

В настоящее время в сетях классов напряжения от 6 до 500 кВ активно применяются однофазные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, имеющие медный экран. Выбор сечения экрана – одна из важных задач, которую приходится решать при проектировании кабельных линий.

Производители кабелей стремятся облегчить потребителям выбор сечений экрана и в своих каталогах приводят зависимость этого параметра от величины тока КЗ и длительности его отключения, причем у разных фирм расчетные данные не совпадают. Михаил Викторович Дмитриев предлагает уточнить эти данные в части учета аperiodической составляющей тока короткого замыкания.

ЭКРАНЫ ОДНОФАЗНЫХ КАБЕЛЕЙ 6–500 кВ

Выбор сечения с учетом аperiodической составляющей тока

Действующий ГОСТ Р МЭК 60949-2009 «Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева» [1], к сожалению, излишне детален и по этой причине практически не применяется.

В сложившихся условиях оправданным оказывается применение простых методов теплового расчета кабелей, точность которых, хотя и не очень велика, но вполне соответствует неопределенности исходных данных. Поэтому большинство проектировщиков не используют стандарт МЭК, а ориентируются на каталоги кабельных заводов, где даны готовые зависимости сечения экрана кабеля от величины тока КЗ и длительности его отключения.

КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В КАБЕЛЕ

Конструкция однофазного кабеля 6–500 кВ включает жилу, изоляцию, медный экран, полиэтиленовую оболочку. При повреждении изоляции однофазного кабеля ток КЗ I_K от сети проходит по жиле кабеля до места повреждения, далее через поврежденную изоляцию попадает в экран, по которому идет в его заземляющие устройства, расположенные в одном (рис. 1) или в обоих концах кабеля.

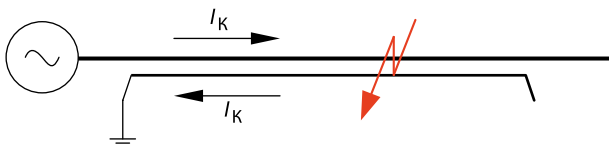
Сечение жилы кабеля $F_{ж}$ и сечение экрана кабеля $F_{э}$ должны соответствовать величине тока КЗ I_K с учетом длительности его протекания t_K , иначе возможен разогрев изоляции кабеля, примыкающей к жиле и экрану, сверх допустимых для нее температур сразу на значительном по протяженности участке линии (на рис. 1 – от начала кабеля до места КЗ).

В п. 5.1.10 стандарта ФСК [2] даны предельные температуры в режиме КЗ кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена: для жилы 250 °С, для экрана 350 °С. Непонятно, почему для жилы и экрана приводятся разные допустимые температуры при КЗ. По всей видимости, это связано с тем, что охлаждение экрана и примыкающей к нему части изоляции происходит быстрее в сравнении с охлаждением жилы, которая находится в средней части кабеля и отделена от окружающего кабель пространства не только тепловым сопротивлением оболочки, но и тепловым сопротивлением главной изоляции.

Согласно п. 5.1.10 стандарта [2] проверку соответствия сечения жилы и экрана току КЗ следует проводить по формуле:

$$I_K = \frac{I_{K1}}{\sqrt{t_K}}, \quad (1)$$

• Рис. 1. Короткое замыкание «жила–экран» трехфазной группы однофазных кабелей. Для примера экраны заземлены с одной стороны



Михаил Дмитриев,
к.т.н., заместитель генерального
директора по научной работе
ПКБ «РосЭнергоМонтаж»,
г. Санкт-Петербург

где I_{K1} – каталожное значение тока КЗ, допустимое для заданного сечения жилы (или экрана) в течение времени $t_K = 1$ с.

ВЫБОР ЖИЛЫ И ЭКРАНА ПО ТОКУ КЗ

Производители кабелей в каталогах, как правило, дают пропорциональную связь односекундного тока I_{K1} и сечения жилы (или экрана). Такая связь $I_{K1} = K \cdot F$ происходит через коэффициент пропорциональности K . В результате формула (1) преобразуется в следующий, более удобный для использования вид:

$$I_K = K_{ж} \frac{F_{ж}}{\sqrt{t_K}}, \quad I_K = K_{э} \frac{F_{э}}{\sqrt{t_K}}. \quad (2)$$

Коэффициенты $K_{ж}$ и $K_{э}$ имеют размерность $\text{кА}\sqrt{\text{с}}/\text{мм}^2$, но далее для удобства будем указывать размерность $\text{кА}/\text{мм}^2$.

