

Расчет термической стойкости грозозащитных тросов ВЛ 110–750 кВ

УДК 621.3.051.025

Одним из разделов проектной документации является расчет термической стойкости грозозащитных тросов ВЛ 110–750 кВ токам короткого замыкания. Для проведения таких расчетов традиционно использовались простые и проверенные методические указания, разработанные в СССР в 1976 году. Ситуация изменилась, когда в 2014 году ПАО «ФСК ЕЭС» выпустило новую редакцию методических указаний, оформленную в качестве СТО. Новый документ оказался сложнее предшественника, требует учета значительного числа исходных данных, что вынуждает проектировщиков обращаться за помощью к его авторам, порой на коммерческой основе. Постараемся разобраться, чем же отличаются документы 1976 и 2014 года.

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

Родчихин С.В.,
магистрант Санкт-Петербургского политехнического университета

Ключевые слова:

воздушная линия электропередачи, грозозащитный трос, короткое замыкание, термическая стойкость

Keywords:

overhead transmission line, ground wire, short circuit, thermal resistance

ВВЕДЕНИЕ

Грозозащитный трос является одним из элементов воздушной линии (ВЛ) электропередачи и предназначен для защиты от прямых ударов молнии в фазные провода. Трос должен соответствовать требованиям, указанным в [1], среди которых достаточная механическая прочность и стойкость к термическому воздействию тока короткого замыкания.

На рисунке 1 показана ВЛ с установленным на ней тросом, связывающая два распределительных устройства (РУ1 и РУ2). Обычно трос крепится к опорам при помощи специальной изолирующей подвески, которая, если требуется заземление троса, шунтируется проводником.

Пусть на одной из опор ВЛ произошло короткое замыкание (КЗ). Если на этой опоре выполнено изолированное крепление троса, то весь ток КЗ проходит по телу опоры в ее контур заземления (рисунок 2а). Если же подвеска троса шунтирована, то есть трос заземлен, то тогда в контур опоры пойдет лишь часть тока КЗ, а другая поднимется вверх и направится по тросу в сторону РУ1 и РУ2 (рисунок 2б).

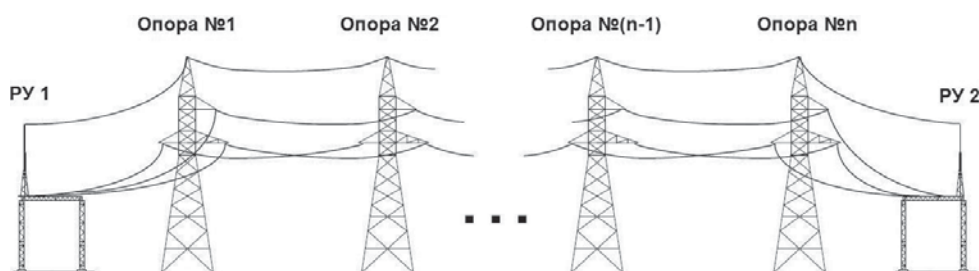


Рис. 1. Воздушная линия с грозозащитным тросом

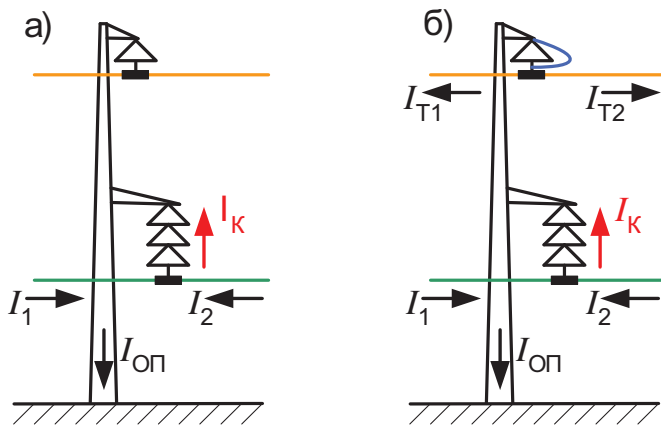


Рис. 2. Составляющие тока КЗ при его возникновении на опоре ВЛ: а) трос изолирован, б) трос заземлен

Прохождение по тросу той или иной части тока КЗ вызывает нагрев троса и в ряде случаев может вызвать повреждение его проволок или узлов крепления. Расчет термической стойкости троса токам КЗ (с учетом длительности их протекания) — это важный раздел проектной документации.

