

А.В. Гринь, ведущий инженер-конструктор;

А.С. Мнека, технический директор;

А.В. Студенников, руководитель отдела технической поддержки проектов;

А.А. Филиппов, инженер отдела технической поддержки проектов;

ООО «Эстралин ПС»

Дополнительный провод заземления при одностороннем заземлении экранов силовых кабелей 100–500 кВ

Аннотация. Наведенное напряжение на экранах силовых кабелей при одностороннем заземлении может превышать допустимые значения, особенно при внешнем однофазном коротком замыкании. Применение дополнительного провода заземления (ЕСС) позволяет снизить величину наведённого напряжения и обеспечить безопасную эксплуатацию кабельной линии.

Ключевые слова: одностороннее заземление; снижение наведённого напряжения; дополнительный провод заземления; ЕСС (Earth continuity conductor).

Abstract. The induced voltage on the power cable screens with single-sided grounding may exceed the admissible values, especially in case of external single-phase fault. With the use of an earth continuity conductor (ECC) the induced voltage value may be reduced to ensure the safe operation of the cable line.

Key words: single-sided grounding; induced voltage reduction; earth continuity conductor (ECC).

Материал поступил в редакцию 30.01.2017

E-mail: info@estralin.com

При проектировании способа заземления кабельной линии (КЛ) необходимо принимать во внимание многие аспекты, а именно: сопротивление грунта, длину КЛ, длину провода заземления/транспозиции, расстояние между проводами транспозиции, величину наведённого напряжения на экранах кабелей и др.

В этой статье рассмотрим вопрос необходимости применения дополнительного провода заземления (ЕСС – Earth continuity conductor) при выполнении одностороннего заземления экранов силовых кабелей 110–500 кВ и его влияние на величину наведённого напряжения на экранах кабелей при внешнем коротком замыкании (КЗ). Под внешним КЗ понимается КЗ за пределами КЛ, при которых ток КЗ протекает по жиле кабеля.

В большинстве стран существуют национальные стандарты, регулирующие максимально допустимые наведённые напряжения на экранах кабелей. Кроме того, существуют рекомендации производителей. Это важный вопрос безопасности для самого оборудования КЛ и для персонала эксплуатирующей организации.

Максимальный уровень наведённого напряжения на экранах КЛ в России нормируется нормативным документом СТО 56947007-29.060.20.071–2011 «Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования» ПАО «ФСК ЕЭС», либо внутренними нормами эксплуатирующих организаций. Согласно СТО 56947007-29.060.20.071–2011 максимальная величина наведённого напряжения на экране при коротком замыкании не должна превышать 5–6 кВ.

На кабельных линиях используются три основных способа заземления экранов кабелей. При использовании двухстороннего заземления КЛ в экранах кабелей возникают дополнительные потери от протекания наведённого

тока, что приводит к снижению пропускной способности КЛ. При использовании транспозиции или одностороннего заземления потери в экранах кабелей существенно снижаются. В сравнительно коротких КЛ, в которых не требуется использовать соединительные муфты, или имеется только один колодец с соединительными муфтами, применение транспозиции экранов кабелей является экономически не эффективным. В этом случае схема заземления зависит от многих факторов, но наиболее подходящая схема будет включать в себя одну или несколько элементарных секций с односторонним заземлением экранов кабелей, то есть с экранами кабелей, заземлёнными для каждой элементарной секции только с одной стороны. Независимо от того, использована одна или более отдельных точек заземления экранов кабелей, система заземления, в сущности, остаётся системой с односторонним заземлением экранов кабелей.