Согласно [3] при выборе сечения жилы (или экрана) в формуле (2) в качестве тока I_K необходимо использовать:

- в сети 6–35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью – ток двойного КЗ, равный 0,87 от тока трехфазного КЗ;
- в сети 6–35 кВ с резистивно заземленной нейтралью – ток однофазного замыкания;
- в сети 110–500 кВ с эффективно (глухо) заземленной нейтралью – ток однофазного КЗ.

У всех производителей кабелей при выборе сечения жилы в каталогах дается один и тот же коэффициент $K_{ж} = 0,143 \text{ кА}/\text{мм}^2$ (медная жила). Что касается выбора сечения медного экрана, то здесь у фирм нет единого мнения, и коэффициенты $K_{э}$ в разных каталогах различаются, находясь в диапазоне от $K_{э} = 0,153$ до $K_{э} = 0,203 \text{ кА}/\text{мм}^2$ (минимальное и максимальное значение отличаются примерно на 30%). Это означает, что и сечения экранов кабелей, выбранные по (2), будут отличаться у продукции разных компаний на величину до 30%.

Конструкция однофазных кабелей 6–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, а также применяемые технологии и материалы, у производителей в известной мере идентичны. Поэтому не может не вызвать удивления различие до 30% приводимых в каталогах значений $K_{э}$ (при том что значения $K_{ж}$ полностью совпадают). Чтобы разобраться, попытаемся получить известную формулу (2) аналитически.

ОБОСНОВАНИЕ ФОРМУЛЫ (2)

Выделение тепла

При КЗ в экране выделяется тепло $Q_{э} = I_K^2 R_{э} t_K$, где I_K и t_K – величина и длительность протекания тока КЗ;

$R_{э} = \frac{\rho_{э}}{F_{э}} \cdot L_K$ – активное сопротивление экрана сечением

$F_{э}$ и длиной L_K ; $\rho_{э} = \rho_{0э}[1 + \alpha_{э}(T - T_{20})]$ – удельное активное сопротивление материала экрана; $\rho_{0э}$ – удельное активное сопротивление экрана при температуре $T_{20} = 20$ °С; $\alpha_{э}$ – температурный коэффициент сопротивления экрана; $T = 0,5(T_H + T_K)$ – средняя температура экрана в процессе его нагрева от начальной температуры T_H до конечной T_K .

Поглощение тепла

Положим, что всё выделившееся в экране кабеля тепло ушло только на нагрев самого экрана, а изоляция и оболочка остались при исходных температурах (такой нагрев экрана называется адиабатическим): $Q_{\text{э}} = C_{\text{э}} \cdot \Delta T_{\text{э}}$, где $\Delta T_{\text{э}} = T_{\text{к}} - T_{\text{н}}$ – нагрев экрана от начальной температуры $T_{\text{н}}$ до конечной $T_{\text{к}}$; $C_{\text{э}} = c_{\text{э}} \cdot m_{\text{э}}$ – теплоемкость экрана, где $c_{\text{э}}$ – удельная теплоемкость материала экрана; $m_{\text{э}} = \gamma_{\text{э}} \cdot V_{\text{э}}$ – масса экрана; где $\gamma_{\text{э}}$ – удельная плотность материала экрана; $V_{\text{э}} = F_{\text{э}} L_{\text{к}}$ – объем экрана.

Тепловой баланс

Приравняв выделение и поглощение тепла в экране, после преобразований получим известную формулу (2) и выражение для входящего в нее коэффициента:

$$K_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{э}} \cdot c_{\text{э}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{н}})}{\rho_{\text{э}}}}, \quad (3)$$

где коэффициент пропорциональности $K_{\text{э}}$ зависит от материала экрана ($\rho_{\text{э}}$, $c_{\text{э}}$, $\gamma_{\text{э}}$) и от свойств изоляции ($T_{\text{н}}$, $T_{\text{к}}$).

Пример расчета для экрана

Проведем расчеты по (3) с использованием следующих обычных справочных данных для медного экрана: $c_{\text{э}} = 0,0039$ о.е., $\rho_{0\text{э}} = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $c_{\text{э}} = 380$ Дж/(кг·К), $\gamma_{\text{э}} = 8890$ кг/м³.

В [4] было показано, что если в нормальном режиме для изоляции из сшитого полиэтилена допустима температура жилы 90 °С, то у экрана при этом температура может составлять 75–85 °С, а ее конкретное значение зависит от способа прокладки кабеля (в грунте, в трубе), от теплового сопротивления грунта, от схемы заземления экранов. Далее в качестве начальной температуры экрана, предшествующей нагреву экрана током КЗ, примем усредненное значение $T_{\text{н}} = 80$ °С.

