

Проблемы выбора сечения экранов кабелей 6–500 кВ

УДК 621.315.21

Статья призвана обратить внимание, что если при проектировании кабельных линий имеется значительная неопределенность в ключевых исходных данных, то нет смысла использовать сложные доскональные методики расчета и выбора кабелей — указанные методики вполне допустимо заменить упрощенными. Одним из примеров является ситуация с сечением экранов кабелей высокого напряжения. При выборе экрана используют «точную» сложную методику ГОСТ Р МЭК 60949-2009, позволяющую за счет моделирования охлаждения кабелей уточнить сечение экрана на 10–20% по сравнению с тем, что дают простые формулы. Однако при этом для обоих способов расчета используются необоснованные значения тока КЗ и времени его отключения, что может изменить сечение экрана до 2–3 раз. На фоне столь значительного разброса результатов борьба за 10–20%, которые связаны с учетом/неучетом охлаждения, представляется бессмысленной.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент

Современные кабельные линии (КЛ) высокого напряжения 6–500 кВ строятся преимущественно однофазными кабелями, в конструкции которых есть проводящие экраны (как правило, из медных проволок). При повреждении изоляции кабеля ток короткого замыкания (КЗ) из жилы кабеля проходит в его экран и далее в заземляющие устройства, расположенные по концам трассы (рисунок 1).

Токи КЗ проходят по экрану и нагревает его до температур, которые могут быть опасны для изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ), примыкающей к экрану. Обычно полагается, что для СПЭ-изоляции предельно допустимой температурой на время КЗ является 350°С. Выбор сечения экрана $F_Э$ однофазного кабеля выполняется из условия исключения перегрева экрана свыше указанной температуры.

Обоснованный выбор сечения экрана $F_Э$ обеспечит отсутствие вдоль трассы КЛ опасного перегрева экрана и примыкающей к нему СПЭ-изоляции, то есть минимизирует последствия КЗ. При неверном выборе сечения экрана $F_Э$ в случае КЗ потребуется не только ремонт исходного места КЗ, но также и полная замена тех участков трассы КЛ, на которых за счет прохождения токов КЗ произошел перегрев экрана и деструкция СПЭ-изоляции.

Учитывая изложенное, не должно вызывать сомнения, что выбор сечения экрана $F_Э$ по току КЗ $I_К$ и времени отключения $t_К$ является важнейшим разделом проектной документации. Также он известен как «проверка термической стойкости».

Ключевые слова:
кабельная линия, однофазный кабель, сшитый полиэтилен, сечение экрана, короткое замыкание, неадиабатический процесс

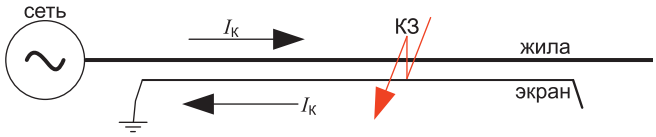


Рис. 1. КЗ «жила-экран» однофазного кабеля

При КЗ температура экрана кабеля может быть найдена путем расчета теплового баланса, учитывающего процесс нагрева экрана током КЗ и процесс его охлаждения за счет отвода тепла в примыкающую к экрану СПЭ-изоляцию и наружную оболочку. Поскольку время $t_К$ прохождения тока КЗ и нагрева экрана весьма ограничено (до 3–4 с), то процессы охлаждения не успевают в достаточной мере повлиять на температуру, и поэтому их зачастую вообще не учитывают — такой нагрев экрана, не учитывающий охлаждение, называется «адиабатическим». Напротив, если учитывать охлаждение, то процесс нагрева экрана называется «неадиабатическим». Сравним данные процессы.

АДИАБАТИЧЕСКИЙ НАГРЕВ

Предположение адиабатического нагрева экрана позволяет упростить выбор $F_Э$, сведя его к элементарной формуле, обоснованной в книге [1]:

$$F_Э \geq I_К \cdot \frac{\sqrt{t_К}}{K_Э}, \quad (1)$$

где $F_Э$ — сечение экрана, мм²; $I_К$ — ток КЗ, кА; $t_К$ — время КЗ, с; $K_Э$ — коэффициент пропорциональности.

