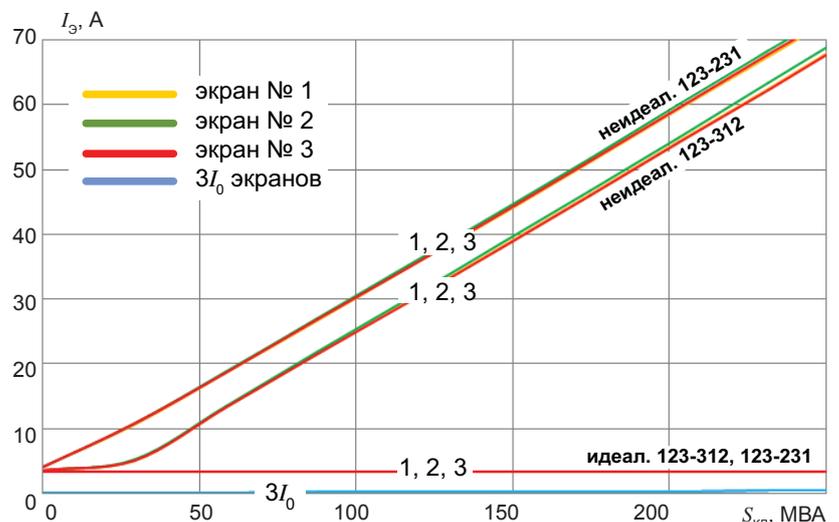


Рис. 8. Токи в экранах КЛ 110 кВ при их транспозиции. Прокладка фаз треугольником

Смена «группы» транспозиции с «123–321» на «123–231» привела к изменению (здесь — росту) величин токов. Это произошло, поскольку тройка емкостных токов повернулась на 60° и стала иначе ориентирована относительно тройки индуктивных токов прямой последовательности. Однако в отсутствие составляющих обратной и нулевой последовательности «неравномерность» так и осталась равной 0.

ТРАНСПОЗИЦИЯ ЭКРАНОВ (РЯД)

Пусть взаимное расположение фаз одинаково на протяжении всей трассы КЛ и отвечает схеме рисунка 1б. Следовательно, степень идеальности транспозиции зависит только от соотношения длин трех участков трассы, на которые она разделена двумя

узлами. Расчеты токов для идеальной транспозиции (участки 1 км, 1 км, 1 км) даны на рисунке 9, а для неидеальной транспозиции (участки 1 км, 0,8 км, 1,2 км) — на рисунке 10.

Идеальная транспозиция

При идеальной транспозиции $K_T = 0$, поэтому в экранах КЛ нет индуктивной составляющей прямой последовательности. Не будет там и обратной, поскольку при идеальной транспозиции на трех участках трассы происходит полная компенсация не только наведенных в экранах эдс прямой последовательности, но и эдс обратной.

Если говорить о нулевой последовательности, то она в экранах есть даже при идеальной транспозиции. Нулевая возникает из-за различия