В качестве конечной температуры экрана согласно стандарту [2] примем температуру $T_{\text{к}} = 350$ °С. При этом средняя температура экрана, при которой надо вычислить его удельное активное сопротивление $\rho_{\text{э}}$, будет $T = 0,5(T_{\text{н}} + T_{\text{к}}) = 215$ °С.

Расчеты по (3) дают коэффициент $K_{\text{э}} = 1,74 \cdot 10^8$ А/м², или $K_{\text{э}} = 0,174$ кА/мм², с помощью которого в табл. 1 для различных типовых сечений экрана $F_{\text{э}}$ по формуле (2) получены допустимые токи КЗ $I_{\text{к}}$ при времени $t_{\text{к}} = 1$ с.

Пример расчета для жилы

Если выражение (3) было получено для экрана, то точно такое же выражение может быть получено и для жилы кабеля:

$$K_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{ж}} \cdot c_{\text{ж}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{н}})}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности $K_{\text{ж}}$ зависит от материала жилы ($\rho_{\text{ж}}$, $c_{\text{ж}}$, $\gamma_{\text{ж}}$) и от свойств изоляции ($T_{\text{н}}$, $T_{\text{к}}$).

Расчеты для медной жилы по (4) будут отличаться от расчетов для медного экрана по (3) только в следующем: $T_{\text{н}} = 90$ °С, $T_{\text{к}} = 250$ °С, $T = 0,5(T_{\text{н}} + T_{\text{к}}) = 170$ °С.

Из-за различия температурных режимов жилы и экрана коэффициент для жилы получился меньше, чем для экрана, и составил $K_{\text{ж}} = 0,141$ кА/мм². С его помощью заполнены соответствующие столбцы в табл. 1. Для жил сечением более 300 мм² проверка термической стойкости теряет смысл, поскольку в энергосистеме почти не встречается мест с токами КЗ более 50–60 кА.

Сравнение расчетов с каталогами фирм

В каталогах АВВ, Nexans, «Южкабеля», «Севкабеля», «Электрокабеля» (Кольчугино) для проверки соответствия сечения жилы токам КЗ используется коэффициент $K_{\text{ж}} = 0,143$ кА/мм², который практически идеально совпадает со значением $K_{\text{ж}} = 0,141$, полученным по формуле (4).

В каталогах компаний значения коэффициента для экрана лежат в диапазоне от $K_{\text{э}} = 0,151$ до $K_{\text{э}} = 0,203$ кА/мм². Значение $K_{\text{э}} = 0,174$ кА/мм², найденное по (3), лежит ровно в середине указанного диапазона. Поскольку формула (3) совпадает с уже проверенной формулой (4), то, по всей видимости, разброс $K_{\text{э}}$ связан не с самой формулой, а лишь с различием в исходных данных, которые производители закладывают в расчеты экранов.

В табл. 2 сведены те немногие сведения, которые есть на страницах каталогов. Действительно, отличие коэффици-

• **Таблица 1.** Допустимый по (2) ток короткого замыкания I_k для медной жилы и экрана при $t_k = 1$ с

$F_{\text{Э}}$ или $F_{\text{Ж}}$, мм ²	I_k , кА	
	Жила	Экран
35	4,9	6,1
50	7,1	8,7
70	9,9	12,2
95	13,4	16,5
120	16,9	20,9
150	21,2	26,1
185	26,1	32,2
240	33,8	41,8
300	42,3	52,2
400	56,4	69,6

• **Таблица 2.** Исходные данные для выбора сечения экрана по каталогам разных компаний

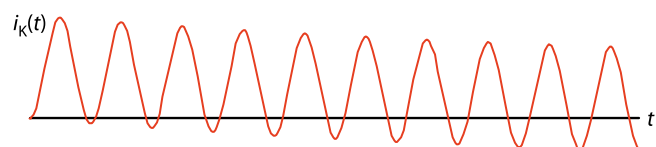
Компания	Сведения из каталога			Расчет $K_{\text{Э}}$ по (3) для $T_{\text{Н}}$ и $T_{\text{К}}$
	$T_{\text{Н}}$, °С	$T_{\text{К}}$, °С	$K_{\text{Э}}$, кА/мм ²	
ABB (вариант 1)	50	250	0,165	0,161
ABB (вариант 2)	70	250	0,153	0,151
«Севкабель»	80	350	0,178	0,174
«Южкабель»	70	350	0,203	0,178
«Электрокабель»	–	–	0,203	–
Nexans	–	–	0,200	–