Если до КЗ в нормальном режиме температура экрана равна 80°С (чуть меньше температуры жилы 90°С, являющейся длительно допустимой для СПЭ-изоляции), то согласно расчетам [1] для медного экрана справедливо $K_Э$ = 0,174.

Формула (1) для случая адиабатического нагрева дана не только в книге [1], но и в каталогах большинства кабельных заводов. Также ее можно получить, например, из ГОСТ Р МЭК 60949-2009 [2], опираясь на приведенные там выражения (п. 3 ГОСТ) и физические свойства материалов (табл. 1 ГОСТ). Отличие ГОСТ Р МЭК от книги [1] заключается лишь в системе используемых обозначений:

– сечение экрана — это S (вместо $F_Э$);
– ток КЗ — это $I_{АД}$ (вместо $I_К$).

Вне зависимости от системы обозначений формула (1) выбора сечения экрана при адиабатическом нагреве экранов подтверждается различными исследователями и является очень простой и удобной в повседневных расчетах.

НЕАДИАБАТИЧЕСКИЙ НАГРЕВ

Безусловно, можно только поприветствовать работу, нацеленную на уточнение выбора сечения экрана. При этом такую работу можно было бы разделить на два никак независящих друг от друга направления исследований:

– уточнение самой формулы $F_Э = f(I_К, t_К)$;
– уточнение закладываемых в расчеты величин $I_К$ и $t_К$.

Уточнение приведенной выше формулы $F_Э = f(I_К, t_К)$ возможно, если принять во внимание неадиабатический характер процесса нагрева экрана кабеля током КЗ, то есть учесть, что некоторое количество тепла успевает отвестись с экрана в примыкающие к нему СПЭ-изоляцию и наружную оболочку. Такая методика расчета предлагается в ГОСТ Р МЭК 60949-2009 [2] и обычно позволяет обосновать допустимость снижения сечения экрана на 10–20% по сравнению со значением $F_Э$, вычисленным по известной простой формуле (1) для адиабатического процесса.

Важно отметить, что методика учета неадиабатического процесса ГОСТ Р МЭК [2] опирается на совокупность эмпирических поправочных коэффициентов, которые получены в ходе ограниченного числа экспериментальных исследований и поэтому не могут вызывать достаточного доверия, о чем заявлено прямо в самом ГОСТ Р МЭК. Кроме того, результаты расчетов ощутимо зависят от тех исходных данных, которые на стадии проектирования КЛ, как правило, еще неизвестны:

– диаметр каждой проволоки экрана;
– число проволок экрана;
– зазор между проволоками;
– наличие/отсутствие заполнения зазора;
– материалы, контактирующие с проволоками экрана;
– наличие лент, наложенных спирально поверх проволок экрана.

С учетом всех перечисленных соображений методика учета неадиабатического процесса и выбора сечения экрана по ГОСТ Р МЭК [2] больше похожа не на расчет, а на своеобразное гадание. Даже если проектировщику каким-то образом удалось точно угадать многочисленные особенности конструкции кабеля, который в итоге окажется закуплен при строительстве КЛ, и даже если проектировщик корректно истолковал достаточно путанно изложенные положения [2], то все равно в лучшем случае речь идет о возможности уточнить (снизить) сечение экрана $F_Э$ лишь на 10–20%.

Стоит ли тратить силы и время на спорный учет неадиабатического процесса, позволяющий уточнить сечение на 10–20%? Или же уточнение выбора сечения $F_Э$ лучше начать с того, чтобы разобраться с величинами токов КЗ $I_К$ и времени отключения $t_К$, которые закладываются в расчеты и способны изменить сечение $F_Э$ сразу в 2–3 раза?