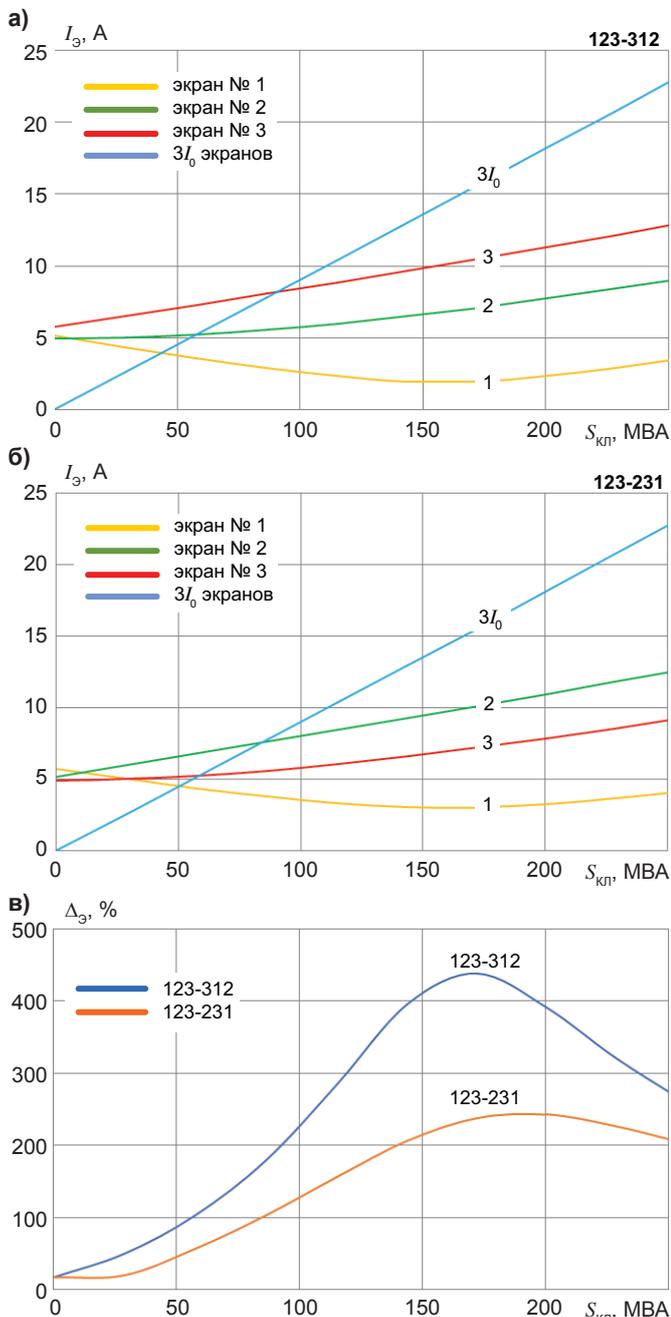


Рис. 9. Токи в экранах КЛ 110 кВ при их идеальной транспозиции (прокладка в ряд): а) «123–312»; б) «123–231»; в) «неравномерность»