• **Таблица 3.** Поправочный коэффициент K_A в формуле (6) при выборе сечения медной жилы и экрана

t_k , с	K_A , кА	
	Подстанции	Станции
	$\tau_k = 0,075$ с *	$\tau_k = 0,315$ с *
0,1	1,698	2,481
0,2	1,373	2,133
0,4	1,187	1,725
0,6	1,125	1,513
0,8	1,094	1,391
1	1,075	1,314
1,2	1,063	1,262
1,4	1,054	1,225
1,6	1,047	1,197
1,8	1,042	1,175
2	1,038	1,157

* Указанные постоянные времени характерны для сетей преимущественно с воздушными, а не с кабельными линиями. Данных по постоянным времени для кабельных сетей у автора нет.

• **Рис. 2.** Осциллограмма тока КЗ, имеющего периодическую и аперриодическую составляющие



ентов $K_{\text{Э}}$ в каталогах, как видно из табл. 2, связано главным образом с отсутствием единого мнения по начальной $T_{\text{Н}}$ и конечной $T_{\text{К}}$ температурам экрана при КЗ. Ранее с помощью [1, 2] пояснялось, что в расчеты по (3) лучше закладывать $T_{\text{Н}} = 80$ °С и $T_{\text{К}} = 350$ °С. Такую же позицию занял «Севкабель». Позиция же других заводов или кардинально отличается (ABB), или неизвестна («Электрокабель», Nexans). Однако, несмотря на несогласованность в части значений начальной и конечной температур экрана, сама формула (3), по всей видимости, так же как и (4), заслуживает доверия.

УЧЕТ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА

Под термином «ток короткого замыкания» понимают действующее значение периодической составляющей тока КЗ. Поэтому все расчеты по (2), а также по каталогам кабельных заводов и МЭК основываются на информации о действующем значении периодической составляющей тока сети, в которой будет проложен кабель. Вместе с тем, как известно, в токе КЗ в общем случае присутствует и аперриодическая составляющая (рис. 2), величина которой зависит от момента возникновения КЗ (вблизи от нулевого или вблизи от максимального значения синусоиды фазного напряжения), а затухание – от соотношения активного сопротивления сети и ее индуктивности.

Аперриодическая составляющая тока КЗ проходит по жиле и экрану кабеля и вызывает их нагрев в дополнение к нагреву, обусловленному периодической составляющей. Определим роль аперриодической составляющей в нагреве жилы и экрана кабеля.

Тепло, которое выделяется в активном сопротивлении R (жилы или экрана) от протекающего по нему тока $i_k(t)$, может быть найдено по известному выражению:

$$Q(t) = R \cdot \int_0^t i_k(t)^2 \cdot dt,$$

где в общем случае ток $i_k(t) = i_{\text{п}}(t) + i_{\text{а}}(t)$ имеет периодическую и аперриодическую составляющие:

$$i_{\text{п}}(t) = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin(\omega t + \psi);$$

$$i_{\text{а}}(t) = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin \psi \cdot \exp(-t / \tau_k),$$

где I_k – действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

ψ – начальный угол синусоиды тока КЗ.

При возникновении КЗ в момент времени, при котором $\psi = 0$, аперриодической составляющей тока не будет. При возникновении КЗ в момент времени, при котором $\psi = \pi / 2$, аперриодическая составляющая будет иметь наибольшее возможное значение, равное в начальный момент времени амплитуде периодической составляющей $\sqrt{2} \cdot I_k$ и далее постепенно затухающее.

В ходе преобразований можно получить, что за время КЗ t_k в сопротивлении R жилы (или экрана) ток КЗ, имеющий в общем случае периодическую и аперриодическую составляющие, выделит тепло:

$$Q(t_k) = I_k^2 \cdot R \cdot (K_A \cdot t_k), \quad (5)$$

где K_A – поправочный коэффициент на тепло от аперриодического тока:

$$K_A = 1 + \frac{1 - \exp(-2t_k / \tau_k)}{t_k / \tau_k} \sin \psi.$$

Если есть только периодическая составляющая тока КЗ (случай $\psi = 0$), то согласно (5) выделится тепло $Q(t_k) = I_k^2 \cdot R \cdot t_k$. Это выражение в точности совпадает с тем, которое используется при выводе известных (2), (3), (4).

