

Электродуговые процессы при однофазных замыканиях в пофазно-экранированных кабелях

05, май 2013

DOI: 10.7463/0513.0598819

Антонов А. А., Гусев Ю. П.

УДК 621.316.11, 621.316.13.

ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

AntonovAAn@mpei.ru

GusevYP@mpei.ru

Введение

В распределительных электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ широко используются кабельные линии (КЛ). Суммарная протяженность гальванически связанных КЛ достигает сотен и тысяч километров, что обуславливает наличие большой ёмкости между жилами и экранами кабелей. В сетях с изолированной нейтралью и в сетях с компенсированной нейтралью, при неисправности дугогасительных реакторов, емкостной ток однофазного замыкания может достигать сотен ампер. Под действием электродуговых процессов в месте повреждения выделяется значительная тепловая энергия, и однофазное замыкание за достаточно короткое время переходит в междуфазное короткое замыкание (КЗ) [1]. В работе рассмотрены электродуговые процессы при однофазном замыкании на землю с учетом способа прокладки кабелей. Разработана методика определения времени перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ, проанализировано влияние на электродуговой процесс расстояния между кабелями КЛ.

Возможность перехода однофазного замыкания с током несколько сотен ампер в междуфазное КЗ подтверждается сведениями от служб эксплуатации электрических сетей. В работе [3] проанализировано влияние термического действия электрической дуги на возгорание кабеля: приведены уравнения процессов теплообмена между дугой и окружающей изоляцией, на основании натуральных экспериментов определены эмпирические коэффициенты для расчетов.

В стандарте IEEE Std 1584TM-2002 [1], рассматривающем вопросы защиты электротехнического персонала от теплового воздействия дуги, представлены эмпирические выражения для определения количества теплоты, выделяемого дуговым столбом на единицу площади поверхности. Плотность тепловой энергии дуги определяют по известным параметрам дуги: току, длине дугового столба, классу напряжения электроустановки, виду оборудования. Источники [1] и [3] были использованы в данной работе для определения времени перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ.

1 Математическая модель электродуговых процессов

Для оценки термического действия столба электрической дуги на изоляцию КЛ с пофазно-экранированными кабелями смоделирован нестационарный тепловой переходный процесс. Рассмотрены однофазные замыкания на землю в сети с изолированной и компенсированной нейтралью напряжением 10 кВ. Математическое моделирование электродуговых процессов выполнено в отечественном программном комплексе *ELCUT* [4].

На рис. 1 представлена расчетная модель КЛ с пофазно-экранированными кабелями, способ прокладки – треугольником без просвета. КЛ включает следующие слои с различными свойствами материалов:

- алюминиевая жила сечением 500 мм²;
- рабочая изоляция из сшитого полиэтилена толщиной 5,0 мм;
- медный экран из 36 проволок;
- оболочка из сшитого полиэтилена толщиной 2,5 мм;
- земля (окружает КЛ).

Теплопроводность, удельная теплоемкость и удельная плотность слоёв модели приняты в соответствии с [5].

Источник тепловой энергии – дуговой столб, способ задания граничных условий – постоянный тепловой поток через границу поверхности дугового столба.

За расчетный элемент при численном решении уравнения теплопроводности в программе *ELCUT* принята ячейка сетки конечных элементов. Расчетная температура ячейки в одном цикле интегрирования неизменна. Размер сетки выбирался из условия получения распределений температуры с приемлемой для инженерных расчетов точностью.

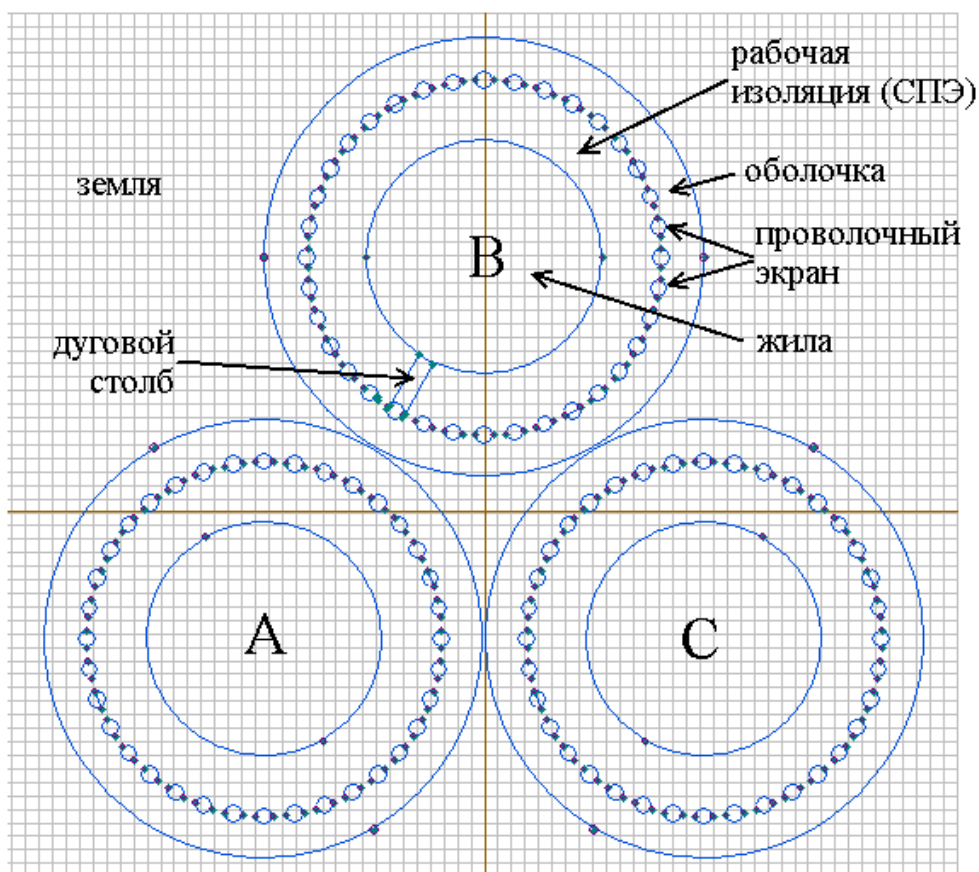


Рис. 1. Расчетная модель электродуговых процессов в программе *ELCUT*

Разработанная расчетная модель электродугового процесса позволяет получить распределение температуры нагрева изоляции при прямом и косвенном термическом действии дуги. Модель предназначена для исследования влияния на электродуговые процессы следующих факторов:

- значения емкостного тока однофазного замыкания;
- расстояния в просвете между кабелями;
- способа прокладки.