Термическое воздействие тока короткого замыкания на грозозащитный трос описано в ГОСТ [2]. Количественно оно определяется значением интеграла Джоуля:

$$B_k = \int_0^{t_{\text{откл}}} i_k^2(t) dt, \quad (1)$$

где $i_k(t)$ — ток КЗ в произвольный момент времени, $t_{\text{откл}}$ — длительность протекания тока.

До недавнего времени единственным документом по расчету термической стойкости грозозащитных тросов токам КЗ были методические указания 1976 года [3]. В 2014 году был введен в действие новый стандарт «ФСК ЕЭС» [4], который, по мнению его разработчиков, уточнил методику [3]. В частности, были добавлены:

- учет влияния других ВЛ, проходящих рядом с рассматриваемой;
- учет аperiodической составляющей тока КЗ;
- расчетный случай двухфазного КЗ на землю;
- новые соображения по длительности КЗ.

Сравним расчеты, выполненные по «старой» [3] и «новой» [4] методикам, а также сопоставим их с результатами компьютерного моделирования, выполненного во всемирно известной компьютерной программе EMTP.

Для решения поставленной задачи определим составляющие интеграла (1) — ток в тросе и длительность его протекания.

РАСЧЕТ ТОКА В ТРОСЕ

«Новый» стандарт [4] уже имеет на своих страницах ряд примеров расчетов, и, на первый взгляд, было бы разумно и удобно воспользоваться приведенными в них параметрами сети и ВЛ для выполнения вычислений по «старой» методике [3] и в EMTP. Однако, к сожалению, информации, приведенной в описании примеров [4], оказалось недостаточно, чтобы повторить расчеты собственными силами. Так, в одной из задач не хватает данных для поиска параметров при-

мыкающей к ВЛ сети. В другой — указаны результаты расчетов токов «в ветвях», но нет ясности, о каких же ветвях идет речь. Весьма прискорбно, что в национальном стандарте содержатся примеры, которые невозможно использовать. Учитывая изложенное, мы вынуждены придумать свой собственный тестовый пример.

Пусть имеется одноцепная ВЛ 110 кВ протяженностью 10 км. Все пролеты ВЛ (и вблизи от РУ, и в средней части ВЛ) одинаковой длины, равной 200 м. Таким образом, линия имеет 50 пролетов, общее количество опор трассы составляет $n = 49$ плюс две конечных опоры — в местах присоединения к РУ1 и РУ2 (рисунок 1).

Примем, что все опоры одинакового типа П110-3, на них размещены провода АС 185/29, один грозозащитный трос ТК-70 (параметры по [4]). Будем считать, что грозозащитный трос заземлен на каждой опоре. Сопротивление заземления каждой из 49 опор равно 10 Ом за исключением двух конечных, где оно составляет 0,5 Ом.

В методике [3] рассматриваются лишь однофазные КЗ, тогда как в [4] еще и двухфазные. Для сравнения результатов остановим выбор только на однофазных КЗ. При этом пусть будет два различных места возникновения КЗ (рисунок 1):

- на опоре № 1 (вблизи от РУ1);
- на опоре № 49 (вблизи от РУ2).

Программа EMTP

Для расчета тока в тросе в программе EMTP необходимо знать эквивалентные параметры сетей, примыкающих к ВЛ в ее начале и в ее конце, — их эквивалентные сопротивления и эдс, которые можно получить на основе информации о величинах токов трехфазного и однофазного КЗ на шинах РУ1 и РУ2.

Эквивалентные эдс примем отвечающими номинальному напряжению 110 кВ, а для определения эквивалентных индуктивных сопротивлений сетей положим:

- ток трехфазного КЗ на шинах РУ1 $I_{\text{РУ1}}^{(3)} = 15$ кА;
- ток трехфазного КЗ на шинах РУ2 $I_{\text{РУ2}}^{(3)} = 12$ кА;
- ток однофазного КЗ на шинах РУ1 $I_{\text{РУ1}}^{(1)} = 10$ кА;
- ток однофазного КЗ на шинах РУ2 $I_{\text{РУ2}}^{(1)} = 8$ кА.