Если имеются и периодическая, и аперриодическая составляющие (случай $\psi \neq 0$), то тогда выделяющееся в жиле и экране тепло будет в $K_A > 1$ раз больше, чем ранее, а значит, в $K_A > 1$ раз возрастет нагрев ΔT жилы (экрана) током КЗ.

Наиболее сильное влияние на нагрев аперриодическая составляющая окажет при $\psi = \pi / 2$. Этот случай и будем рассматривать далее для оценок K_A .

С учетом (5) известная формула (2) может быть уточнена:

$$I_k = K_{\text{Ж}} \frac{F_{\text{Ж}}}{\sqrt{t_k K_A}}; \quad I_k = K_{\text{Э}} \frac{F_{\text{Э}}}{\sqrt{t_k K_A}}. \quad (6)$$

Видно, что учет аперриодической составляющей тока КЗ при выборе сечения экрана можно сделать, заложив дополнительные запасы в величину времени отключения КЗ t_k .

Коэффициент K_A зависит от постоянной времени τ_k , которая в свою очередь зависит от схемы сети, но в первом приближении может быть принята равной 75 мс для шин подстанций и 315 мс для шин электростанций. Расчет K_A приведен в табл. 3. Видно, что учет апериодической составляющей тока КЗ дает увеличение тепловыделения в сопротивлении жилы и экрана кабеля, особенно заметное при малых временах t_k отключения КЗ.

Рост тепловыделения означает увеличение нагрева жилы и экрана. Например, если без учета апериодической составляющей тока за время КЗ экран кабеля нагревался от $T_H = 80$ °С до $T_K = 350$ °С, т.е. на $\Delta T_{\text{э}} = T_K - T_H = 270$ °С, то с учетом $K_A = 1,698$ нагрев экрана соразмерно возрастет до $\Delta T_{\text{э}} = 1,698 \cdot 270 = 460$ °С. Значит, после нагрева температура экрана составит около $T_K = \Delta T_{\text{э}} + T_H = 460 + 80 = 540$ °С (цифры указаны без учета тепла, отводимого от экрана в изоляцию и оболочку, т.е. предполагается адиабатический характер процесса).

Очевидно, что апериодическая составляющая тока КЗ сети требует учета при проверке (при выборе) сечений жилы и экрана, особенно при малом времени отключения. Однако прежде следует определить правила выбора закладываемого в расчеты времени отключения КЗ, от которого существенно зависит K_A и роль апериодической составляющей.

Время отключения КЗ определяется тем, какие именно защиты (основные, резервные) будут отключать кабель и какие у них выдержки времени. Выбор закладываемого в расчеты времени отключения также было бы уместно увязать со степенью ответственности кабельной линии, ведь для наиболее важных линий можно сделать излишние запасы по времени, а для второстепенных – проводить выбор сечений при минимальных выдержках времени, экономя на сечении экрана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время при выборе (проверке) сечений жилы и экрана используется формула (2), где учитывается лишь периодическая составляющая тока короткого замыкания сети и не учитывается возможное наличие в токе апериодической составляющей.
2. Роль апериодической составляющей в нагреве жилы и экрана зависит от времени отключения КЗ. При малом времени роль апериодической составляющей существенно возрастает, а конечная температура жилы и экрана, сечение которых выбрано по распространенной формуле (2), может значительно превзойти допустимые значения, составляющие соответственно 250 и 350 °С.
3. В настоящее время от перегрева изоляции КЛ спасает то, что кабельные линии недогружены и перед КЗ температура жилы и экрана составляет не 80–90 °С, как в (2), а не более 20–30 °С; сечение жилы и экрана проверяется в течение 1 с, тогда как на самом деле время отключения КЗ даже с учетом действия УРОВ не превосходит 0,6–0,8 с.
4. Для учета апериодической составляющей рекомендуется использовать формулу (6), где для медной жилы и экрана могут быть приняты коэффициенты $K_{\text{ж}} = 0,141$ кА/мм² и $K_{\text{э}} = 0,174$ кА/мм², а K_A зависит от t_k .
5. К сожалению, в настоящее время отсутствуют четкие правила выбора времени t_k и среди проектировщиков нет единого мнения о том, на действие какой защиты (основной или резервной) надо ориентироваться. Поэтому появление в формуле (6) для проверки термической стойкости жилы и экрана нового коэффициента K_A , входящего в произведение $K_A t_k$, – это удобный повод для специалистов отрасли обсудить и отразить в стандартах правила выбора t_k .

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р МЭК 60949-2009. Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. Введен в действие с 01.01. 2010.
2. СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
3. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с.
4. Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Тепловой расчет // Новости ЭлектроТехники. 2013. № 4(82).