В модели использованы следующие допущения:

- однофазное замыкание на землю является несамоустранимым; дуга в месте однофазного замыкания – непогасающая;
- теплопроводность материалов не зависит от температуры нагрева;
- геометрическая модель электрической дуги – цилиндр радиуса 2 мм и длиной 5,0 мм, равной толщине рабочей изоляции кабеля 10 кВ, с учетом полупроводящих слоев;
- потеря электрической прочности изоляции происходит при ее нагреве до температуры предела невозгораемости; для сшитого полиэтилена – 400°С.

2 Верификация модели

2.1 Метод верификации

Для обоснования адекватности разработанной модели необходимо доказать, что:

- модель адекватно учитывает мощность тепловыделения дугового столба;

- геометрическое представление электрической дуги цилиндром, рис. 1, адекватно учитывает дугу как источник тепловыделения при однофазном замыкании в кабеле.

Для верификации модели использованы результаты расследования однофазного замыкания на землю в распределительной сети напряжением 10 кВ, рис. 2. На рисунке показаны последствия термического воздействия электрической дуги на одножильный пофазно-экранированный кабель АПвП2г-1х240/50. Микропроцессорными терминалами релейной защиты записана осциллограмма аварийного тока, его среднее значение составило 340 А, продолжительность 2,0 с.



Рис. 2. Последствия однофазного замыкания на землю КЛ с пофазно-экранированными кабелями: ток однофазного замыкания $I_c=340$ А, время однофазного замыкания $t_{033}\approx 2$ с

В рассматриваемом случае значительный емкостной ток однофазного замыкания обусловлен отключением дугогасящего реактора на плановый ремонт, сеть 10 кВ работала в режиме без компенсации емкостного тока. В результате аварии дуга полностью

пережгла кабель, в котором первоначально возникло однофазное замыкание, и повредила соседний кабель, проложенный вплотную к аварийному кабелю. В финальной стадии однофазного замыкания возникло междуфазное КЗ. На рис. 2 показаны повреждения соседнего кабеля.

2.2 Мощность тепловыделения дугового столба

Выполнено сопоставление двух способов расчета мощности теплового потока от электрической дуги:

- способ 1 – по известным току в дуговом столбе и напряжению на дуге;
- способ 2 – в соответствии с эмпирическими выражениями из стандарта IEEE Std 1854TM-2002 [1].

Первый способ

В работе [1] отмечены незначительные расхождения в свойствах дуги в электроустановках до 1 кВ и выше 1 кВ. В настоящее время хорошо исследована стабильная электрическая дуга, горящая между двумя электродами. Уравнение такой дуги при токах более десятков ампер имеет вид [6]:

$$U_d = A + B \cdot l,$$

где U_d - падение напряжения на дуге, В; A - сумма анодного и катодного напряжений (околоэлектродное падение напряжения), В; l - длина дуги, см; B - градиент напряжения в стволе дуги, В/см.

Сумма анодного и катодного напряжений A зависит, главным образом, от материала электродов. Для электродов из меди и алюминия A находится в диапазоне от 20 до 50 В [7].

Длина дуги зависит от расстояния между электродами и степени деформации ствола дуги под действием электромагнитных сил. Из серии опытов, представленных в [8] можно судить о примерной величине напряжения на дуговом столбе в зависимости от расстояния между токоведущими частями, рис. 3.

