

ТРЕХФАЗНЫЕ И ОДНОФАЗНЫЕ КАБЕЛИ 6-35 кВ: особенности применения

Дмитриев М.В., к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета
тел. +7-921-747-90-29, почта mvdm@ya.ru, сайт www.mvdm.ru

Введение

В сетях 110-500 кВ все прокладываемые в последние годы силовые кабели – однофазные с изоляцией из сшитого полиэтилена. Для классов 6-35 кВ, напротив, номенклатура кабельной продукции достаточно широкая, и поэтому обосновать выбор не всегда просто. Выскажем ряд соображений на этот счет.

В настоящее время сети 6-35 кВ можно строить с применением трех основных типов кабелей:

- однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ);
- трехфазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена;
- трехфазные кабели с бумажно-масляной изоляцией (БМИ);

Как правило, кабели БМИ дешевле СПЭ. Также, в отличие от СПЭ, их можно обслуживать уже имеющимися в сетях лабораториями, использующими постоянное испытательное напряжение и "прожиговые" методы поиска повреждений. Вместе с тем, по ряду причин, техническая политика крупных сетевых компаний направлена на использование исключительно СПЭ. Рассмотрим особенности таких кабелей в зависимости от их конструкции, которая бывает или однофазной, или трехфазной.

Преимущества однофазных кабелей 6-35 кВ СПЭ над трехфазными известны:

- отсутствие ограничений на сечение жилы (у трехфазного оно не более $3 \times 240 \text{ мм}^2$ и только по специальному заказу – до $3 \times 400 \text{ мм}^2$);
- большая строительная длина и лучшая гибкость;
- простая конструкция, а значит высокая надежность;
- удобные монтажные и ремонтные работы.

Недостатки однофазных кабелей 6-35 кВ СПЭ упоминаются заметно реже:

- необходимость выбора сечения экрана на большие токи короткого замыкания;
- необходимость отказа от простого и удобного двустороннего заземления экранов из-за наличия в них паразитных токов и потерь активной мощности (переход к одностороннему заземлению экранов или транспозиции экранов [1]);
- сложность выявления поврежденного фидера в сетях 6-35 кВ с традиционной для нашей страны изолированной (компенсированной) нейтралью;
- эффективность использования не для всех сетей 6-35 кВ, а главным образом, для сетей с резистивным заземлением нейтрали, где однофазное замыкание на землю быстро и селективно отключается действием защит.

Поясним указанные недостатки однофазных кабелей.

1. Однофазные кабели

Особенностью однофазного кабеля, имеющего заземленный медный экран, является отсутствие за его пределами электрического поля, но наличие магнитного. Магнитные поля трех однофазных кабелей, входящих в трехфазную группу, в нормальном режиме дают наводки на контуры, образованные тремя экранами.

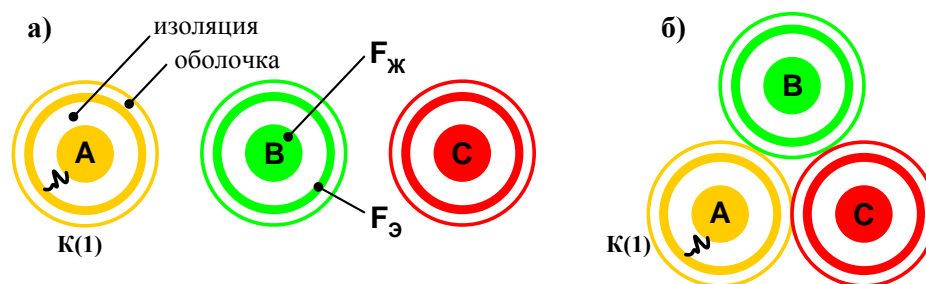


Рис.1. Трехфазная группа однофазных кабелей 6-500 кВ:
(а) прокладка в ряд; (б) прокладка сомкнутым треугольником.

