

Традиционно внимание к токам нулевой последовательности в сетях 6–35 кВ связывают прежде всего с режимом однофазного замыкания на землю. Оказалось, что такие токи, причем значительной величины, могут возникать и в нормальном режиме работы, приводя к ложной работе защит от замыканий на землю.

Рекомендации специалистам, занимающимся проектированием кабельных линий 6–35 кВ, дает в своем материале Михаил Викторович Дмитриев.

ЛИНИИ 6–35 кВ С ОДНОФАЗНЫМИ КАБЕЛЯМИ

Ложная работа релейных защит

В трехфазных сетях переменного напряжения возникают различные режимы работы, в том числе и несимметричные. Расчеты несимметричных установившихся режимов удобно вести с помощью метода симметричных составляющих, который позволяет представить фазные токи и напряжения как сумму составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При построении схем релейной защиты и автоматики наибольший интерес традиционно представляют составляющие прямой и нулевой последовательности. Составляющие прямой последовательности – это синусоидальные напряжения или токи, которые по величине одинаковы в трех фазах сети, но имеют угловой сдвиг 120° , достигая максимальных значений в очередности А, В, С. Составляющие нулевой последовательности также одинаковы по величине во всех трех фазах, но не имеют углового сдвига.

В нормальном симметричном установившемся режиме работы фазные токи и напряжения должны иметь составляющие прямой последовательности и не должны иметь составляющих нулевой последовательности. Если же фиксируется появление заметных составляющих нулевой последовательности, то, как правило, это означает возникновение в сети аварийной ситуации и требует отключения тех или иных присоединений.

В сетях 6–35 кВ настройка защит нулевой последовательности требует особой осторожности, ведь здесь (из-за отсутствия глухого заземления нейтрали) токи нулевой последовательности редко превосходят по величине рабочие токи присоединений. Опыт, накопленный на некоторых объектах, говорит о том, что настройка защит еще больше усложняется (или даже может оказаться невозможной), если в сети имеются многоцепные кабельные линии с однофазными кабелями, расположение которых относительно друг друга выбрано неудачным образом.

Опишем причины, по которым в нормальном режиме работы сетей 6–35 кВ в однофазных кабелях возникают заметные токи нулевой последовательности. Такие токи могут возникать и в экранах однофазных кабелей, и в жилах, однако на работу защит влияют лишь токи жил, тогда как влияние токов в экранах исключается путем присоединения трансформаторов тока (ТТ) по схеме, показанной на рис. 1.

ОДНОЦЕПНАЯ ЛИНИЯ

В сетях 6–35 кВ экраны однофазных кабелей чаще всего имеют заземление с двух сторон (рис. 2), а схемы для борьбы с наведенными в экранах токами и вызванными ими потерями мощности, к сожалению, применяются редко (речь идет о заземлении экранов только с одной стороны или о транспозиции экранов [1]).

На рис. 2 для трехфазной группы однофазных кабелей, имеющих двустороннее заземление экранов, показаны рабочие токи жил и наведенные ими токи в экранах. До сих пор считалось [1], что в нормальном режиме работы токи в экранах, как и токи в жилах, являются токами прямой последовательности и поэтому суммарный ток трех экранов равен нулю, т.е. в условиях рис. 2 не возникает токов в концевых контурах

заземления и в самой земле. Однако можно показать, что при размещении фазных кабелей не сомкнутым треугольником, а в плоскости (в ряд), справедливо:

$$I_{ЭА} + I_{ЭВ} + I_{ЭС} = 3I_{Э0} \neq 0.$$

Отметим, что в жилах кабеля, вне зависимости от схемы раскладки фазных кабелей, токи нулевой последовательности не возникают. Это объясняется тем, что в сетях 6–35 кВ нейтраль или вовсе изолирована, или заземлена через сопротивление (активное или индуктивное) и тогда в контуре нулевой последовательности имеется соответственно или разрыв, или заметное сопротивление:

$$I_{ЖА} + I_{ЖВ} + I_{ЖС} = 3I_{Ж0} \approx 0.$$

Значение $3I_{Э0} / I_{ЖВ}$ тока нулевой последовательности в экранах по отношению к току $I_{ЖВ}$ в жиле средней фазы В можно рассчитать при помощи методики [1], если при определении взаимной индуктивности M_K между фазными кабелями отказаться от среднегеометрического расстояния $s = \sqrt[3]{s_{AB} \cdot s_{BC} \cdot s_{AC}} = 1,26 \cdot s_{AB}$, где s_{AB} – расстояние между осями двух соседних фаз, а использовать реальные s_{AB} , s_{BC} , s_{AC} .