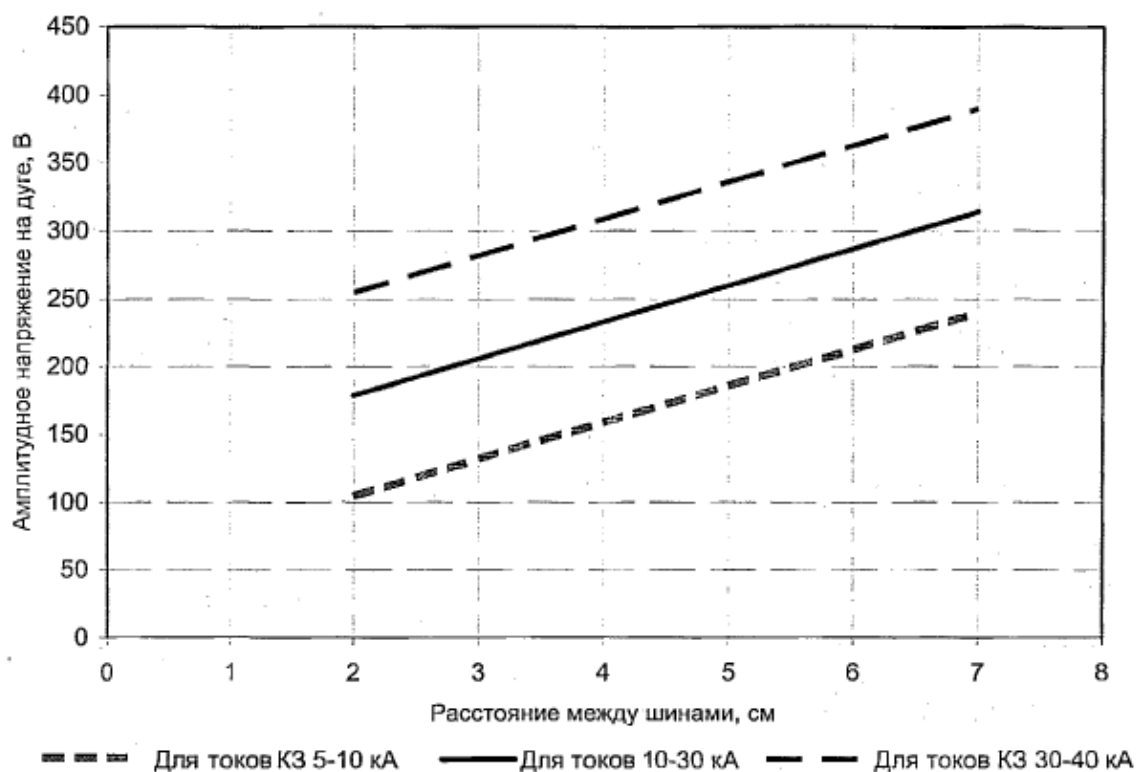


Рис. 3. Зависимость напряжения на дуговом столбе от расстояния между электродами

Опыты с электрической дугой в сети среднего напряжения показали, что зависимость напряжения на дуге от тока дуги имеет слабо выраженный характер [1]. В соответствии с рис. 3 напряжение на дуговом столбе длиной дуги 5,0 мм примем $U_d \approx 70$ В. Напряжение на дуге совпадает по фазе с током дуги, электрическая дуга выделяет активную мощность в виде потока тепловой энергии. Мощность тепловыделения в месте однофазного замыкания составила:

$$70\text{В} \cdot 340\text{А} = 23\ 800\ \text{Вт} = 23,8\ \text{кВт}.$$

Второй способ

Для верификации расчетов тепловыделения использованы данные натуральных экспериментов и эмпирическая модель электродуговых процессов [1]. С целью получения данных об электрических характеристиках дуги и выделении дугой тепловой энергии, в специализированных лабораториях по испытанию высоковольтного оборудования проведены многочисленные опыты дуговых КЗ. В стандарте [1] приведены эмпирические выражения для определения полной тепловой энергии, выделяющейся при горении дуги.

Эмпирическая модель электрической дуги, представленная в [1], применима для сетей:

- с номинальным напряжением $0,22 \div 15$ кВ;
- с токами металлического КЗ – в диапазоне $0,7 \div 106$ кА;
- с промежутками между проводниками – до 152 мм.

Плотность тепловой энергии, выделяемой дугой E , Дж/см²:

$$E = 4,184 \cdot C_f \cdot E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right), \quad (1)$$

где C_f – коэффициент напряжения (1,0 для напряжения выше 1 кВ; 1,5 для напряжения до 1 кВ включительно); E_n – нормализованная по времени и расстоянию плотность энергии согласно выражению (2), Дж/см²; t – время горения дуги, с; D – расстояние от места возникновения дуги до расчётной точки, мм; x – показатель степени, зависящий от вида оборудования и класса напряжения, для кабеля 10 кВ принимаем 2,0.

Плотность энергии дуги E_n , Дж/см², нормированная по времени и расстоянию от дуги до расчётной точки:

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \cdot \lg I_a + 0,0011 \cdot G; E_n = 10^{\lg E_n}, \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент, принимаемый $-0,792$ для открыто горящей дуги и $-0,555$ для дуги, горящей в ограниченном пространстве; K_2 – коэффициент, принимаемый 0 для изолированной нейтрали, и $-0,113$ для заземленной нейтрали; I_a – ток дугового КЗ, кА; G – длина промежутка между анодом и катодом, мм.

Выражение (2) получено на основе измерений тепловой энергии в лаборатории чувствительными калориферами.

Так как в кабеле горит непогасающая дуга, выражения (1) и (2) для энергии дуги могут быть использованы и для меньших токов, чем 700 А, в частности для емкостных токов однофазных замыканий.

Емкостное сопротивление сети много больше сопротивления дуги, поэтому ток однофазного замыкания на землю определяется емкостью кабельной сети. В этой ситуации допустимо принять, что ток дугового однофазного замыкания I_a , формула (2) равен емкостному току однофазного замыкания I_c .

В соответствии с формулами (1) и (2) при токе однофазного замыкания 340 А мощность тепловыделения дуги составила 20,5 кВт, напряжение на дуге $U_d = 20,5 \text{ кВт} / 340 \text{ А} = 60,3 \text{ В}$.

Сопоставление результатов

Мощности тепловыделения столба электрической дуги, полученные по двум различным методикам (23,8 кВт и 20,5 кВт), показали приемлемую сходимость по отношению друг к другу, следовательно, в расчетной модели тепловыделение электрической дуги определяется с приемлемой точностью. В дальнейших расчетах, при определении мощности тепловыделения электрической дуги, использован способ 2, более подробно учитывающий в эмпирических выражениях (1) и (2) параметры дуги.

2.3 Способ представления геометрии дуги

Для доказательства возможности представления электрической дуги цилиндром произведена качественная оценка повреждений кабеля после однофазного замыкания. Представление электрической дуги цилиндром – необходимость для косвенного учета взрывного эффекта при разрыве оболочки поврежденного кабеля.

Для тепловыделения дуги 20,5 кВт, при токе однофазного замыкания 340 А, в модели программного комплекса *ELCUT* произведено моделирование теплового действия дуги на изоляцию поврежденного кабеля. Результаты расчета теплового процесса при однофазном замыкании на землю в КЛ с пофазно-экранированными кабелями, рис. 4, 5, хорошо согласуются с последствиями реального однофазного замыкания в распределительной сети 10 кВ, рис. 2. Область прожигания изоляции и покровной оболочки кабеля после однофазного замыкания фактическая, рис. 2, и расчетная, рис. 4, 5, совпадают, и, таким образом, представление столба электрической дуги цилиндром справедливо для решения поставленных задач.