При двустороннем заземлении экранов эти контуры получаются замкнутыми, и наведенное напряжение вызывает появление в экранах кабеля продольных токов промышленной частоты, вызывающих нагрев экранов одновременно по всей длине линии, повышающих температуру изоляции и снижающих допустимый ток кабеля. Для минимизации токов и потерь в экранах согласно [1] следует:

- прокладывать кабели сомкнутым треугольником (снижается площадь контуров, и поэтому уменьшается наводка), рис.1,б;
- применять кабели с малым сечением экрана $F_э$ (растет сопротивление контуров, что обуславливает снижение их тока и потерь).

Как видно, выбор сечения экрана является принципиальным в вопросах потерь активной мощности в кабеле в нормальном режиме, а значит – напрямую определяет эффективность однофазных кабелей в электрических сетях. Использовать кабели с малым $F_э$, к сожалению, получается редко, и виной тому необходимость избежать перегрева экрана током короткого замыкания, который в случае повреждения главной изоляции кабеля попадает в экран и проходит по нему до мест заземления (рис.2). Таким образом, выбор сечения $F_э$ является непростой задачей, поскольку:

- в нормальном режиме работы желательно иметь малое $F_э$;
- при коротких замыканиях желательно иметь большое $F_э$.

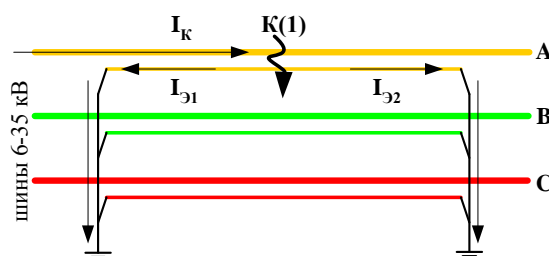


Рис.2. Токи в заземленных по концам экранах однофазных кабелей при К(1).

Однофазное повреждение К(1) является наиболее распространенным в сетях, и поэтому основное внимание уделим именно ему. При однофазном повреждении изоляции ток из жилы аварийной фазы попадает в ее экран и далее по экрану в его заземляющие устройства. Если релейная защита оперативно (не более нескольких секунд) отключит кабель от сети, то, согласно опыту эксплуатации, практически вне зависимости от конкретной величины тока К(1), повреждение не успевает оказать какого-либо значимого теплового воздействия на две соседние фазы (см. рис.1). Это

наблюдение относится не только к случаям прокладки трех однофазных кабелей на удалении друг от друга (рис.1,а), но даже и к прокладке фаз вплотную сомкнутым треугольником (рис.1,б).

Одно из существенных преимуществ однофазных кабелей заключается в том, что их монтаж и ремонт можно осуществлять пофазно. Также преимуществом было бы, если бы и повреждение одной из фаз никогда не вредило бы двум другим, рядом расположенным. Следовательно, можно утверждать, что эффективно использовать однофазные кабели удастся в основном в тех сетях, где однофазные повреждения К(1) автоматически отключаются с минимальными выдержками времени и по этой причине не дают возможности для развития аварии на соседние фазы и цепи.

В сетях 6-35 кВ вопросы быстрого отключения К(1) принципиально зависят от используемого способа заземления нейтрали. Некоторые из них приведены на рис.3. Рассмотрим повреждение изоляции однофазного кабеля в сети 6-35 кВ:

- с изолированной (компенсированной) нейтралью;
- с нейтралью, заземленной через резистор.