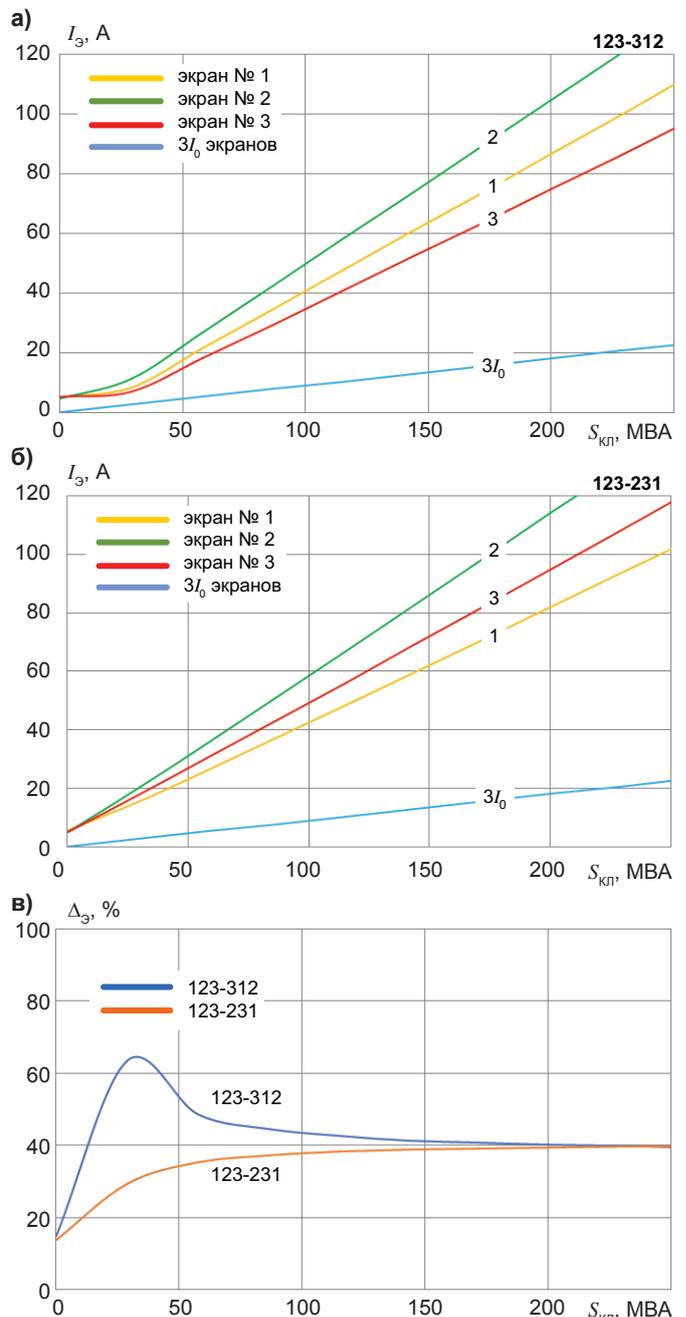


Рис. 10. Токи в экранах КЛ 110 кВ при их неидеальной транспозиции (прокладка в ряд): а) «123–312»; б) «123–231»; в) «неравномерность»

взаимных индуктивных сопротивлений соседних фаз «А, В», «В, С» и крайних фаз «С, А», вызывающего в каждом из трех экранов наличие одной и той же (по величине и углу) остаточной некомпенсированной эдс, пропорциональной току средней жилы «В» — именно под ее действием в экранах и появляются токи нулевой последовательности. Как следует из рисунка 9, при загрузке $S_{\text{кпл}} = 250$ МВА ток $3I_0 \approx 24$ А, то есть в каждом из трех экранов проходит составляющая нулевой последовательности $I_0 \approx 8$ А.

Суммирование емкостной составляющей прямой последовательности (около 5 А) и близкой по величине индуктивной составляющей нулевой последовательности (до 8 А), способно вызывать заметный перекос экранных токов и соответствующую значительную «неравномерность». В частности, на рисунке 9 для одной из «групп» и для некоторых режимов по $S_{\text{кпл}}$, которые определяют величину $3I_0$, «неравномерность» достигает 400–500%.

Влияние «группы» транспозиции на «неравномерность» понятно, ведь смена «группы» поворачивает тройку емкостных векторов прямой последовательности на угол 60° , и суммирование с тройкой векторов нулевой последовательности будет происходить иначе (на рисунке 2 был дан лишь один из примеров взаимной ориентации составляющих прямой и нулевой последовательностей).

Важно понимать, при транспозиции токи в экранах минимальны (их величина не более нескольких десятков Ампер), то есть они не могут вызвать сколько-нибудь заметного нагрева экранов. Поэтому даже существенная «неравномерность» в 500% не способна повлиять на тепловой режим КЛ и на температуру тех или иных фаз.

Неидеальная транспозиция

Согласно рисунку 4 для простого заземления экранов с двух сторон индуктивный ток в экранах был $I_\Omega = (0,83 \div 0,95) \cdot I_{\text{ж}}$, при этом индуктивная составляющая прямой последовательности могла быть оценена усреднением диапазона токов $I_\Omega \approx 0,9 I_{\text{ж}}$. Тогда для транспозиции $K_T = 0,115$ составляющая прямой последовательности будет равна:

$$I_\Omega = (0,9 \cdot K_T) \cdot I_{\text{ж}} = 0,104 I_{\text{ж}}$$

Например, при токе в жиле $I_{\text{ж}} = 1150$ А ($S_{\text{кпл}} = 250$ МВА) индуктивный ток прямой последовательности в экране $I_\Omega = 0,104 \cdot I_{\text{ж}} = 120$ А (близкие уровни токов хорошо видны на рисунке 10).

Итак, переход от идеальной транспозиции (рисунки 9) к неидеальной (рисунки 10) привел к тому, что в экранах, кроме емкостных токов прямой последовательности и индуктивных токов нулевой, появился еще и заметно превосходящий их по величине индуктивный ток прямой последовательности (до 120 А) — его возникновение и дало снижение «неравномерности» с исходных 400–500% до меньших значений 60–70%.