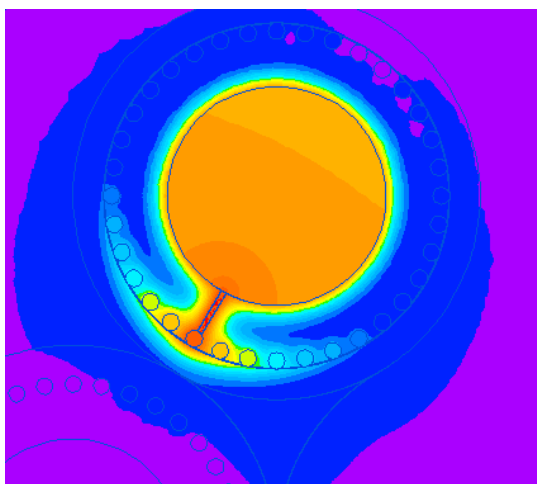


Рис. 4 – Прожигание покровной изоляции одножильного кабеля емкостным током однофазного замыкания на землю

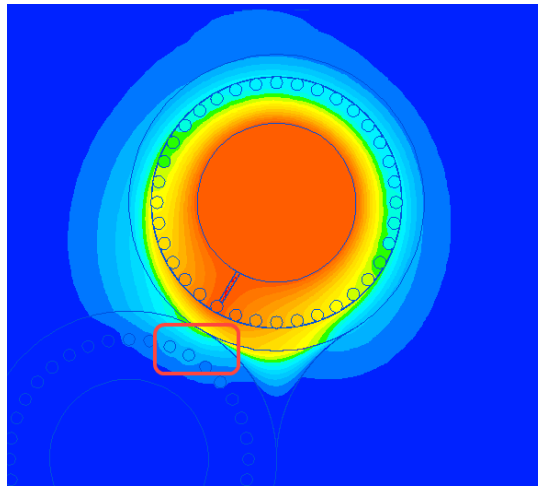


Рис. 5 – Нагрев и прожигание оболочки поврежденного одножильного кабеля, рамкой обозначена область нагрева изоляции соседнего неповрежденного кабеля

3 Температура нагрева пофазно-экранированных кабелей в нормальном режиме

В сетях среднего напряжения 6 – 35 кВ экранированные кабели прокладывают треугольником без просвета, рис. 1. Это позволяет максимально снизить рабочие токи в экранах кабелей. Отношение тока в экране к току в жиле в нормальном режиме приведено в таблице 1. При прокладке кабелей вплотную треугольником ток в экране в рабочем режиме составляет 10 – 20% от тока жилы, а при прокладке кабелей горизонтально с просветом 70 мм – 20 – 35% от тока жилы. С увеличением сечения медного экрана отношение токов в экране и жиле возрастает.

Таблица 1 – Соотношение токов в экране и жиле в нормальном режиме, при двустороннем заземлении экранов, без транспозиции

Тип кабеля	Отношение тока в экране в току в жиле при прокладке	
	треугольником без просвета	горизонтально с просветом 70 мм
АПвПу2г-3х(1х120/35-10)	0,111	0,222
АПвПу2г-3х(1х240/50-10)	0,141	0,275
АПвПу2г-3х(1х500/70-10)	0,188	0,351

Выполнен расчёт температурного поля КЛ с пофазно-экранированными кабелями, проложенными треугольником, в предшествующем режиме. Нагрузка КЛ принята равной

длительно допустимой, удельное тепловое сопротивление земли – $1,2 \text{ (м}\cdot\text{К)/Вт}$. Основным источником тепловыделения в кабельной линии являются потери мощности от токов в жиле и экране. В местах соприкосновения оболочек кабелей, рис. 6, температура рабочей изоляции будет выше.

На рис. 6 представлено распределение рабочей температуры в кабеле для установившегося режима, предшествующего замыканию. Для участков 1 – 2 – 3, рис. 6, построен график распределения температуры, рис. 7.

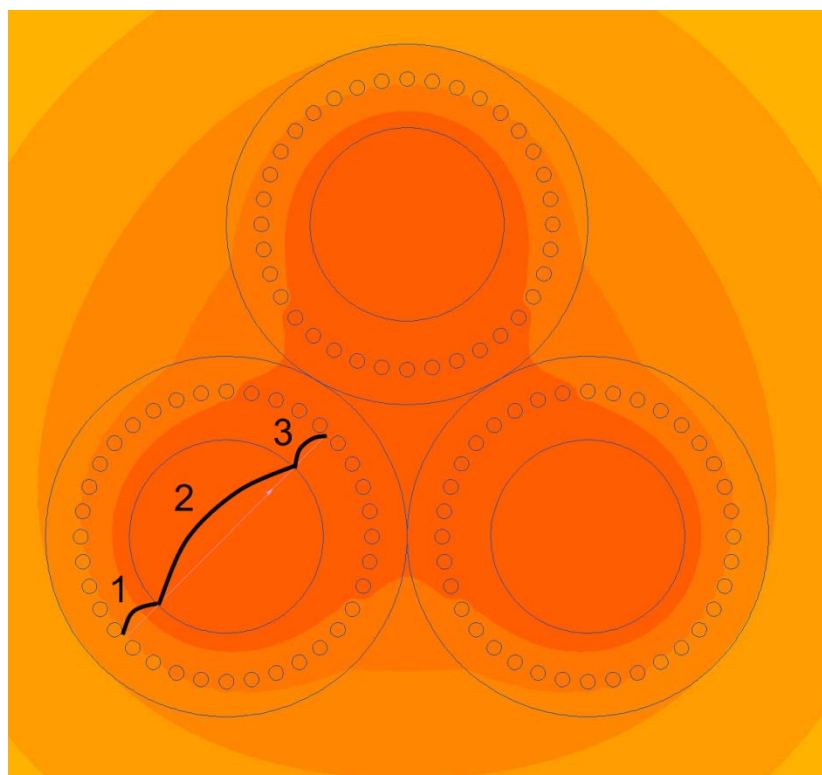


Рис. 6. Распределение температуры нагрева КЛ АПвП2г-3х(1х240/50-10) в нормальном режиме: более темная область означает более высокую рабочую температуру

