**Кабельные линии.**

**Выбор сечения с учетом тока КЗ**

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 апериодической составляющей тока короткого замыкания.

**ЭКРАНЫ ОДНОФАЗНЫХ КАБЕЛЕЙ 6–500 кВ
Выбор сечения с учетом апериодической составляющей тока КЗ**

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*К 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.

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



Сечение жилы кабеля *F*Ж и сечение экрана кабеля *F*Э должны соответствовать величине тока КЗ *I*К с учетом длительности его протекания *t*К, 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:

, (1)

где *I*К1 – каталожное значение тока КЗ, допустимое для заданного сечения жилы (или экрана) в течение времени *t*К = 1 с.

**ВЫБОР ЖИЛЫ И ЭКРАНА ПО ТОКУ КЗ**

Производители кабелей в каталогах, как правило, дают пропорциональную связь односекундного тока *I*К1 и сечения жилы (или экрана). Такая связь *I*К1 = *K* · *F* происходит через коэффициент пропорциональности *K*. В результате формула (1) преобразуется в следующий, более удобный для использования вид:



Коэффициенты *К*Ж и *К*Э имеют размерность , но далее для удобства будем указывать размерность кА/мм2.

Согласно [3] при выборе сечения жилы (или экрана) в формуле (2) в качестве тока *I*К 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 *К*Ж = 0,143 кА/мм2 (медная жила). Что касается выбора сечения медного экрана, то здесь у фирм нет единого мнения, и коэффициенты *К*Э в разных каталогах различаются, находясь в диапазоне от *К*Э = 0,153 до *К*Э = 0,203 кА/мм2 (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 *К*Э (при том что значения *К*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*К2*R*Э*t*К ,

где *I*K и *t*K – величина и длительность протекания тока КЗ;

– активное сопротивление экрана сечением *F*Э и длиной *L*K;

ρЭ = ρ0Э[1 + αЭ(*T* – *T*20)] – удельное активное сопротивление материала экрана;

ρ0Э – удельное активное сопротивление экрана при температуре *T*20 = 20 °С;

αЭ – температурный коэффициент сопротивления экрана;

*T* = 0,5(*Т*Н+ +*Т*К) – средняя температура экрана в процессе его нагрева от начальной температуры *Т*Н до конечной *Т*К.

**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*Э = *С*Э · Δ*Т*Э, где Δ*Т*Э = *Т*К – *Т*Н – нагрев экрана от начальной температуры *Т*Н до конечной *Т*К;

*С*Э = *с*Э · *m*Э – теплоемкость экрана,

где *с*Э – удельная теплоемкость материала экрана;

*m*Э = γЭ · *V*Э – масса экрана;

где γЭ – удельная плотность материала экрана;

*V*Э = *F*Э*L*K – объем экрана.

**Тепловой баланс**

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

, (3)

где коэффициент пропорциональности *К*Э зависит от материала экрана (ρЭ, *с*Э, γЭ) и от свойств изоляции (*Т*Н, *Т*К).

**Пример расчета для экрана**

Проведем расчеты по (3) с использованием следующих обычных справочных данных для медного экрана: αЭ = 0,0039 о.е., ρ0Э = 1,72 · 10–8 Ом·м, *с*Э = 380 Дж/(кг·К), γЭ = 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 *Т*Н = 80 °С.

В качестве конечной температуры экрана согласно стандарту [2] примем температуру *Т*К = 350 °С. При этом средняя температура экрана, при которой надо вычислить его удельное активное сопротивление ρЭ, будет *Т* = 0,5(*Т*Н + *Т*К) = 215 °С.

Расчеты по (3) дают коэффициент *К*Э = 1,74 · 108 А/м2, или *К*Э = 0,174 кА/мм2, с помощью которого в табл. 1 для различных типовых сечений экрана *F*Э по формуле (2) получены допустимые токи КЗ *I*К при времени *t*K = 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:

, (4)

где коэффициент пропорциональности *К*Ж зависит от материала жилы (ρЖ, *с*Ж, γЖ) и от свойств изоляции (*Т*Н, *Т*К).

Расчеты для медной жилы по (4) будут отличаться от расчетов для медного экрана по (3) только в следующем: *Т*Н = 90 °С, *Т*К = 250 °С, *Т* = 0,5(*Т*Н + *Т*К) = 170 °С.