В качестве примера для одноцепной кабельной линии 10 кВ с однофазными кабелями типа 500/95 мм², расположенными треугольником или в ряд, в табл. 1 даны результаты расчета $3I_{Э0} / I_{ЖВ}$ в зависимости от глубины D_3 прохождения тока в земле и s_{AB} . Принято, что фазы А и С являются крайними, а фаза В – средней, т.е. $s_{BC} = s_{AB}$ и $s_{AC} = 2 \cdot s_{AB}$. Сопротивление заземления экранов полагалось пренебрежимо малым, и тогда длина кабеля уже не влияет на расчеты.

Эквивалентная глубина D_3 тока в земле при удельном сопротивлении грунта $\rho_3 = 100$ Ом·м и частоте тока $f = 50$ Гц может быть оценена величиной 1127 м, однако в [1] показано, что с учетом малой длины кабельных линий и наличия в земле разных проводящих коммуникаций целесообразно рассматривать и D_3 на уровне 100 м, 10 м, 1 м.

Из табл. 1 видно, что при реальных D_3 , составляющих не менее нескольких метров, относительное значение тока нулевой последовательности в экранах кабелей составляет всего $3I_{Э0} / I_{ЖВ} < 0,05$. Негативные последствия от наличия в экранах токов нулевой последовательности теоретически могли бы быть следующими:

- ложная работа релейной защиты;
- коррозия контура заземления.

Если говорить о возможных ложных срабатываниях релейной защиты нулевой последовательности, то величина $3I_{Э0} / I_{ЖВ} < 0,05$ вряд ли способна их вызвать. Также не стоит забывать, что подключение всех измерительных ТТ по схеме рис. 1 в принципе исключает влияние токов в экранах на работу защит.

Если говорить о коррозии металлоконструкций, то, по всей видимости, такая проблема действительно существует. Например, в условиях табл. 1 при токе в жиле кабеля $I_{ЖВ} = 500$ А с контура заземления в грунт будет стекать переменный ток 50 Гц величиной до $3I_{Э0} < 0,05 \cdot I_{ЖВ} = 25$ А. Отметим, что учет сопротивлений заземления на концах кабеля приводит к некоторому снижению тока $3I_{Э0}$.



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

Рис. 1. • Схема подключения измерительного трансформатора тока для кабеля с экраном

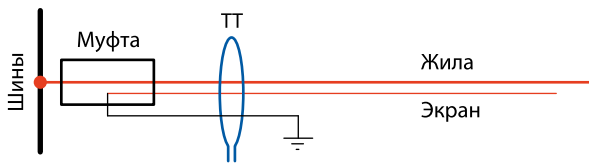


Рис. 2. • Токи прямой и нулевой последовательности в одноцепной КЛ:
а – фазные токи;
б – токи последовательностей

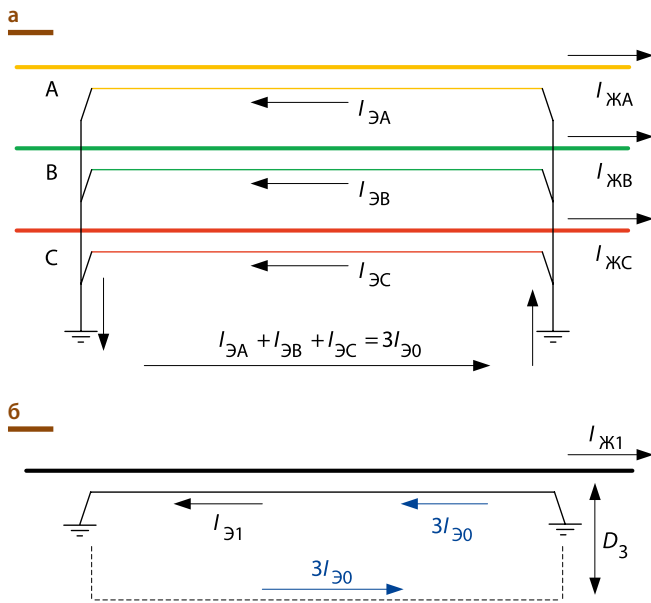


Таблица 1. • Токи нулевой последовательности в экранах одноцепной КЛ 10 кВ 500/95 мм²

Взаимное расположение	$D_3, \text{ м}$			
	1127	100	10	1
	$3I_{\text{Э}0} / I_{\text{ЖВ}}, \text{ о.е.}$			
Треугольник	0	0	0	0
Ряд, $s_{\text{AB}} = 0,1 \text{ м}$	0,021	0,027	0,038	0,062
Ряд, $s_{\text{AB}} = 0,2 \text{ м}$	0,020	0,026	0,038	0,064
Ряд, $s_{\text{AB}} = 0,3 \text{ м}$	0,019	0,026	0,038	0,064

Из табл. 1 следует, что для борьбы с токами нулевой последовательности $3I_{\text{Э}0}$ в экранах однофазных кабелей их следует прокладывать сомкнутым треугольником.