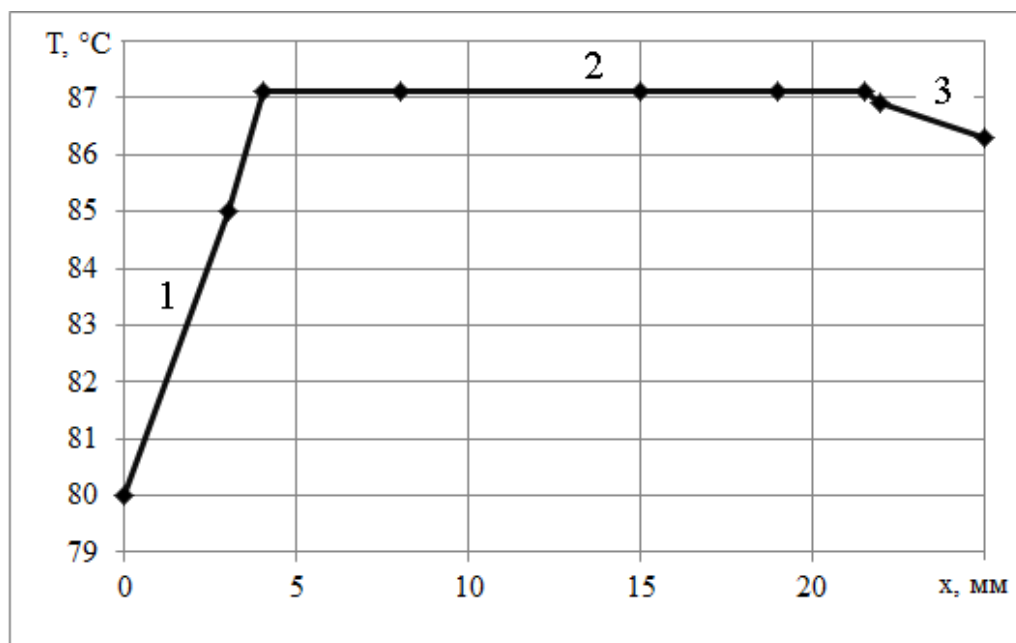


Рис. 7. График изменения рабочей температуры по участкам сечения кабеля: участок 1 – по изоляции кабеля вдали от центра КЛ; участок 2 – по жиле; участок 3 – по изоляции кабеля вблизи центра КЛ

При прокладке пофазно-экранированных кабелей вплотную треугольником возникает неравномерный нагрев рабочей изоляции. В соответствии с рис. 7 средняя температура изоляции промежутка жила-экран на участке 3, внутри кабеля, 86,5°C, а снаружи, на участке 1 – 83,5°C.

Расчёт распределения температуры, рис. 6, 7 выполнен для средней рабочей толщины изоляции кабеля 5,0 мм. В кабелях дополнительно применяют герметизирующий слой из водоблокирующей ленты и усиленную оболочку, увеличение толщины слоев изоляции кабеля приводит к возрастанию теплового сопротивления кабеля. Это, в свою очередь, повышает температуру изоляции кабелей в зоне их соприкосновения.

Температура изоляции определяет скорость ее старения. В соответствии с эмпирическим законом Аррениуса [9], повышение рабочей температуры изоляции на 6 °C приводит к сокращению срока её службы в 2 раза и к ухудшению изоляционных свойств. В местах соприкосновения кабелей увеличивается вероятность развития триингов.

4 Процесс перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ

Теплота, выделяемая столбом электрической дуги в изоляцию кабелей, зависит, главным образом, от тока в дуговом столбе, выражения (1), (2). Можно выделить следующие стадии перехода однофазного замыкания в междуфазное КЗ, рис. 8:

- пробой жилы на экран – дуга полностью локализована внутри кабеля, длина дуги равна толщине изоляции промежутка жила-экран; выделяемая в дуговом столбе теплота передается изоляции кабеля;
- прожигание покровной оболочки – энергия, выделяемая дугой, прожигает покровную оболочку кабеля, дуга переходит в открытую форму;
- открытая форма дуги – дуга увеличивается в длине, соприкасается с землей, элементами конструкции кабельной траншеи (канала), разогревает оболочку соседнего неповрежденного кабеля, наиболее продолжительная стадия;
- прожигание оболочки соседнего кабеля – электрическая дуга нагревает оболочку до предела невозгораемости и входит в контакт с экраном соседнего кабеля;
- прожигание рабочей изоляции неповрежденного кабеля – стадия заканчивается междуфазным КЗ, аварийный ток возрастает, и цепь отключается релейной защитой.



Рис. 8. Стадии процесса перехода однофазного замыкания на землю в сети с изолированной (компенсированной) нейтралью в междуфазное КЗ:

- 1) пробой жилы на экран; 2) прожигание покровной оболочки; 3) открытая дуга, разогрев земли и прилегающего кабеля; 4) прожигание оболочки соседнего кабеля; 5) прожигание рабочей изоляции прилегающего кабеля, возникновение междуфазного КЗ

На разработанной модели в программе *ELCUT* проведена серия расчетов переходных тепловых процессов при однофазных замыканиях в сети с изолированной (компенсированной) нейтралью. Исследовано влияние тока однофазного замыкания и просвета между кабелями на длительность перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ.

В процессе расчета решены две задачи, обеспечивающие приемлемую точность результатов моделирования тепловых процессов:

- расчет тепловой энергии, выделяемой дуговым столбом, выполнен по формулам (1), (2) эмпирической модели [1];

- для получения распределения нагрева изоляции кабелей при тепловом воздействии электрической дуги учтена геометрия взаимного расположения пофазно-экранированных кабелей, рис. 1, и физические свойства слоев КЛ и земли.

Стадия однофазного замыкания с закрыто горящей дугой включает процессы 1, 2, рис. 8. Прожиг оболочки кабеля наступает при средней температуре ее нагрева 400 °С, картина нагрева изоляции кабеля в момент прожигания оболочки приведена на рис. 4.