Из-за различия температурных режимов жилы и экрана коэффициент для жилы получился меньше, чем для экрана, и составил *К*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, по-скольку в энергосистеме почти не встречается мест с токами КЗ более 50–60 кА.

**Таблица 1. Допустимый по (2) ток короткого замыкания *I*K для медной жилы и экрана при *t*K = 1 с**

|  |  |
| --- | --- |
| ***F*Э или *F*Ж, мм2** | ***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 |

**Сравнение расчетов с каталогами фирм**

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

В каталогах компаний значения коэффициента для экрана лежат в диапазоне от *К*Э = 0,151 до *К*Э = 0,203 кА/мм2. Значение *К*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 *К*Э связан не с самой формулой, а лишь с различием в исходных данных, которые призводители закладывают в расчеты экранов.

В табл. 2 сведены те немногие сведения, которые есть на страницах каталогов. Действительно, отличие коэффициентов *К*Э в каталогах, как видно из табл. 2, связано главным образом с отсутствием единого мнения по начальной *Т*Н и конечной *Т*К температурам экрана при КЗ. Ранее с помощью [1, 2] пояснялось, что в расчеты по (3) лучше закладывать *Т*Н = = 80 °С и *Т*К = 350 °С. Такую же позицию занял «Севкабель». Позиция же других заводов или кардинально отличается (АВВ), 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.

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Компания** | **Сведения из каталога** | **Расчет *К*Э по (3) для *Т*Н и *Т*K** |
| ***Т*Н, °С** | ***Т*K, °С** | ***К*Э, кА/мм2** |
| ABB (вариант 1) | 50 | 250 | 0,165 | 0,161 |
| АВВ (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 | – |

**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 апериодическая 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.

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



Апериодическая составляющая тока КЗ проходит по жиле и экрану кабеля и вызывает их нагрев в дополнение к нагреву, обусловленному периодической составляющей. Определим роль апериодической 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:

,

где в общем случае ток *i*K(*t*) = *i*П(*t*) + *i*A(*t*) имеет периодическую и апериодическую составляющие:

*i*П(*t*) = · *I*K · sin(ω*t* + ψ);

*i*A(*t*) = · *I*K · sinψ · exp(–*t* / τK),

где *I*K – действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

ψ – начальный угол синусоиды тока КЗ.

При возникновении КЗ в момент времени, при котором ψ = 0, апериодической составляющей тока не будет. При возникновении КЗ в момент времени, при котором ψ = π / 2, апериодическая составляющая будет иметь наибольшее возможное значение, равное в начальный момент времени амплитуде периодической составляющей · *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 апериодическую составляющие, выделит тепло:

*Q*(*t*K) = *I*K2 · *R* · (*K*A · *t*K) , (5)

где *K*A – поправочный коэффициент на тепло от апериодического тока:

.

Если есть только периодическая составляющая тока КЗ (случай ψ = 0), то согласно (5) выделится тепло *Q*(*t*K) = *I*K2 · *R* · *t*K. Это выражение в точности совпадает с тем, которое используется при выводе известных (2), (3), (4).

Если имеются и периодическая, и апериодическая составляющие (случай ψ ≠ 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 Δ*T* жилы (экрана) током КЗ.

Наиболее сильное влияние на нагрев апериодическая составляющая окажет при ψ = π / 2. Этот случай и будем рассматривать далее для оценок *K*A.

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



Видно, что учет апериодической 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 τK, 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.

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

|  |  |
| --- | --- |
| ***t*К, с** | ***К*А, кА** |
| **Подстанции** | **Станции** |
| **τК = 0,075 с \*** | **τК = 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.

Рост тепловыделения означает увеличение нагрева жилы и экрана. Например, если без учета апериодической составляющей тока за время КЗ экран кабеля нагревался от *Т*Н = 80 °С до *Т*К = 350 °С, т.е. на Δ*Т*Э = *Т*К – *Т*Н = = 270 °С, то с учетом *К*А = 1,698 нагрев экрана соразмерно возрастет до Δ*Т*Э = 1,698 · 270 = 460 °С. Значит, после нагрева температура экрана составит около *Т*К = Δ*Т*Э + *Т*Н = 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 *К*А 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 *К*Ж = 0,141 кА/мм2 и *К*Э = 0,174 кА/мм2, а *К*А 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.

Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Тепловой расчет // Новости ЭлектроТехники. 2013. № 4(82).