Очевидно, что уточнение токов КЗ и времени отключения должно быть сделано в первую очередь, однако за долгие годы массового использования однофазных кабелей с СПЭ-изоляцией эта работа так и не проведена. Далее опишем проблему подробнее.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТОКА КЗ

Для выбора сечения экрана $F_Э$ по формуле (1) или по любой другой методике нужна достоверная информация о величине периодической составляющей тока КЗ:

– в сетях 6–35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью необходим ток двойного КЗ, рассчитываемый как $\sqrt{3}/2$ = 0,87 от тока трехфазного КЗ;
– в сетях 110–500 кВ с заземленной нейтралью необходим ток однофазного КЗ.

За последние 15 лет в ряде публикаций автора, в том числе в книге [1], внимание уделялось методам расчета продольных активно-индуктивных сопротивлений кабелей с учетом сечения экрана $F_Э$, его материала и схемы соединения/заземления. Несмотря на это, во всех нормативных документах (напри-

мер, [3]), а также кабельных каталогах до сир присутствуют формулы, не учитывающие влияние экранов и, как правило, завышающие продольное индуктивное сопротивление КЛ. В результате реальное индуктивное сопротивление КЛ может оказаться меньше расчетных значений [3], и следовательно, реальные токи КЗ в кабельных сетях будут больше ожидаемых.

Например, согласно [4], использование корректных продольных сопротивлений КЛ привело к тому, что величина периодической составляющей тока КЗ оказалась выше изначально предполагаемого значения, полученного по нормативным документам:

– на 15–20% для трехфазного КЗ;
– на 30–35% для однофазного КЗ.

Ток КЗ входит в числитель формулы (1), а сечение экрана ему пропорционально. Поэтому рост тока КЗ на 35% означает, что итоговое сечение экрана $F_Э$ также вырастет на 35% (в 1,35 раза). Таким образом, из-за неверного расчета параметров КЛ и токов КЗ кабельных сетей, в настоящее время при проектировании КЛ сечение экранов кабелей $F_Э$ выбирается, скорее всего, меньше реально требуемых значений.

АПЕРИОДИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТОКА КЗ

Ток КЗ в общем случае содержит не только периодическую составляющую, но еще и апериодическую. Обе эти составляющие вызывают нагрев жил/экранов кабелей, а также, например, определяют электродинамические силы, которые возникают между соседними кабелями.

Нормативные документы и кабельные каталоги учитывают обе составляющие в расчетах сил между кабелями, необходимых для выбора кабельных креплений, однако расчет сечения экрана $F_Э$ они предлагают проводить по периодической составляющей, опуская апериодическую, что является ошибкой.

В [5, 6] показано, что апериодическая составляющая тока КЗ способна заметно увеличить температуру экрана и, безусловно, должна быть учтена при выборе $F_Э$, для чего формулу (1) можно скорректировать путем добавления коэффициента K_A:

$$F_Э \geq I_К \cdot \frac{\sqrt{K_A \cdot t_К}}{K_Э}. \qquad (2)$$

Коэффициент K_A имеет строгое математическое обоснование. Его вычисляют по удобному выражению, приведенному в [5, 6], и он может составлять K_A = 1,0 ÷ 2,5. Например, для КЛ, примыкающей к электрической станции, при времени отключения, равном $t_К$ = 0,4 с, справедливо K_A = 1,725 (см. таблицу 3 из [5]), что дает $\sqrt{K_A}$ = 1,31.

Видно, что в рассмотренном примере учет апериодической составляющей тока КЗ приведет к необходимости увеличения сечения экрана $F_Э$ на 31% (в 1,31 раза) по сравнению с сечением, которое было бы найдено по формуле (1).

ВРЕМЯ ОТКЛЮЧЕНИЯ КЗ

В каталогах кабельных заводов приводятся примеры использования формулы (1) для случая $t_К$ =1 с. Это делается не потому, что таково реальное время отключения КЗ, а исключительно с целью удобства извлечения квадратного корня. Однако иногда об этом забывают и ошибочно проектируют КЛ при времени $t_К$ = 1 с.