В соответствии с рис. 9 время прожигания оболочки пофазно-экранированного кабеля, при протекании емкостного тока 100 А, составляет 0,1 с; при увеличении тока резко снижается. С большой вероятностью прожигание оболочки сопровождается взрывным выбросом дуги и продуктов расплава изоляции, оказывающих механическое действие на оболочки неповрежденных кабелей. Математическая модель не учитывает этот процесс, поэтому расчетное время прожигания оболочки больше фактического.

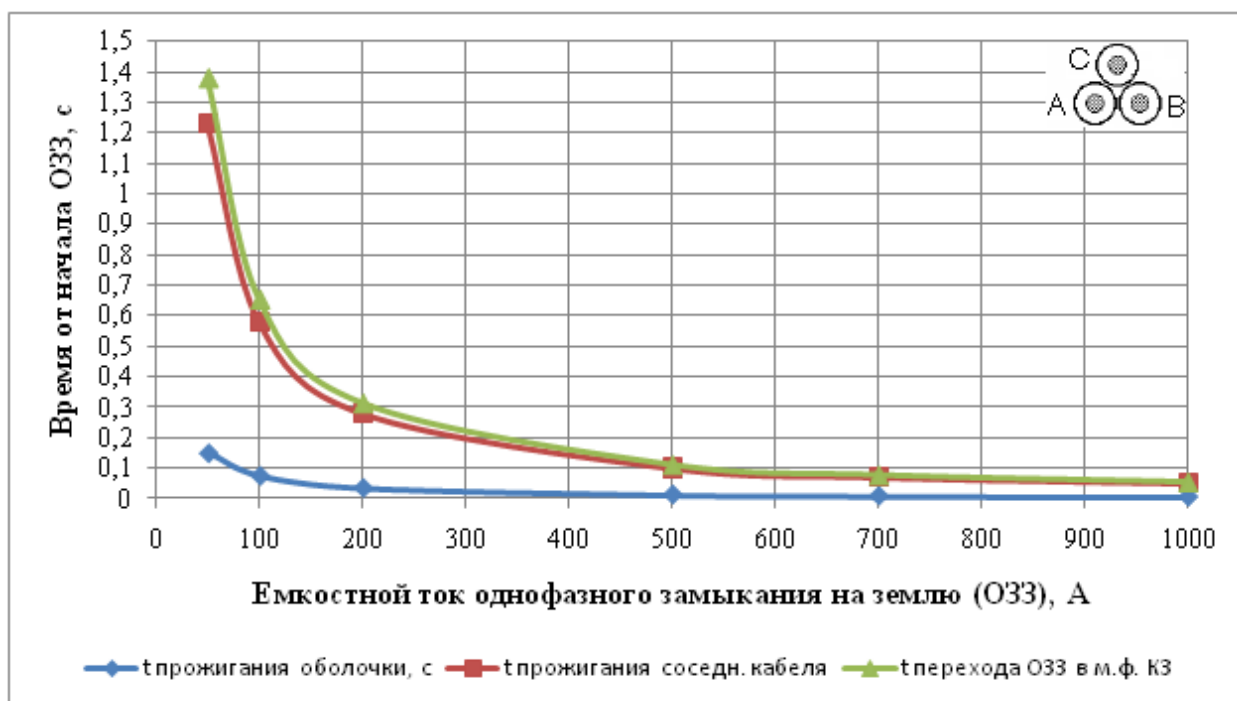


Рис. 9. Длительность перехода однофазного замыкания в междуфазное КЗ при прокладке одножильных кабелей вплотную треугольником

Стадия однофазного замыкания с открыто горящей дугой включает процессы 3, 4, 5, рис. 8. Для пофазно-экранированного кабеля было рассчитано однофазное замыкание в месте соприкосновения кабелей, в котором вероятность повреждения рабочей изоляции выше. После прожигания оболочки поврежденного кабеля электрическая дуга находится в закрытом пространстве между кабелями, рис. 4, не контактирует с землей и не может существенно удлиниться. Следовательно, необходимые условия для деионизации и погасания дуги отсутствуют.

После разрыва оболочки поврежденного кабеля закрытая дуга, при прокладке кабелей треугольником без просвета, оказывает термическое воздействие на соседний неповрежденный кабель. Излучаемого и передаваемого тепла дуги достаточно сначала для прожигания его покровной, а затем рабочей изоляции, картина нагрева изоляции кабеля приведена на рис. 5. В результате однофазное замыкание на землю переходит в междуфазное КЗ, и кабельная отключается релейными защитами.

Время перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ $t_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}}$ равно суммарной продолжительности стадий с закрыто и открыто горящей дугой. Зависимость времени перехода однофазного замыкания в междуфазное КЗ от тока однофазного замыкания $t_{\text{ОЗЗ} \rightarrow \text{КЗ}} = F(I_{\text{ОЗЗ}})$ для случая прокладки пофазно-экранированных

кабелей вплотную треугольником представлена на рис. 9. Продолжительность стадии прожигания изоляции соседнего неповрежденного кабеля при однофазном замыкании, по крайней мере, на порядок больше стадии прожигания оболочки поврежденного кабеля, поэтому, при определении времени $t_{O33 \rightarrow K3}$ стадией закрыто горящей дуги допустимо пренебрегать.

В странах Западной Европы, помимо прокладки одножильных экранированных кабелей треугольником вплотную, распространен способ горизонтальной прокладки с просветом 70 мм [2].

Зависимость $t_{O33 \rightarrow K3} = F(I_{O33})$ для случая прокладки пофазно-экранированных кабелей горизонтально с просветом 70 мм представлена на рис. 10. Прокладка однофазных кабелей с просветом существенно замедляет переход однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ. Так, длительность возникновения КЗ после начала однофазного замыкания при емкостном токе 100 А составляет 38 с. При прокладке кабелей с просветом создаются условия для самопогасания дуги, поэтому возникновение КЗ от однофазного замыкания, по сравнению с прокладкой треугольником вплотную, будет происходить медленнее или не наступит вовсе.