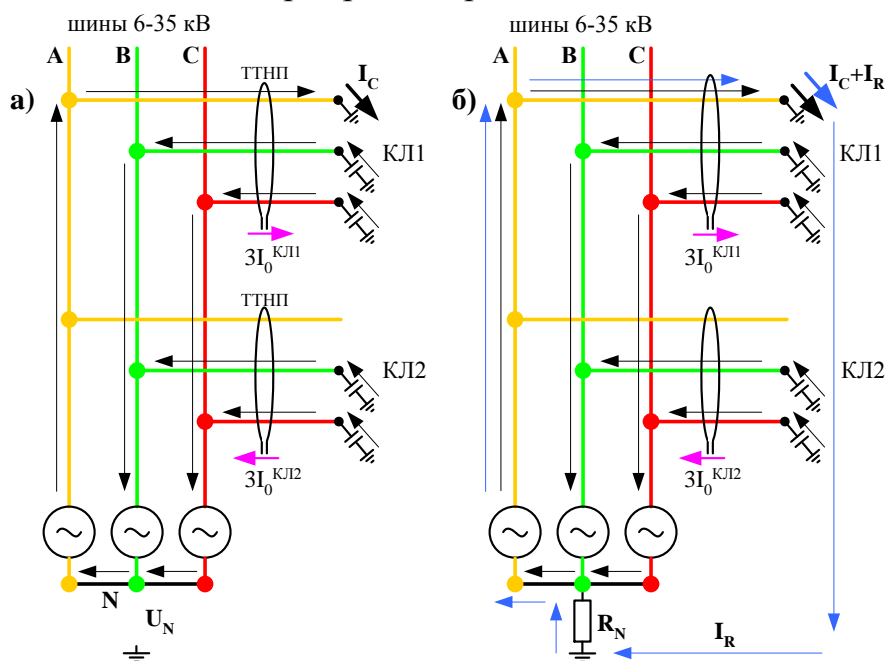


Рис.3. Однофазное замыкание на землю в сети 6-35 кВ:
(а) изолированная нейтраль; (б) заземленная через резистор.

Нейтраль изолирована

На рис.3,а показаны сборные шины сети 6-35 кВ с изолированной нейтралью и, в качестве примера, две отходящие кабельные линии КЛ1 и КЛ2. При однофазном замыкании на землю фазы "А" на КЛ1 ток однофазного повреждения I_C , попав из жилы в экран (в землю), не может замыкаться через нейтраль сети (поскольку она изолирована) и вынужден проходить через емкости фаз "В" и "С" линий КЛ1 и КЛ2. Поэтому I_C носит емкостный характер, его величина определяется номинальным напряжением сети $U_{НОМ}$ и ее суммарной емкостью $C_{СУМ}$ на землю:

$$I_C = \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot C_{СУМ} \cdot$$

Емкостные токи (единицы-десятки Ампер) накладываются на рабочие токи нагрузки кабельных линий (десятки-сотни Ампер). Также важно, что и те, и другие токи есть и в аварийной КЛ1, и в неповрежденной КЛ2 (КЛ3, КЛ4, КЛ5....). Как следствие – защиты, построенные на измерении фазных токов кабелей, не способны селективно определить, где именно в сети произошло замыкание на землю.

Процесс автоматизации поиска повреждений ряд фирм предлагает строить не на фазных токах, а на токах нулевой последовательности, для измерения которых каждую КЛ следует снабдить трансформатором тока нулевой последовательности (ТТНП). Такой трансформатор дает представление о сумме векторов фазных токов $3I_0 = I_A + I_B + I_C$. Согласно рис.3,а токи $3I_0^{КЛ1}$ и $3I_0^{КЛ2}$ имеют противоположные знаки, и несложно показать: в неповрежденных линиях (КЛ2, КЛ3, КЛ4....) ток нулевой последовательности всегда направлен к шинам, и только в аварийной – от шин.

Сравнение знаков токов нулевой последовательности действительно позволяет выявить участок сети с К(1), однако при одном условии – повреждение не является дуговым, а носит устойчивый характер. Поскольку многие повреждения происходят через дугу, то токи нулевой последовательности перестают быть синусоидальными токами промышленной частоты, и сравнение их знаков затруднено. По этой причине в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью, несмотря на значительные усилия многих ученых, автоматизация поиска К(1) пока еще не достигнута.

При замыкании на землю напряжение аварийной фазы снижается практически до нуля, а напряжение на двух других – повышается с нормальных фазных до линейных. Увеличенное напряжение фаз "В" и "С" происходит сразу по всей сети и может вызвать пробой изоляции в каком-то ослабленном месте на каком-то другом участке сети (скажем, в старой кабельной линии с БМИ изоляцией). Пример такого развития аварии показан на рис.4,а, где спустя некоторое время к К(1) фазы "А" КЛ1 добавилось К(1) фазы "В" КЛ2, и повреждение из простого однофазного превратилось в два однофазных, т.е. стало двойным замыканием на землю К(1,1).