В программе EMTP линия представлена совокупностью участков (пролетов), расположенных между опорами, для каждой из которых можно учесть соединение троса (заземлен или нет) и указать уникальное сопротивление заземления. Каждый участок (пролет) ВЛ моделируется многопроводной линией, состоящей из фазных проводов и троса, взаимное расположение которых задается в зависимости от выбранного типа опоры с учетом длины гирлянды изоляторов на опоре и стрелы провеса в средней части пролета.

После создания EMTP-модели в ней были определены действующие значения тока короткого замыкания I_k и его составляющих I_{T1} и I_{T2} , проходящих по тросу в сторону РУ1 и РУ2. Результаты приведены в таблице 1.

Здесь важно отметить некоторые различия в последовательности вычислений, выполняемых

в ЕМТР и по формулам [3, 4]. В частности, в ЕМТР токи I_K, I_{T1}, I_{T2} , определяются одновременно «за один расчет», тогда как в [3, 4] — последовательно: на первом этапе определяется ток КЗ I_K и только затем он используется в формулах, которые позволяют найти I_{T1} и I_{T2} .

«Старая» методика 1976 года [3]

Ток в тросе представляет собой сумму двух основных составляющих. Первая из них определяется величиной индуктивной связи между тросом и проводами ВЛ, с учетом тока в проводах. Вторая определяется соотношением сопротивления троса, а также сопротивлений заземления опор ВЛ и контуров РУ:

$$\begin{aligned} I_{T1} &= (1 - \dot{P}) \cdot \dot{I}_1 + \dot{P} \cdot \dot{I}_K \cdot \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_{ВХ1}}, \\ I_{T2} &= (1 - \dot{P}) \cdot \dot{I}_2 + \dot{P} \cdot \dot{I}_K \cdot \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_{ВХ2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\dot{I}_K, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_{T1}, \dot{I}_{T2}$ — токи, показанные на рисунке 2; $\dot{Z}_{ВХ1}, \dot{Z}_{ВХ2}$ — входные сопротивления многократно заземленных тросов, какими они видятся, если считать от места КЗ влево (в сторону РУ1) и вправо (в сторону РУ2); \dot{Z}_0 — сопротивление, определяемое по [3]; \dot{P} — безразмерный коэффициент, учитывающий взаимоиндукцию между проводами ВЛ и тросом.

По [3] первая составляющая формулы (2) оказывает заметное влияние только для тросов с высокой проводимостью (например, сталеалюминиевых). Что касается простых стальных тросов, то для них допустимо принять $\dot{P} = 1$.

«Новый» стандарт 2014 года

Ток в тросе представляет собой сумму шести составляющих:

$$\dot{I}_T = \dot{I}_{УР} + \dot{I}_{ДОП(R_{ОН})} + \dot{I}_{ДОП(R_{РУ1})} + \dot{I}_{ДОП(R_{РУ2})} + \dot{I}_{ИНД.З} + \dot{I}_{ИНД.Ф.СМЕЖ}, \quad (3.1)$$

где $\dot{I}_{УР}$ — составляющая тока в тросе при равестве нулю сопротивления опоры, на которой рассматривается КЗ, и сопротивлений заземления РУ1 и РУ2; $\dot{I}_{ДОП(R_{ОН})}$ — дополнительная составляющая тока в тросе, учитывающая ненулевое значение сопротивления опоры с точкой КЗ; $\dot{I}_{ДОП(R_{РУ1})}, \dot{I}_{ДОП(R_{РУ2})}$ — дополнительные составляющие тока в тросе, учитывающие влияние ненулевых значений сопротивления заземления РУ1 и РУ2; $\dot{I}_{ИНД.З}$ — составляющая тока в тросе, обусловленная индуктивной связью между током земли и тросом (как в [3], так и в [4] она не учитывается); $\dot{I}_{ИНД.Ф.СМЕЖ}$ — составляющая тока в тросе, обусловленная индуктивной связью троса с фазными проводами смежных ВЛ.