Реальное время отключения КЗ $t_К$ складывается из следующих составляющих:

– время срабатывания защиты (основной или резервной);
– время отключения выключателя;
– время действия устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ).

На практике время срабатывания основной и резервной защит отличается на порядок: если время срабатывания основной защиты может быть, скажем, всего 0,1 с, то резервной — вплоть до 3–4 с. Очевидно, что необходимы четкие правила, которые позволили бы в зависимости от степени ответственности КЛ выбирать время защиты и рассчитывать итоговое время $t_К$ прохождения тока КЗ, необходимое для выбора $F_Э$. Об отсутствии правил неоднократно заявлялось [1, 5, 6], но нормативные документы до сих пор не содержат достаточных разъяснений по поводу определения $t_К$.

Положим, что при проектировании КЛ и выборе сечения экрана $F_Э$ решено, что время $t_К$ определяется не основной защитой, а резервной, учет которой, допустим, привел к росту $t_К$ в 3 раза. Тогда в формуле (1) вместо $\sqrt{t_К}$ получим $\sqrt{3t_К}$ = 1,73 · $\sqrt{t_К}$.

Видно, что в рассмотренном примере отсутствие регламентированных правил выбора времени КЗ приведет к необходимости увеличения сечения экрана $F_Э$ на 73% (в 1,73 раза) по сравнению с сечением, которое было выбрано по основной защите.

УЧЕТ АПВ

Техническая политика электросетевых компаний запрещает автоматическое повторное включение (АПВ) для КЛ. Однако для кабельно-воздушных линий (КВЛ) в нашей стране цикл АПВ, как правило, все же разрешен. Это означает, что для КВЛ при КЗ на кабельном участке (вставке, заходе, отпайке) ток КЗ дважды пройдет по жиле и экрану поврежденного кабеля, увеличивая нагрев и требуемое сечение экрана. Именно поэтому для КВЛ стараются внедрять селективное АПВ [1, 6], когда АПВ запускается в случае возникновения КЗ на воздушном участке и запрещается при КЗ на кабельном.

Если на КВЛ применяется АПВ, но не обеспечена его селективность, то выбор сечения экрана кабельного участка должен учитывать риск повторного прохождения тока КЗ, что можно сделать по формуле (3):

$$F_Э \geq I_К \cdot \frac{\sqrt{K_{A1} \cdot t_{К1} + K_{A2} \cdot t_{К1}}}{K_Э}, \qquad (3)$$

где $t_{К1}$ и $t_{К2}$ — время первого и второго КЗ; K_{A1} и K_{A2} — коэффициенты для первого и второго КЗ.

Если предположить, что для двух КЗ совпадают как время отключения $t_К$, так и апериодические составляющие (коэффициенты K_A), то с учетом $\sqrt{2}$ = 1,41, получим:

$$F_Э \geq 1{,}41 \cdot I_К \cdot \frac{\sqrt{K_A \cdot t_К}}{K_Э}.$$

Видно, что в рассмотренном примере применение АПВ, которое не является селективным, привело к необходимости увеличения сечения экрана $F_Э$ на 41% (в 1,41 раза) по сравнению с сечением, которое было бы выбрано при селективном АПВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выбора сечения экрана $F_Э$ был введен ГОСТ Р МЭК 60949-2009, который, как полагают, является «точным», поскольку учитывает процесс охлаждения экрана и позволяет обосновать возможность снижения сечения экрана на 10–20% по сравнению с простейшей формулой (1), которая охлаждения не учитывает.

В статье было показано, что сечение экрана $F_Э$, хотя и зависит от учета/неучета охлаждения, но на самом деле в гораздо большей степени зависит от точности задания:

– величины периодической составляющей тока КЗ;
– наличия и затухания апериодической составляющей тока КЗ;
– времени отключения КЗ;
– особенностей АПВ.