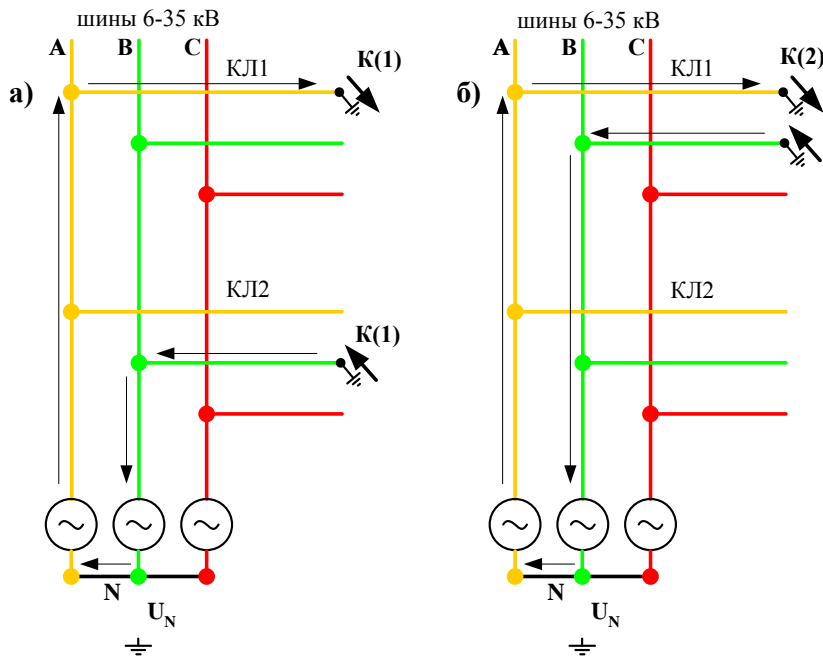


Рис.4. Развитие однофазного замыкания на землю в сети 6-35 кВ с изолированной нейтралью: (а) повреждение на разных КЛ; (б) повреждение на одной КЛ.

Возможно, что сценарий развития аварии будет таким как на рис.4,б. Он более вероятен для тех сетей 6-35 кВ, где однофазные кабели прокладываются сомкнутым треугольником. При возникновении К(1) на фазе "А" КЛ1 в силу близости фаз "В" и "С" за счет термического воздействия дуги перегревается изоляция, например, фазы "В", после чего повреждение из простого однофазного превращается в междуфазное короткое замыкание. Однако, даже если фазы проложены треугольником, всегда есть места, где они расходятся – например, это участки вблизи от концевых или же соединительных муфт. Поэтому вариант рис.4,а никак нельзя исключать.

Видно, что в сетях 6-35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью сценарии развития аварии могут быть разными, однако принцип выбора сечения F_3 неизменен: экран должен выдерживать ток К(1,1) с учетом времени его протекания.

Нейтраль заземлена через резистор

В России сети среднего напряжения 6-35 кВ традиционно выполнялись с изолированной (компенсированной) нейтралью. Такая нейтраль обеспечивала малые токи при К(1) и позволяла длительно не отключать потребителей, присоединенных на линейные напряжения, также существовала вероятность самоустранения аварии. Указанные свойства сети были весьма полезны в условиях слабого развития электрических сетей, когда потребители зачастую имели всего лишь один источник питания – причем вовсе не кабельную линию, а воздушную, где годовое число повреждений значительно больше, чем в кабельной.

В настоящее время сети 6-35 кВ развиты, особенно в крупных городах, где все потребители получают питание от двухцепных кабельных линий. Поэтому даже при аварии на одной из двух цепей ее можно сразу отключать, а потребитель останется запитан по второй. Продолжать работу кабельной сети с замыканием на землю К(1) не только не имеет смысла (повреждение само не устранится), но даже вредно (напряжение на двух неповрежденных фазах сети повышается сверх нормального фазного и может вызвать развитие аварии в местах с ослабленной изоляцией).

Для повышения селективности работы защит от однофазных повреждений в последние годы активно обсуждается возможность перевода сетей 6-35 кВ на иной способ заземления нейтрали – на резистивный. Особенно актуальным этот вопрос является для кабельных сетей, построенных однофазными кабелями, где быстрое и безошибочное отключение К(1) позволит исключить распространение аварии, а значит – снизить величину ущерба, упростить и ускорить ремонтные работы.