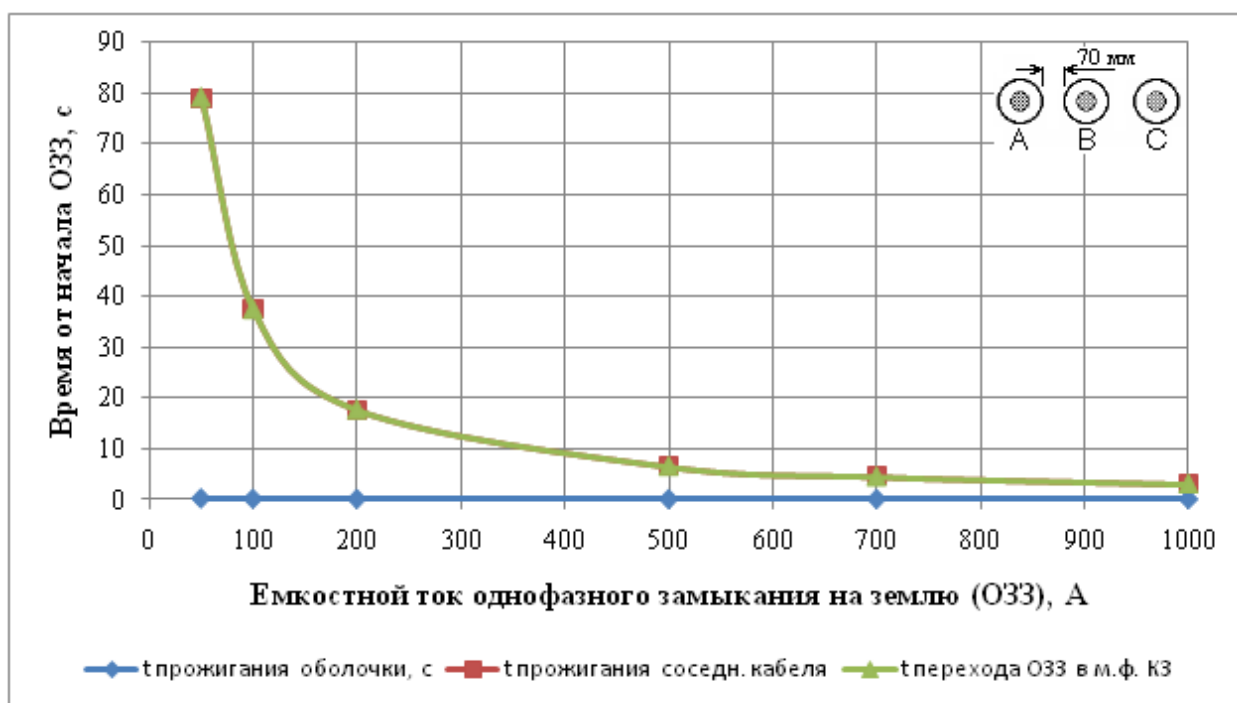


Рис. 10. Длительность перехода однофазного замыкания в междуфазное КЗ при прокладке одножильных кабелей горизонтально с просветом 70 мм

5 Рекомендации по предотвращению перехода однофазных замыканий на землю в междуфазные КЗ

Работа пофазно-экранированных кабелей в режиме с продолжительным существованием в сети однофазного замыкания на землю не возможна, так как однофазное замыкание на землю, при прокладке пофазно-экранированных кабелей вплотную треугольником, переходит в междуфазное КЗ за время менее 1 с, рис. 9. Главное достоинство сети с изолированной и компенсированной нейтралью – отсутствие необходимости немедленного отключения линии с однофазным замыканием на землю – не работоспособно.

Прокладка одножильных кабелей горизонтально с просветом, по сравнению с прокладкой треугольником без просвета, существенно снижает вероятность перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ. При наличии просвета между кабелями, электрическая дуга входит в контакт с землей и элементами конструкции кабельной траншеи, таким образом, дуга теряет энергию, создаются условия для самопогасания дуги, существенно снижается вероятность возникновения междуфазного КЗ в месте однофазного замыкания.

Однако для сетей 6-35 кВ прокладка пофазно-экранированных кабелей горизонтально с просветом связана с трудностями – происходит возрастание рабочих токов в экранах, таблица 1. Рекомендуется прокладка одножильных кабелей вплотную треугольником [10]. Для предотвращения явлений перехода однофазного замыкания в междуфазное КЗ приемлемым вариантом должно являться использование пофазно-экранированных кабелей в сетях с низкоомным резистивным заземлением нейтрали, оборудованных быстродействующими защитами от однофазных замыканий на землю, как рекомендуется в стандарте организации ОАО «ФСК ЕЭС» [11].

Заключение

Разработан способ применения эмпирических выражений стандарта IEEE Std 1584TM-2002 для численной оценки тепловыделения электродугового столба. Доказано, что использование эмпирических выражений позволяет адекватно оценить термическое действие дуги на изоляцию электроустановок.

Обосновано, что адекватное распределение температуры нагрева изоляции кабелей, при однофазном замыкании, достигается представлением электрической дуги в модели цилиндрической поверхностью с постоянным тепловым потоком через боковую поверхность цилиндра.

Разработана модель электродуговых процессов, возникающих при однофазных замыканиях на землю, позволяющая оценить тепловое действие электрической дуги на изоляцию пофазно-экранированных кабелей.

В нормальном режиме, в месте соприкосновения пофазно-экранированных кабелей среднего напряжения, проложенных треугольником без просвета, возникают локальные области перегрева рабочей изоляции промежутка жила-экран, в которых увеличивается вероятность возникновения повреждения изоляции между жилой и экраном.

Для пофазно-экранированных кабелей, проложенных треугольником без просвета, отсутствуют условия для самопогасания дуги. Всякое однофазное замыкание на землю в КЛ с пофазно-экранированными кабелями переходит в междуфазное КЗ. При токах однофазного замыкания 100 А и более время процесса составляет менее 1 с.