Поскольку в тестовом примере 110 кВ принято, что рядом с рассматриваемой ВЛ отсутствуют какие-то другие, то формула (3.1) может быть сокращена:

$$\dot{I}_T = \dot{I}_{УР} + \dot{I}_{ДОП(R_{ОН})} + \dot{I}_{ДОП(R_{РУ})}. \quad (3.2)$$

В формуле (3.2) составляющая тока в тросе $\dot{I}_{ДОП(R_{РУ})}$ указана без индекса 1 или 2, поскольку согласно [4] при расположении точки КЗ вблизи от того или иного конца ВЛ (что имеет место в выбранном примере) достаточно рассматривать только влияние ближайшего РУ, а влиянием другого допустимо

Табл. 1. Сравнение результатов расчетов тока в тросе, выполненных различными способами

Величина	Расчет в ЕМТР	Методика 1976 г. [3]		Стандарт 2014 г. [4]	
	Ток, А	Ток, А	Отличие от ЕМТР, %	Ток, А	Отличие от ЕМТР, %
Короткое замыкание на опоре № 1					
I_{T1}	6440	6430	0,1	7710	19,8
I_{T2}	2660	2690	1,1	1680	36,8
Короткое замыкание на опоре № 2					
I_{T1}	2190	2110	3,9	1770	19,2
I_{T2}	4970	5040	1,6	5570	12,2

пренебрегать. Так, при КЗ на опоре № 1 (вблизи РУ1) достаточно учитывать только $\dot{I}_{ДОП(R_{РУ1})}$, а при КЗ на опоре № 49 (вблизи РУ2) — только $\dot{I}_{ДОП(R_{РУ2})}$.

Если подставить в (3.2) выражения для отдельных составляющих, то получим:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{T1} &= (1 - \dot{P}) \cdot \dot{I}_1 + \dot{P} \cdot \dot{I}_K \cdot \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_{ВХ1}} + \dot{I}_{ДОП(R_{РУ1})}, \\ \dot{I}_{T2} &= (1 - \dot{P}) \cdot \dot{I}_2 + \dot{P} \cdot \dot{I}_K \cdot \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_{ВХ2}} + \dot{I}_{ДОП(R_{РУ2})}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

В условиях рассматриваемого здесь примера формулы (2) и (3.3) отличаются лишь последним слагаемым, появление которого в [4] объясняется необходимостью учета «влияния ненулевого сопротивления заземления РУ1 и РУ2». Такое пояснение непонятно, поскольку учет сопротивлений заземления РУ1 и РУ2 уже проведен в тот момент, когда определялись входные сопротивления многократно заземленных тросов $\dot{Z}_{ВХ1}, \dot{Z}_{ВХ2}$ на участках слева и справа от места КЗ.

Ясно, что расчеты по (2) и (3.3) не могут совпасть друг с другом, но проверим, какой из них окажется ближе к результатам компьютерного моделирования в ЕМТР.

Сопоставление расчетов

В таблице 1 приведены результаты расчетов, выполненных с помощью ЕМТР и по методикам 1976 года [3] и 2014 года [4].

Поскольку ЕМТР является известной программой, а рассмотренный здесь пример очень прост, то именно расчеты в ЕМТР приняты как эталон точности. Из таблицы 1 следует, что расчеты по методике 1976 года хорошо совпали с ЕМТР, а вот новый стандарт 2014 года дает существенно иные результаты — ошибка достигает 20% и более.

Эта ошибка вносится тем самым третьим слагаемым в формуле (3.3), которое имеет достаточно сложное аналитическое выражение и по задумке разработчиков [4] за чем-то должно учитывать и без того уже учтенное влияние сопротивлений РУ1 и РУ2. Возможно, в исследованиях, предваривших разработку документа [4], даны необходимые комментарии на этот счет, однако они не меняют резуль-

тата — СТО очень сильно отличается от признанной во всем мире программы EMTP.

Важно отметить, что рассмотренный здесь тестовый пример является самым простым, ведь длины всех пролетов одинаковы, а влияние соседних линий и цепей отсутствует. В случае необходимости усложнить задачу, программа EMTP без труда позволит это сделать. В том числе она позволит рассмотреть не только однофазные, но и двухфазные короткие замыкания.