Появление резистора в нейтрали дает увеличение тока ТТНП аварийной КЛ на столько, что у защиты не остается сомнений в том, какая именно из КЛ повреждена. Иными словами, в сетях с резистором защита строится не на сравнении знаков токов ТТНП, а уже на величинах этих токов.

На рис.3,б показано, что наличие резистора приводит к появлению в месте замыкания на землю в дополнение к "традиционной" емкостной составляющей I_C еще одной – активной I_R , замыкающейся через резистор в нейтрали. Величина этого тока определяется фазной эдс и сопротивлением резистора R :

$$I_R = E_A / R = (U_{НОМ} / \sqrt{3}) / R.$$

Особенностью активной составляющей является то, что она проходит лишь в аварийной линии, а в неповрежденных отсутствует. Таким образом, удачный выбор R обеспечит заметное различие величин токов нулевой последовательности $|3i_0^{KЛ1}| \gg |3i_0^{KЛ2}|$ и уверенное срабатывание защит. Накопленный опыт говорит о том, что достаточно применять резисторы R , обеспечивающие $I_R = 500 \div 1000$ А.

В сетях 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали F_3 однофазных кабелей надо выбирать на ток $\sqrt{I_C^2 + I_R^2}$, проходящий на время работы защиты, и для этих целей достаточно минимального F_3 (16, 25, 35 мм²).

Рациональное применение однофазных кабелей возможно только в тех сетях 6-35 кВ, где налажено автоматическое селективное отключение любых однофазных повреждений, т.е. в сетях с резистором в нейтрали. Отказ от резистора влечет:

- риски развития однофазных повреждений в более масштабные аварии;
- необходимость применения кабелей с большим F_3 , способным выдерживать токи многофазных повреждений;
- необходимость борьбы с токами и потерями в экранах в нормальном режиме [1], так как они характерны именно для кабелей с большим F_3 .

2. Трехфазные кабели

Существуют разные конструкции трехфазных кабелей, но в настоящее время чаще встречаются кабели с пофазно экранированными жилами (рис.5), также у них может быть общий экран или броня сечением F_B .

Компактная конструкция трехфазных кабелей такова, что при возникновении однофазного повреждения К(1) оно быстро развивается на другие фазы в этом же месте кабеля, и авария превращается из К(1) в К(2), затем в К(3). Следовательно, кабель будет отключен от сети обычной максимальной токовой защитой.

Как видно, в сети 6-35 кВ, построенной трехфазными кабелями, не существует проблемы поиска места замыкания на землю, которая была для однофазных кабелей и вызвала необходимость перехода от изолированной нейтрали к резистору. Сеть с трехфазными кабелями может работать при любом способе заземления нейтрали.

Некоторые вопросы применения трехфазных кабелей, тем не менее, зависят от нейтрали, и главный из них – это выбор сечения экрана F_3 .

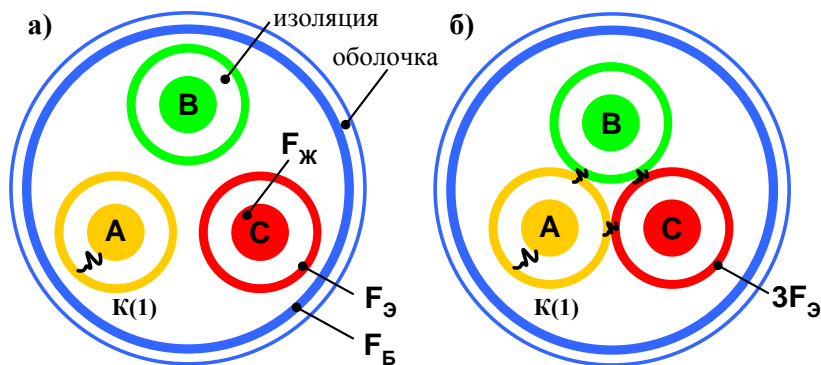


Рис.5. Трехфазный кабель 6-35 кВ с пофазно экранированными жилами:
(а) экраны не касаются друг друга; (б) касаются.