Для радикальной борьбы с токами в экранах традиционно использовался отказ от двустороннего заземления экранов по концам кабеля и переход к альтернативным схемам заземления [1], таким как одностороннее заземление экранов кабеля или их транспозиция. Важно, что два указанных мероприятия являются способами борьбы с наведенными в экранах токами прямой последовательности $I_{\text{Э}1}$. Что же касается борьбы с наведенными в экранах токами нулевой последовательности $3I_{\text{Э}0}$, то здесь одностороннее заземление экранов позволяет обеспечить $3I_{\text{Э}0} = 0$, а транспозиция, напротив, оказывается неэффективной, так как не влияет на контур прохождения экранного тока нулевой последовательности.

Рис. 3. Основные способы раскладки фаз двухцепной КЛ:
а, б – рядная; в, г – сомкнутый треугольник

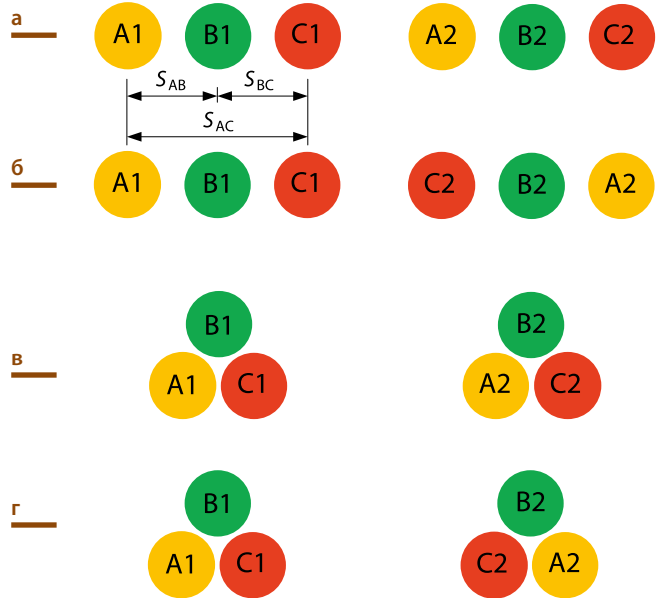


Рис. 4. Токи прямой и нулевой последовательности в двухцепной КЛ: а – при разомкнутых выключателях; б – при замкнутых

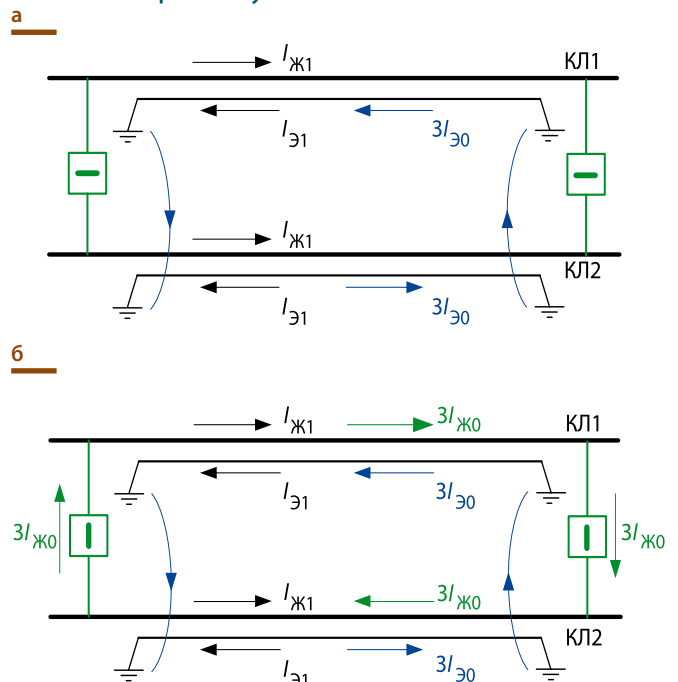


Таблица 2. Токи нулевой последовательности в экранах двухцепной КЛ 10 кВ 500/95 мм²