ПРОВЕРКА ЭКРАНОВ И ОБОЛОЧЕК

Было показано, что для исправной КЛ, имеющей на всем протяжении трассы (или только на отдельных участках) прокладку фаз в ряд, «неравномерность» токов в экранах при их одностороннем или двустороннем заземлении достигает 10–15%, что в целом отвечает значению 10%, установленному нормативными документами [1, 2] в качестве предельно допустимого. К сожалению, при использовании транспозиции экранов «неравномерность» токов в экранах существенно возрастает, достигая 500% и, возможно, даже больше. Столь значительная «неравномерность» лишает какого-либо смысла проведение замеров экранных токов действующих КЛ и их сравнение друг с другом. Подобные замеры следует исключить из стандартов [1, 2].

Одной из причин, которая в свое время побудила добавить в нормы контроль токов в экранах КЛ, было желание выявлять факты повреждения внешней оболочки кабелей или повреждения ОПН, установленных в коробках транспозиции, прямо в нормальном режиме работы КЛ. Идея была очень простой — для исправной КЛ без повреждений оболочки и без повреждений ОПН, токи в экранах фаз должны быть близки друг другу. Если же экран КЛ получает по трассе соединение с землей (через пробитую оболочку КЛ или через сгоревший ОПН), то это, по мнению авторов идеи, неминуемо приведет к нарушению проектной схемы заземления и вызовет «перекос» экранных токов.

Здесь следует отметить, что состояние оболочки КЛ и ОПН конечно же лучше оценивать не косвенными методами путем контроля токов в экранах, а прямыми испытаниями. Оболочку КЛ можно проверить путем приложения к ней постоянного напряжения 10 кВ на время 1 мин, а что касается ОПН, то их можно проверить мегаомметром, измерив сопротивление изоляции.

Проблемы прямых испытаний оболочек и ОПН, склонившие инженеров к идее online-мониторинга токов экранов, заключаются в том, что для их проведения надо:

- выводить КЛ из работы;
- отсоединять ОПН из коробок.

Вывод КЛ из работы снижает надежность схемы электроснабжения. Также он сопряжен с коммутациями КЛ, а они могут привести к возникновению на изоляции КЛ коммутационных перенапряжений и вызвать пробой (они вероятны, если линия имеет места, где из-за дефектов снижена прочность изоляции).

Отсоединение ОПН также не обещает ничего хорошего, поскольку в каждом из колодцев транспозиции необходимо предварительно откачать скопившуюся воду. Затем, спустившись в такой колодец, чтобы изъять ОПН, придется вскрыть коробку, неминуемо нарушив ее заводскую герметичность. Кроме этого важно, что в колодце часто размещаются коробки сразу двух цепей КЛ, и поэтому персонал, обслуживая коробку отключенной цепи, может получить электротравму от коробки работающей цепи, если внутри у нее есть нарушения и корпус находится под потенциалом.

Учитывая изложенное, в целом понятно, почему возникла идея контролировать состояние оболочки КЛ и исправность ОПН без отключения КЛ от сети прямо под нагрузкой путем замеров токов в экранах. Однако, увы, если даже для исправной КЛ «неравномерность» достигает 500%, то как же можно на этом фоне диагностировать какие-то повреждения оболочки и ОПН?

В условиях, когда контролировать токи в экранах бесполезно, целесообразно постараться упростить процедуру прямых испытаний оболочки КЛ и ОПН — этого удастся добиться за счет применения в коробках транспозиции специальных ОПН, которые больше не надо отключать на время испытаний оболочки КЛ постоянным напряжением 10 кВ. Речь идет о применении ОПН с рабочим напряжением 8,2 кВ против стандартных 7,2 кВ.

Исправные ОПН, имеющие переменное рабочее напряжение 8,2 кВ, не будут «открываться» при воздействии на них постоянного напряжения 10 кВ и тем самым не будут мешать испытаниям оболочки КЛ. Если же ОПН оказались повреждены, то испытания оболочки КЛ будут неуспешными, и такие ОПН будут обнаружены.