Нейтраль изолирована

Если первое повреждение К(1) возникло в трехфазном кабеле, то скорее всего развитие аварии будет в том же месте сети (рис.4,б), и линия будет автоматически отключена. Положим, теперь, что повреждение К(1) возникло не в рассматриваемом трехфазном кабеле КЛ1, а где-то в другом месте сети (например, на фазе "В" КЛ2, выполненной однофазными кабелями, рис.4,а), при этом напряжения 50 Гц фаз "А" и "С" относительно земли во всей сети повысятся от нормальных фазных значений до линейных, и в каком-то месте с дефектной изоляцией может возникнуть второе К(1) – пусть это будет фаза "А" трехфазного кабеля КЛ1. Такая последовательность развития событий заставляет выбирать сечение каждого экрана трехфазного кабеля на следующие токи:

- для кабеля рис.5,а на весь ток К(1,1);
- для кабеля рис.5,б на 1/3 тока К(1,1), поскольку экраны касаются друг друга и работают параллельно.

Нейтраль заземлена через резистор

В сети с резистивным заземлением нейтрали при возникновении в трехфазном кабеле повреждения К(1), вероятно, что оно будет отключено быстрее, чем перейдет в К(2) или К(3). Поэтому здесь сечение $F_{\text{э}}$ каждого из трех экранов кабеля вида рис.5,а следует выбирать на ток $\sqrt{I_C^2 + I_R^2}$ с учетом времени его прохождения. Если же экраны касаются друг друга (рис.5,б), то каждый из них достаточно рассчитать только на 1/3 от тока $\sqrt{I_C^2 + I_R^2}$.

3. Выбор сечения экранов и схемы их заземленияВыбор сечения экранов

Сечение медного экрана $F_{\text{э}}$ (мм²), ток короткого замыкания I_K (кА), время отключения t_K (сек) должны удовлетворять известному неравенству

$$I_K \leq K_{\text{э}} \frac{F_{\text{э}}}{\sqrt{t_K}},$$

где $K_{\text{э}}$ – коэффициент, который по [2] обычно принимают равным $0.174 \text{ кА}\sqrt{\text{с}}/\text{мм}^2$, I_K – расчетный ток, определяемый по табл.1, t_K – время, которое согласовывается со специалистами по релейной защите (недопустимо принимать его равным 1 сек).

При составлении табл.1, как и в [1], полагалось, что в сети с изолированной (компенсированной) нейтралью ток двойного короткого замыкания К(1,1) достигает $\sqrt{3}/2 = 0.87$ тока трехфазного К(3) на шинах распределительного устройства (берется тот конец линии, где ток К(3) наибольший). Кроме того, в табл.1 использованы емкостный ток сети I_C , а также активный ток резистора I_R .

Рассмотрим влияние схемы заземления экранов кабелей на выбор сечения $F_{\text{э}}$. Для этого обратимся к рис.2. Величины токов в экранах $I_{\text{э1}}$ и $I_{\text{э2}}$ зависят от места

повреждения линии (в ее начале, в середине или в конце) и от схемы заземления экранов. В случаях, когда экраны заземлены на каждом из концов кабельной линии (это бывает при простом двустороннем заземлении экранов или при их транспозиции), в экране аварийной фазы влево и вправо от места повреждения проходят токи $I_{\varepsilon 1}$ и $I_{\varepsilon 2}$ (вместе они составляют ток короткого замыкания I_K , рис.2). Расчеты показывают, что даже если авария произошла ровно посередине кабельной линии, то $I_{\varepsilon 1} > I_{\varepsilon 2}$, поскольку току всегда выгоднее проходить от места повреждения в сторону шин, где собраны экраны всех кабельных линий сети. Если же авария происходит не в середине линии, а вблизи от ее начала (вблизи от шин), то тогда $I_{\varepsilon 1} \gg I_{\varepsilon 2}$ и поэтому $I_{\varepsilon 1} \approx I_K$. Следовательно, всегда сечение F_{ε} следует выбирать на весь ток короткого замыкания I_K , а не на какую-то его часть. Тем более это верно, если экраны имеют не двустороннее, а одностороннее заземление.