К сожалению, расчеты токов в тросах, выполненные в EMTP, весьма неохотно принимаются экспертами, работающими в ПАО «ФСК ЕЭС». В большинстве своем эксперты требуют проведения расчетов в строгом соответствии с методикой 2014 года [4]. Да, необходимость использования разработанного СТО [4] формально верна, если бы не случайное или преднамеренное стечение обстоятельств:

- СТО составлен таким образом, что им весьма сложно пользоваться (в частности, имеющиеся примеры являются не полными, их нельзя использовать для помощи в самостоятельном освоении методики);
- СТО требует учета значительного числа исходных данных, что сложно сделать без специализированных компьютерных программ; в качестве такой программы в Приложении А к СТО упомянута лишь одна, которая отсутствует в свободной продаже, и, на сколько нам известно, есть лишь на компьютере разработчиков этого стандарта;
- расчет термической стойкости грозотроса, выполненный в строгом соответствии со СТО по рекомендуемой там программе, обходится проектировщикам в сумму едва ли менее миллиона рублей.

Интересно отметить, что расчет термической стойкости троса в программе EMTP, распространяемой во всем мире практически на безвозмездной основе, во-первых, обойдется проектной организации существенно дешевле «расчетов по СТО», а во-вторых, скорее всего, окажется куда как более точным.

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА В ТРОСЕ

Длительность протекания тока КЗ в тросе определяется временем работы релейной защиты и собственным временем отключения выключателя. Время работы защиты зависит от многих факторов и, в частности, от наличия автоматического повторного включения (АПВ) и его кратности.

Как правило, выключатели с двух сторон ВЛ отключаются не одновременно, и надо учитывать, что при односторонне включенной линии, ток в тросе продолжает протекать, а его величина будет меньше по сравнению с исходным случаем КЗ на ВЛ, включенной сразу с обеих сторон. Это несколько усложняет задачу определения термического действия тока КЗ на трос, однако здесь следует помнить, что основной вклад в разогрев троса

все же происходит за то время, пока ВЛ остается включенной с двух сторон.

В целом, по вопросам длительности протекания тока к СТО [4] замечаний нет, за исключением методики учета аperiodической составляющей тока КЗ. Дело в том, что нагрев от этой составляющей тока учитывается не напрямую, а косвенно — за счет завышения общего времени прохождения тока КЗ на величину, равную постоянной времени T_a затухания аperiodического тока.

Вклад аperiodического тока в тепловой импульс при КЗ может достигать 20% и даже более, поэтому актуальным является вопрос о величине T_a , которая:

- увеличивается, если точка КЗ располагается не в средней части ВЛ, а вблизи от концевых РУ1 или РУ2;
- увеличивается, если к ВЛ примыкает не подстанция, а электрическая станция.

В примере из стандарта [4] значение T_a принимается равным 0.01 сек вне зависимости от двух перечисленных факторов, едва ли это корректно. Что касается EMTP, то здесь учет изменения T_a происходит автоматически.

ВЫВОДЫ

1. Сохранение термической стойкости грозозащитных тросов при воздействии токов КЗ является одним из важных условий нормальной работы ВЛ. Термическое воздействие тока КЗ зависит от его величины и длительности протекания.
2. Величина тока КЗ, определенная по новому стандарту [4], даже для самых простых схем существенно отличается от «старой» методики [3] и от признанной компьютерной программы EMTP.
3. Методика [4] не должна использоваться как единственная, по которой надо выполнять расчеты термической стойкости тросов ВЛ. Существуют более простые, эффективные, точные, доступные инструменты для проведения таких расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-29.060.50.015-2008. Грозозащитные тросы для воздушных линий электропередачи 35–750 кВ. Технические требования. Стандарт предприятия. ОАО «ФСК ЕЭС», 2014.
2. ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. Введен 01.07.2008. М.: Стандартинформ, 2007.
3. Методические указания по расчету термической устойчивости грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи. № 5290 тм-т1, М.: ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект», 1976.
4. СТО 56947007-33.180.10.173-2014. Методические указания по расчету термического воздействия токов короткого замыкания и термической устойчивости грозозащитных тросов и оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос, подвешиваемых на воздушных линиях электропередачи. Стандарт предприятия. ОАО «ФСК ЕЭС», 2014.