В случае возникновения внешнего однофазного КЗ, ток КЗ протекает от источника по жиле кабеля до места возникновения КЗ. Ток КЗ будет искать «самый короткий» путь для возвращения к источнику. В случае двухстороннего заземления или транспозиции экранов кабелей самый простой путь протекания тока внешнего КЗ – через металлическую оболочку (экраны) кабелей. В случае одностороннего заземления экранов этот путь отсутствует. Единственным путём протекания тока КЗ в данном случае будет путь через землю. В связи с тем, что земля имеет большое сопротивление, возникает высокий уровень напряжения на незаземленном конце КЛ. Для снижения уровня этих напряжений в случае КЗ параллельно кабельной линии прокладывается дополнительный провод заземления. ЕСС должны быть расположен таким образом, чтобы минимизировать продольные токи при нормальной работе КЛ и минимизировать полное сопротивление нулевой

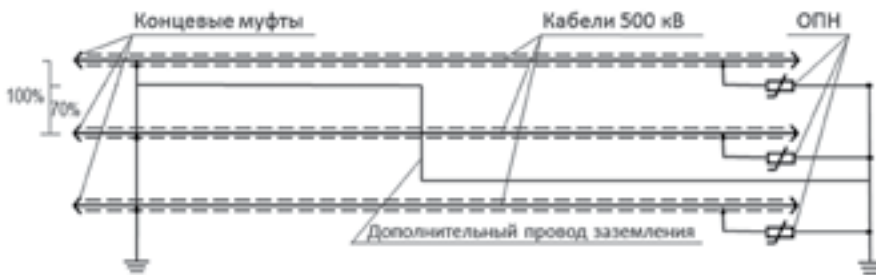


Рис. 1. Пример прокладки дополнительного провода заземления при расположении кабелей в плоскости, где ОПН – ограничитель перенапряжения

S_{12} – расстоянием между фазой 1 и фазой 2;
 S_{23} – расстоянием между фазой 2 и фазой 3;
 S_{13} – расстоянием между фазой 1 и фазой 3;
 ω – круговая частота;
 $j = \sqrt{-1}$ – мнимое число;
 μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

Наиболее тяжёлым случаем при одностороннем заземлении является случай внешнего однофазного короткого замыкания. В этом случае отсутствует путь

для возвращения тока КЗ назад к источнику и весь ток возвращается по земле. Напряжение на экране кабеля при внешнем однофазном коротком замыкании можно рассчитать по формуле (2).

$$U_s = I_{SC1} \left(R_g + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{2D_g}{d} \right) \quad \text{В / м} \quad (2)$$

где I_{SC1} – ток однофазного короткого замыкания;
 d – средний диаметр экрана;
 $j = \sqrt{-1}$ – мнимое число;
 ω – круговая частота;
 μ_0 – магнитная проницаемость воздуха;
 R_g – эквивалентное сопротивление переменному току пути протекания тока в земле;
 D_g – глубина протекания обратного тока в земле.

При использовании дополнительного провода заземления, проложенного параллельно КЛ, появляется путь для протекания тока КЗ назад к источнику. В данном случае будем считать, что весь ток возвращается по ЕСС. Величину наведённого напряжения на незаземленном конце КЛ при внешнем однофазном КЗ и при использовании ЕСС можно определить по формуле (3). Выполнена транспозиция провода ЕСС в центре КЛ.

$$U_s = I_{SC1} \left(R_c + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{2 \cdot S_{ef}^2}{d \cdot \gamma_c} \right) \quad \text{В / м} \quad (3)$$

где I_{SC1} – ток однофазного короткого замыкания;
 d – средний диаметр экрана;
 γ_c – средний геометрический диаметр ЕСС;
 S_{ef} – расстоянием между ЕСС и фазой, в которой произошло однофазное КЗ;
 R_c – сопротивление дополнительного провода заземления;
 $j = \sqrt{-1}$ – мнимое число;
 ω – круговая частота;
 μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

Результаты расчёта наведённого напряжения на экранах КЛ длиной 500 м представлены в таблице. В расчётах в качестве ЕСС использовался кабель марки ПП 1×400 (гж).

Как видно из результатов расчётов, величина наведённого напряжения при внешнем однофазном КЗ без использования провода ЕСС составляет 15,9 кВ, что превышает нормы, указанные в нормативном документе СТО 56947007-29.060.20.071–2011. При таком уровне наведённого напряжения произойдет срабатывание ОПН,

последовательности КЛ. Укладка ЕСС должна осуществляться как можно ближе к фазам кабеля, и необходимо выполнять транспозицию ЕСС в середине КЛ для максимального снижения наведенных напряжений. Место транспозиции провода зависит от расположения кабелей трёх фаз на трассе КЛ и от конкретных условий прокладки КЛ.