Таблица 1. Расчетный ток I_K для выбора сечения F_{ε} каждого из трех экранов кабельной линии 6-35 кВ с изоляцией СПЭ.

Конструкция кабеля	Нейтраль сети 6-35 кВ	
	Изолированная (компенсированная)	Резистивная с быстрым отключением К(1)
	Расчетный ток I_K для выбора F_{ε}	
Однофазная, рис.1	$I_{K(1,1)} = 0.87 \cdot I_{K(3)}$	$I_{K(1)} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$
Трехфазная, рис.5,а	$I_{K(1,1)} = 0.87 \cdot I_{K(3)}$	$I_{K(1)} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$
Трехфазная с касающимися экранами, рис.5,б	$I_{K(1,1)} = 0.29 \cdot I_{K(3)}$	$I_{K(1)} = 0.33 \cdot \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$

Кабельным заводам сложно производить трехфазные кабели 6-35 кВ вида рис.5,а, медные экраны которых выдерживали бы ток К(1,1) сети с изолированной (компенсированной) нейтралью. Несоответствие фактически выпускаемых сечений реальным токам короткого замыкания сети К(1,1) является известной проблемой. Для ее решения следует перейти к использованию кабелей вида рис.5,б, имеющих повышенную стойкость токам короткого замыкания за счет параллельной работы индивидуальных экранов трех фаз.

Выбор схемы заземления экранов

Для однофазных кабелей расчеты проводятся по методике [1] и позволяют выбрать одну из трех типовых схем заземления: двустороннее заземление экранов, одностороннее заземление экранов, транспозиция экранов. В случае резистивного заземления нейтрали согласно табл.1 достаточно иметь малое сечение экранов F_{ε} , что в сочетании с прокладкой трех фаз сомкнутым треугольником дает возможность иметь простое заземление экранов с двух сторон и не беспокоиться о потерях в экранах в силу их незначительности (см. табл.2).

Для *трехфазных* кабелей экраны всегда должны иметь простое заземление с двух сторон. Схемы одностороннего заземления экранов или транспозиции экранов для трехфазных кабелей не требуются. Для трехфазных кабелей рис.5,б эти схемы не нужны потому, что попросту отсутствуют экранные контура, на которые могло бы наводиться напряжение и в которых могли бы проходить токи. Что же касается кабелей рис.5,а, то здесь при двустороннем заземлении в экранах все же имеются токи и потери, однако они не опасны, поскольку фазы близко расположены (почти сомкнутый треугольник) и сечение экранов относительно мало (особенно, если сеть имеет резистивное заземление нейтрали).

Таблица 2. Выбор схемы заземления экранов кабелей 6-35 кВ с изоляцией СПЭ и величина потерь активной мощности в экранах в нормальном режиме работы.

Конструкция кабеля	Нейтраль сети 6-35 кВ	
	Изолированная (компенсированная)	Резистивная с быстрым отключением К(1)
	Оптимальная схема заземления экранов	
Однофазная, рис.1	Выбор по методике [1]	Двустороннее (потери есть, но малы, если фазы лежат треугольником)
Трехфазная, рис.5,а	Двустороннее (потери есть)	Двустороннее (потери есть, но малы)
Трехфазная с касающимися экранами, рис.5,б	Двустороннее (потерь нет)	Двустороннее (потерь нет)

Заключение

В работе рассмотрены основные конструкции кабелей 6-35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Анализ процессов в сетях с такими кабелями позволил дать методику выбора сечений экранов (табл.1) и схем их заземления (табл.2).

Было показано, что в сетях 6-35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью желательнее применение не однофазных, а трехфазных кабелей (особенно если они имеют "соприкасающиеся" экраны). Что же касается однофазных кабелей, то они в большей степени созданы для сетей с резистивным заземлением нейтрали (или глухим), где защиты селективно отключают первое же замыкание на землю.

Литература

1. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –152 с.
2. Дмитриев М.В. Экраны однофазных кабелей 6-500 кВ. Выбор сечения с учетом аperiodической составляющей тока КЗ // Новости Электротехники, №4(88), 2014, стр.34-37.