Применение ОПН 8,2 кВ позволяет за один раз испытать как оболочку КЛ, так и ОПН. При этом подготовка схемы к испытаниям заключается лишь в отключении КЛ от сети и разземлении ее экранов, а никакие работы в колодцах или коробках делать не приходится.

Указанное изобретение уже несколько лет применяется в кабельной сети ПАО «Ленэнерго» и на столько хорошо себя показало, что осенью 2018 года на научно-техническом совете ПАО «Россети» было принято решение распространить его и на другие энергосистемы нашей страны. Примеры коробок, оснащенных ОПН 8,2 кВ, приведены на рисунке 11а (корпус из алюминия) и рисунке 11б (корпус из диэлектрика с целью повышения электробезопасности персонала).

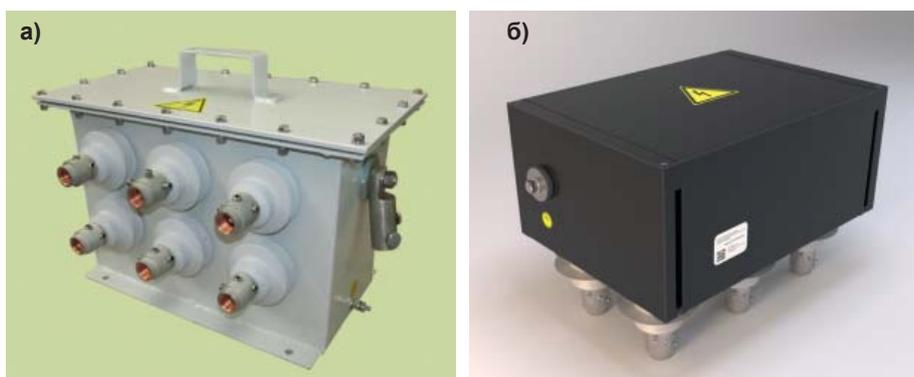


Рис. 11. Коробки транспозиции со специальными ОПН 8,2 кВ: а) корпус из алюминия; б) корпус из диэлектрика

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Токи в экранах исправных КЛ 6–500 кВ, выполненных однофазными кабелями, могут существенно отличаться друг от друга, «неравномерность» токов в экранах может достигать уровня 500%.
2. Наибольшая «неравномерность» характерна для тех КЛ, которые имеют участки с несимметричным (не треугольным) расположением фаз и одновременно оснащены транспозицией экранов, близкой к идеальной.
3. В условиях, когда даже исправная КЛ может иметь значительное отличие друг от друга токов в экранах, не представляется возможным использовать замеры токов в экранах как информативный способ выявления повреждений оболочки КЛ или ОПН, установленных в коробках транспозиции экранов.
4. Следует исключить из норм [1, 2] положение, обязывающее иметь отличие токов в экранах фаз не более чем на 10%, поскольку для КЛ 6–500 кВ с транспозицией экранов оно невыполнимо.
5. Достоверную оценку состояния оболочки КЛ и ОПН в коробках транспозиции можно получить только в процессе их испытаний на отключенной КЛ. При этом процедура испытаний существенно упрощается и становится безопаснее, если в коробках транспозиции (металлических или диэлектрических) установлены ОПН с рабочим напряжением 8,2 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-29.060.20.170-2014. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Дата введения: 15.05.2014.
2. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объемы и нормы испытаний электрооборудования. Стандарт организации ПАО «Россети». Дата введения: 29.05.2017.
3. Дмитриев М.В. Ложная работа защит на линиях 6–35 кВ с однофазными кабелями // Новости

Электротехники, 2016, № 3(99). С. 38–41.

4. Дмитриев М.В. Расчет схем заземления экранов однофазных КЛ 6–500 кВ с учетом особенностей трассы // ЭнергоЭксперт, 2016, №6. С. 32–35.

REFERENCES

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.