Места заземления экранов кабелей при одностороннем заземлении должны быть соединены с использованием минимум одного ЕСС, проложенного по всей длине на каждой КЛ с односторонним заземлением экранов кабелей. В некоторых случаях при высоких уровнях наведённого напряжения возможно применение двух ЕСС.

Такой способ соединения контуров заземления описан в рекомендациях Electricity Association (EA) от 1989 г. [1], публикации ELECTRA 128 от 1990 г. [2], публикации CIGRE (Brochure 283) от 2005 г. [3], в техническом документе компании Südkabel GmbH (Германия) E103-02e от 2010 г. [4].

В случае прокладки кабелей трёх фаз одной КЛ в воздухе в одной плоскости, в указанных выше публикациях рекомендует располагать дополнительный провод заземления так, как показано на рис. 1.

Как правило, в случае отсутствия каких-либо ограничений расчет сечения жилы дополнительного провода заземления выполняется в соответствии с МЭК 60949 «Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учётом неадиабатического нагрева».

Для примера рассмотрим КЛ 110 кВ, проложенную кабелем марки ПвПу2г 1×1000(гж)/265 – 64/110 кВ. Длина кабельной линии 500 м, ток короткого замыкания 50 кА, прокладка кабеля треугольником вплотную. В качестве провода заземления используется кабель ПП 1×400 (гж) производства ООО «Эстралин ЗВК» (Россия). Расчеты выполнены согласно методикам, представленным в CIGRE (Brochure 283) от 2005 г. [3] и ELECTRA 128 от 1990 г. [2].

Напряжение на экране кабеля при трёхфазном коротком замыкании можно рассчитать по следующим формулам (1).

$$\begin{aligned} U_1 &= I_{SC3} \left[-\frac{1}{2} j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{2S_{12}^2}{d \cdot S_{13}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{2S_{13}}{d} \right] \\ U_2 &= I_{SC3} \left[j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{4 \cdot S_{12} S_{23}}{d^2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{S_{23}}{S_{12}} \right] \\ U_3 &= I_{SC3} \left[-\frac{1}{2} j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{2S_{23}^2}{d \cdot S_{13}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{2S_{13}}{d} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

где I_{SC3} – ток трёхфазного короткого замыкания;
 d – средний диаметр экрана;

Таблица

Расчетный случай	Напряжение, кВ
Способ прокладки кабеля	В траншее треугольником вплотную
Трёхфазное КЗ	1,4
Внешнее однофазное КЗ	15,9
Внешнее однофазное КЗ с ЕСС	5,3

установленного на экране кабеля, что может привести к выходу из строя ОПН, вследствие протекания тока КЗ через ОПН. При использовании ЕСС величина наведённого напряжения значительно снижается и при прокладке в траншее треугольником вплотную не превышает установленное значение.

В нашей стране данная система заземления нашла наиболее широкое применение на КЛ 500 кВ с применением кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена производства компании Südkabel GmbH.

Впервые система была использована на КЛ 500 кВ на Бурейской ГЭС в Амурской области в 2005 г. В дальнейшем – на КЛ 500 кВ на ТЭЦ 26 в Москве, на Богучанской ГЭС в Красноярском крае, на Загорской ГАЭС в Московской области и на КЛ 500 кВ Очаково – Западная в Москве (вторая очередь).

На всех этих объектах было выполнено одностороннее заземление экранов кабелей или присутствовали участки

с односторонним заземлением. При выполнении одностороннего заземления использовался ЕСС с медной жилой сечением 400 мм² и полиэтиленовой изоляцией (на Бурейской ГЭС, ТЭЦ 26 и на Богучанской ГЭС провод марки 2У 1×400 производства компании Südkabel GmbH, на Загорской ГАЭС и КЛ 500 кВ Очаково – Западная (вторая очередь) провод ПП 1×400 (гж) производства ООО «Эстралин ЗВК» (Россия).