При прокладке кабелей горизонтально с просветом электрическая дуга входит в контакт с землей и элементами конструкции кабельной траншеи, имеются условия для ее самопогасания, однако прокладка кабелей с просветом не может быть использована на практике из-за увеличения рабочих токов в экранах.

Для предотвращения перехода однофазного замыкания в междуфазное КЗ следует одножильные пофазно-экранированные кабели 6-35 кВ применять только в сетях с низкоомным резистивным заземлением нейтрали и быстродействующим отключением однофазных замыканий на землю.

Список литературы:

1. IEEE Std 1584TM-2002. IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations. New York: IEEE, 2002. 121 p.
2. IEC/TR 60909-2. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations. Edition 2.0. Geneva: Publication of International Electrotechnical Commission, 2008. 43 p.
3. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. М.: ООО «КАБЕЛЬ», 2009. 328 с.
4. ELCUT в промышленности // Сайт ELCUT® Программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Санкт-Петербург, Россия. Режим доступа: http://elcut.ru/appl_r.htm (дата обращения 03.06.2013).
5. ГОСТ Р МЭК 60949-2009. Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. М.: Стандартинформ, 2009. 12 с.
6. Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория. М.: Энергия, 1970. 270 с.

7. Залесский А.М. Электрическая дуга отключения. М.: Госэнергоиздат, 1967. 320 с.
8. Рокотян Ю.В. Принципы и методы построение систем защит судовых ЭЭС : дис. ... канд. техн. наук. Л., ЦНИИ СЭТ, 1984. 150 с.
9. Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф., Околович М.Н. Электрическая часть станций и подстанций: учебник для вузов / Под ред. А.А. Васильева. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
10. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. СПб: Завод энергозащитных устройств, 2008. 104 с.
11. СТО 56947007-29.060.20.020-2009. Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ и выше / ОАО «ФСК ЕЭС». М., 2009. 50 с.

Arc-flash processes during single-phase faults in single-phase shielded cables

05, May 2013

DOI: 10.7463/0513.0598819

Antonov A.A., Gusev Yu.P.

Russia, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

AntonovAAn@mpei.ruGusevYP@mpei.ru

The aim of this research is to enhance reliability of power grids with single-phase shielded cables by preventing transition from a single-phase fault to a line-to-line short circuit. Arc-flash processes during a single-phase fault and sheath failure were analyzed in this study. Maximum duration of single-phase faults and its dependence on the method of cable installation were determined. The results of the study are important for estimating failure effects of single-phase faults on cables, for reducing maintenance and restoration costs of cable network. A mathematical simulation of electromagnetic and heat transient processes in a single-phase fault point was carried out using ELCUT software. The accuracy of the model was proved by a number of laboratory experiments with arcing short circuits. It was established that a single-phase fault transforms into a line-to-line short circuit for several seconds in case of a triangle configuration of three single-phase shielded cables with no gap between them. In order to prevent this process it was recommended to apply single-phase shielded cables of 6 – 35 kV to grids with low-resistance neutral grounding and with fast single phase-to-earth faults.

Publications with keywords: [distribution network with isolated and compensated neutral](#), [single-core XLPE cable](#), [earth fault](#), [program ELCUT](#), [thermal stability](#), [cables configuration](#), [arc](#)

Publications with words: [distribution network with isolated and compensated neutral](#), [single-core XLPE cable](#), [earth fault](#), [program ELCUT](#), [thermal stability](#), [cables configuration](#), [arc](#)

References

1. *IEEE Std 1584TM -2002. IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations*. New York, IEEE, 2002. 121 p.

2. IEC/TR 60909-2. *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations. Edition 2.0.* Geneva, Publication of International Electrotechnical Commission, 2008. 43 p.
3. Smelkov G.I. *Pozharnaya bezopasnost' elektroprovodok* [Fire safety of electrical wiring]. Moscow, Publication of LLC “KABEL”, 2009. 328 p.
4. *ELCUT v promyshlennosti* [ELCUT in industry]. Website ELCUT® Programma modelirovaniya elektromagnitnykh, teplovykh i mekhanicheskikh zadach [Software simulation of electromagnetic, thermal and mechanical problems]. St. Petersburg, Russia. Available at: http://elcut.ru/appl_r.htm , accessed 03.06.2013.
5. GOST R MEK 60949-2009. *Raschet termicheski dopustimyykh tokov korotkogo zamykaniya s uchetom neadiabacheskogo nagreva* [State Standard of RF 60949-2009 : IEC 60949:1988. Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects (IDT)]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 12 p.
6. Taev I.S. *Elektricheskie apparaty. Obshchaya teoriya* [Electrical apparatus. General theory]. Moscow, Energiya, 1970. 270 p.
7. Zalesskiy A.M. *Elektricheskaya duga otklyucheniya* [Electric rupturing arc]. Moscow, Gosenergoizdat, 1967. 320 p.
8. Rokotyay Yu.V. *Printsipy i metody postroenie sistem zashchit sudovykh EES*. Kand. diss. [Principles and methods of construction of systems of protection of ship EPS. Cand. diss.]. Leningrad, Central Research Institute of Ship Electrical Engineering and Technology, 1984. 150 p.
9. Vasil'ev A.A., Kryuchkov I.P., Nayashkova E.F., Okolovich M.N. *Elektricheskaya chast' stantsiy i podstantsiy* [Electric part of power stations and substations]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 576 p.
10. Dmitriev M.V. *Zazemlenie ekranov odnofaznykh silovykh kabeley 6-500 kV* [Grounding screens single-phase power cables 6-500 kV]. St. Petersburg, Plant of Energy Safety Devices Publ., 2008. 54 p.
11. STO 56947007-29.060.20.020-2009. *Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu silovykh kabeley s izolyatsiey iz sshitogo polietilena na napryazhenie 10 kV i vyshe* [Standard of organization 56947007-29.060.20.020-2009. Guidelines for use of power cables with XLPE insulation for voltage up to 10 kV and above]. Moscow, Publication of JSC «FSK EES», 2009. 50 p.