Каждый из четырех перечисленных факторов, независимо от других, способен повысить сечение экрана $F_Э$ на 30–70% (в 1,3–1,7 раза), а суммарный эффект может увеличить сечение $F_Э$ в 2–3 раза. По этой причине опасной представляется ситуация, когда методика учета перечисленных факторов до сих пор отсутствует в отраслевых нормативных документах, а определение токов и времен КЗ проводится субъективно, исходя из частного личного мнения каждого отдельного специалиста.

Вместо того, чтобы обратить внимание на важность проблем корректного учета всех источников нагрева экрана (токи и время КЗ), способных в разы повысить $F_Э$, от проектировщиков требуют досконального учета охлаждения экрана в соответствии с неоднозначным ГОСТ Р МЭК 60949-2009, основной результат применения которого — обоснование возможности снижения сечения $F_Э$ на 10–20% с помощью не до конца проверенной системы эмпирических коэффициентов, зависящих от малоизвестных конструктивных особенностей кабеля.

По мнению автора статьи в настоящее время проблема выбора сечения $F_Э$ экрана кабеля заключается не в учете/неучете малозаметного охлаждения, а в отсутствии узаконенных правил задания ключевых исходных данных — тока КЗ $I_К$ и времени $t_К$, определяющих нагрев экрана и способных повысить сечение в 2–3 раза. До разработки таких правил нет никакого смысла бороться за 10–20%, связанные с учетом/неучетом охлаждения. Таким образом, можно рекомендовать:

– инициировать разработку стандарта «Проверка сечений жил и экранов кабелей по условиям термической стойкости и невозгораемости», где решить все проблемы, описанные в данной статье и исследованиях других авторов;
– до появления нового стандарта разрешить использование простых формул (1–3) вместо методики ГОСТ Р МЭК 60949-2009.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб: Политех-пресс, 2021. 688 с.
2. ГОСТ Р МЭК 60949-2009. Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200072856.
3. СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования (с изменениями от 28.09.2021). Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/0c5/ti5ojv9ry0pg9c6nh3cfvkvpp8u1193s.pdf.
4. Дмитриев М.В. Токи короткого замыкания в электрических сетях, содержащих современные кабельные линии 6–500 кВ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2023, № 3(78). С. 82–86.
5. Дмитриев М.В. Экраны однофазных кабелей 6–500 кВ. Выбор сечения с учетом апериодической составляющей тока КЗ // Новости Электротехники, 2014, № 4(88). С. 34–37.
6. Алексеев В.Г., Дементьев Ю.А., Смекалов В.В., Ерохин Е.Ю., Сдобин А.В. Особенности выбора кабелей 110–500 кВ для кабельных и кабельно-воздушных линий // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2017, № 1(40). С. 84–92.

REFERENCES

1. Dmitriev M.V. High voltage cable lines. St. Petersburg: Polytech-press, 2021. 688 p.
2. GOST R IEC 60949-2009. Calculation of thermally permissible short-circuit currents taking into account non-adiabatic heating. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200072856.
3. STO 56947007-29.060.20.071-2011. 110-500 kV power cable lines. Conditions of creation. Norms and requirements. (as amended on 28.09.2021). URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/0c5/ti5ojv9ry0pg9c6nh3cfvkvpp8u1193s.pdf.
4. Dmitriev M.V. Short-circuit currents in electrical networks containing modern 6-500 kV cable lines // ELECTRIC POWER. Transmission and distribution, 2023, no. 3(78), pp. 82-86.
5. Dmitriev M.V. Screens of single-phase cables 6-500 kV. Selection of the cross section taking into account the aperiodic component of the short circuit current // Electrical Engineering News, 2014, no. 4(88), pp. 34-37.
6. Alekseev V.G., Dementiev Yu. A., Smekalov V.V., Erohin E.Yu., Sdobin A.V. Features of the choice of 110-500 kV cables for cable and cable-overhead lines // ELECTRIC POWER. Transmission and distribution, 2017, no. 1(40), pp. 84-92.