Расположение дополнительного провода заземления выбиралось в зависимости от конкретного расположения кабелей трёх фаз на трассе КЛ. При выборе места расположения дополнительного провода заземления относительно силовых кабелей главной задачей было обеспечение снижения наведённого напряжения за счёт его транспозиции.

В качестве примера на рис. 2 показано, что при расположении силовых кабелей треугольником вплотную и закреплении их кабельными хомутами дополнительный провод заземления располагается снаружи, сбоку между кабелями двух соседних фаз, и меняет своё расположение на середине участка.

Для скрепления фаз кабелей, проложенных треугольником вплотную, может использоваться полиэфирная бандажная лента, армированная стекловолокном типа P-162 фирмы Intertape, намотанная в 5–6 слоев. Данное крепление обычно выполняется через 1 м и располагается между местами жесткого крепления кабеля (рис. 3).

При расположении кабелей в вертикальной плоскости ЕСС располагается, как указано на рис. 1. Для крепления ЕСС на металлоконструкциях при таком способе прокладки могут использоваться кабельные крепления из немагнитных материалов.

Опыт использования ЕСС на указанных выше объектах может быть использован в дальнейшем при проектировании КЛ 110–500 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Insulated sheath power cable systems / EA Electricity Association ENGINEERING REKOMMENDATION. – 1989. – 61 p.
2. Guide to the protection of specially bonded cable systems against sheath overvoltages / ELECTRA 128, Working Group 07 of Study committee 21. – January 1990. – 16 p.
3. Special Bonding of High Voltage Power Cables / CIGRE 283, Working Group B1.18. – October 2005. – 105 p.
4. Philosophy of use of an ECC (earth continuity conductor) / Technical Document E103-02e, Südkabel GmbH. 18.10.2010. URL: <http://www.suedkabel.de> (дата обращения 28.01.2017).

Кабели 500 кВ

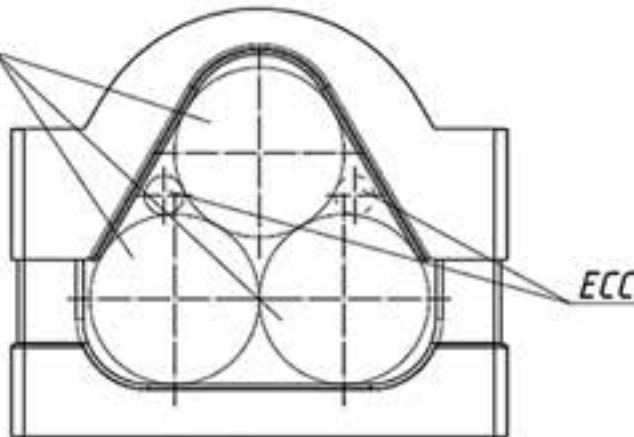


Рис. 2. Расположение дополнительного провода заземления снаружи сбоку при укладке кабелей треугольником вплотную при использовании кабельного хомута

Кабели 500 кВ

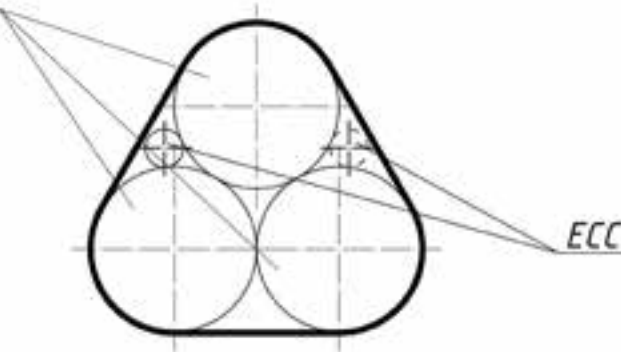


Рис. 3. Расположение дополнительного провода заземления снаружи сбоку при укладке кабелей треугольником вплотную при использовании бандажной ленты P-162