Взаимное расположение	Вариант раскладки фазных кабелей			
	Рис. 3а	Рис. 3б	Рис. 3в	Рис. 3г
	$3I_{\text{Э}0} / I_{\text{ЖВ}}, \text{ о.е.}$			
Треугольник	—	—	0,011	0,002
Ряд, $s_{\text{AB}} = 0,1 \text{ м}$	0,049	0,014	—	—
Ряд, $s_{\text{AB}} = 0,2 \text{ м}$	0,106	0,018	—	—
Ряд, $s_{\text{AB}} = 0,3 \text{ м}$	0,183	0,024	—	—

ДУХЦЕПНАЯ ЛИНИЯ

Серия исследований показала, что ток нулевой последовательности $3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}}$, достигающий наибольших значений при раскладке фаз в плоскости, существенно возрастает, если рядом с работающей цепью появляется такая же вторая (рис. 3а).

В случае одноцепной линии ток $3I_{\Sigma 0}$ замыкался через землю (рис. 2) и ее сопротивление выступало фактором, ограничивающим величину этого тока. Если же рядом с 1-й цепью появится 2-я цепь, также имеющая двустороннее заземление экранов, то токи $3I_{\Sigma 0}$ начнут замыкаться не через землю, а через экраны 2-й цепи (рис. 4а), поскольку такой путь обладает меньшим сопротивлением.

В качестве примера для двухцепной кабельной линии 10 кВ с однофазными кабелями типа 500/95 мм² в табл. 2 даны результаты расчета $3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}}$ в зависимости от взаимного расположения фаз, варианты которого даны на рис. 3. Было принято, что цепи расположены на расстоянии 1 м относительно друг друга (отсчитывается между осями средних фаз), также принято $D_3 = 1127$ м, секционные выключатели на данном этапе разомкнуты (схема рис. 4а), рабочие токи цепей равны друг другу.

Из табл. 2 видно, что при неудачной раскладке фазных кабелей относительная величина токов нулевой последовательности оказалась в несколько раз больше, чем для одноцепной кабельной линии, достигая в условиях примера $3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}} = 0,183$.

Как и ранее, негативные последствия от постоянного наличия в экранах токов нулевой последовательности теоретически могут заключаться в коррозии металла, а также в ложной работе релейной защиты.

В условиях рис. 4а токи $3I_{\Sigma 0}$ замыкаются в контуре, образованном экранами 1-й и 2-й цепей, тогда как стекания тока с контура заземления в грунт практически нет и поэтому не стоит опасаться коррозии металлоконструкций. Также на первый взгляд может показаться, что в условиях рис. 4 не будет и проблем с работой защит, если, как и для одноцепных линий, обеспечить подключение всех измерительных ТТ по схеме вида рис. 1, исключив тем самым влияние $3I_{\Sigma 0}$.

К сожалению, несмотря на правильное подключение ТТ, в схемах рис. 4б, где две кабельные линии объединены на параллельную работу, действие защит может быть ошибочным, и это связано не с токами в экранах, а уже с токами нулевой последовательности в жилах. Дело в том, что токи $3I_{\Sigma 0}$ нулевой последовательности, проходящие в контуре, образованном экранами 1-й и 2-й цепей и достигающие здесь 0,183 от тока жилы, наводят ЭДС нулевой последовательности в контуре, образованном жилами 1-й и 2-й цепи. В случае, когда две кабельные линии объединяются на параллельную работу замыканием секционных выключателей по концам кабельной линии (рис. 4б), под действием данной наведенной ЭДС по жилам кабелей и через выключатели начинают проходить токи $3I_{\Sigma 0}$.

В качестве примера на рис. 5 приведены расчетные осциллограммы токов до и после момента t_k замыкания секционных выключателей. Исходные данные – как для табл. 2, где принята схема рис. 3а, расстояние $s_{\text{АВ}} = 0,3$ м ($3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}} = 0,183$).

Из рис. 5 видно, что в момент замыкания секционных выключателей в жилах обеих цепей под действием наведенной ЭДС нулевой последовательности возникает переменный ток нулевой последовательности $3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}} = 75 / 500 = 0,15$. Ток $3I_{\Sigma 0}$ имеет величину в несколько десятков ампер и противоположную направленность в 1-й и 2-й кабельных линиях.

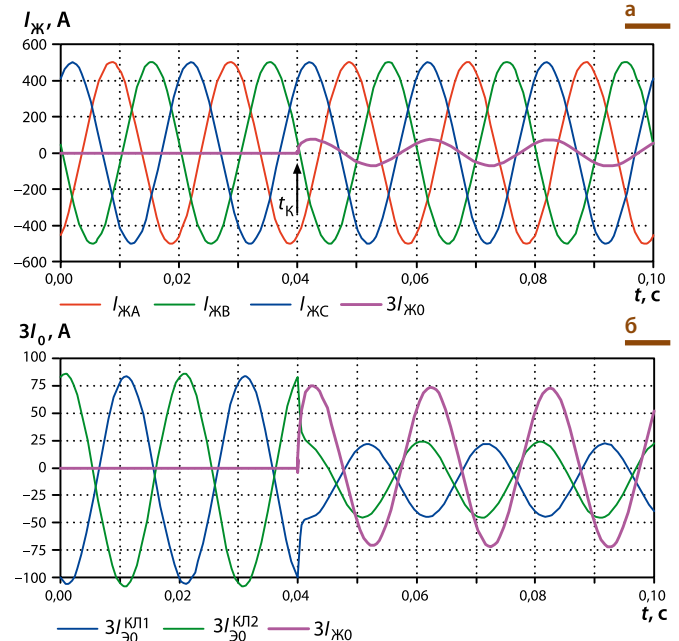
Подобные величины и направления токов нулевой последовательности $3I_{\Sigma 0}$ возникают и при однофазных замыканиях на землю на одной из кабельных линий в сети 6–35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью. Следовательно, возникновение в жилах кабеля токов $3I_{\Sigma 0}$ в нормальном режиме работы сети может ошибочно трактоваться релейной защитой как появление однофазного замыкания на землю с вытекающими последствиями.

Важно еще раз обратить внимание на то, что подключение трансформаторов тока по схеме рис. 1 не изменит ситуацию, поскольку срабатывание защит вызвано не токами в экранах $3I_{\Sigma 0}$, от которых схема рис. 1 отстроена, а токами в жилах $3I_{\Sigma 0}$.

Может показаться, что одностороннее заземление экранов 1-й и 2-й цепей, как и в случае одноцепной кабельной линии, позволит полностью исключить токи $3I_{\Sigma 0}$, а значит, и вызванные ими токи $3I_{\Sigma 0}$. К сожалению, это не так, и если в условиях примера применить одностороннее заземление экранов, то токи $3I_{\Sigma 0}$ в жилах только возрастут с $3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}} = 0,15$ до уровня $3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}} = 0,2$.

Осциллограммы для двухцепной линии:
а – токи в жилах; б – токи нулевой последовательности

Рис. 5 •



Объяснение подобного роста, по всей видимости, заключается в том, что рассмотренная проблема токов $3I_{\Sigma 0}$ характерна вовсе не только для кабелей, а для двухцепной линии любой конструкции, лишь бы она имела пофазное исполнение. При неудачном расположении фаз магнитные поля их рабочих токов совместным действием наводят ток нулевой последовательности $3I_{\Sigma 0}$ в контуре 1-й и 2-й цепей.

В частном случае, когда фазы выполнены кабелями, у которых есть хорошо проводящий медный экран и этот экран имеет двустороннее заземление, магнитные поля фаз несколько уменьшатся, поскольку собственное поле жилы будет частично компенсироваться встречно-направленным полем от тока в экране. Сниженные поля фаз приводят к некоторому уменьшению наводок на контур, образованный из 1-й и 2-й цепей, а значит, к уменьшению тока $3I_{\Sigma 0}$ (в условиях примера наличие рядом с жилами заземленного экрана снизило ток с $3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}} = 0,2$ до $3I_{\Sigma 0} / I_{\text{ЖВ}} = 0,15$ о.е.).

Единственным эффективным решением проблемы $3I_{\Sigma 0}$ двухцепных линий является, скорее всего, продуманная раскладка фазных кабелей. На практике следует применять схемы рис. 3б, рис. 3в, рис. 3г, но самым благоприятным будет треугольное расположение фаз по схеме рис. 3г.

Оптимальная раскладка фазных кабелей 6–35 кВ для линий с числом цепей более 2-х является важной, но пока не решенной задачей. Главная рекомендация, которую можно дать в этом случае, – прокладывать фазные кабели исключительно сомкнутым треугольником, не допуская рядного расположения. Также можно просто отказаться от использования однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и по возможности применять вместо них трехфазные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Прокладка однофазных кабелей сомкнутым треугольником имеет ряд важных преимуществ перед прокладкой в ряд, и одно из них – минимизация возможных проблем с токами нулевой последовательности в экранах и жилах.
2. Если прокладку однофазных кабелей предполагается выполнить в ряд, то следует уделять особое внимание взаимному расположению кабелей, склоняясь к такому варианту, который обеспечит минимальные токи нулевой последовательности в экранах и жилах.
3. Там, где это возможно, вместо однофазных кабелей целесообразно использовать трехфазные кабели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 152 с. ■