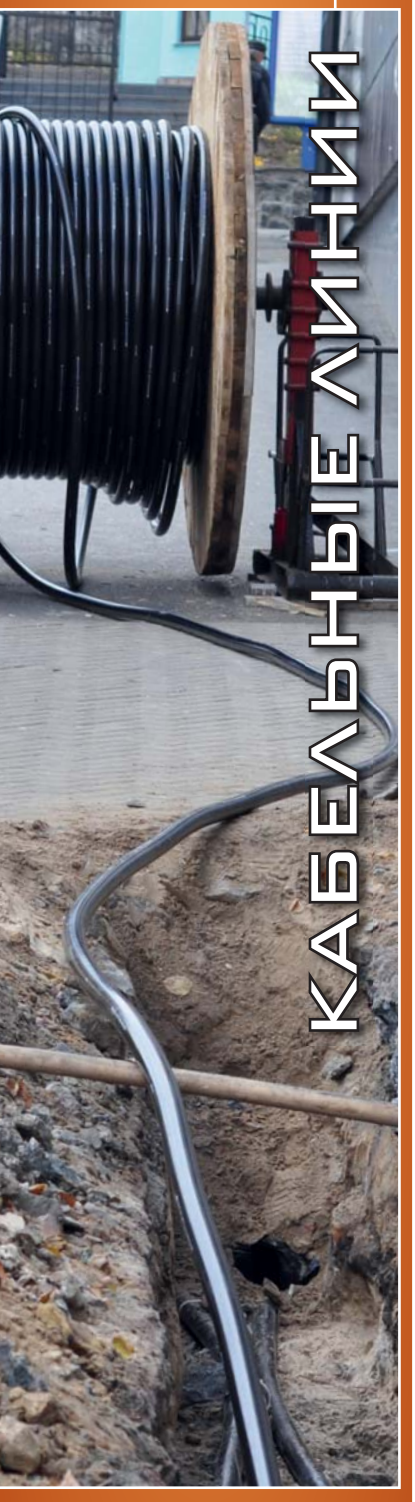


Продольные параметры кабельных линий 6–500 кВ

УДК 621.315.21

Отечественная и зарубежная кабельная промышленность научились производить качественные и надежные кабели, однако, к сожалению, этого недостаточно для того, чтобы быть уверенным в тех кабельных линиях и кабельных сетях, которые вводятся в эксплуатацию. Помимо навыков изготовления кабелей, важно обеспечить грамотное проектирование, прокладку, эксплуатацию линий, и вот при решении перечисленных задач повсеместно возникают серьезные ошибки, приводящие порой к значительному экономическому ущербу. В статье обсудим такую важную часть проекта, как определение продольного электрического сопротивления кабельной линии.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент

Ключевые слова:
кабельная линия, однофазный кабель, трехфазный кабель, сшитый полиэтилен, заземление экранов, транспозиция экранов

Продольные сопротивления кабельной линии (КЛ) имеют активно-индуктивный характер. Следует различать два продольных сопротивления КЛ:

– по прямой (обратной) последовательности;
– по нулевой последовательности.

Неверное представление о сопротивлениях КЛ может иметь серьезные последствия как для самой КЛ и подключенных к ней потребителей, так и для всей электрической сети. Например, от сопротивлений КЛ зависят:

– потери активной мощности и нагрев кабелей;
– потери реактивной мощности и ее баланс в сети;
– падение напряжения вдоль КЛ, а значит уровни напряжения в узлах сети, в том числе у потребителей;
– токи короткого замыкания (КЗ) сети и связанный с этим выбор выключателей, а также определение минимально допустимых сечений токоведущих частей, в том числе жил и экранов самих кабелей;
– корректность рассчитываемых параметров настройки (уставок) устройств РЗА.

Ошибки (и даже небольшие неточности) в расчете продольных сопротивлений КЛ могут приводить не только к неоптимальной работе КЛ и всей сети, но и к куда как более серьезным последствиям, среди которых:

– перегрев кабелей выше предельно допустимых температур изоляции (с последующей необходимостью полной перекладки всей КЛ);
– пожары;
– электротравматизм;
– отказ выключателей и другие сетевые аварии.

Перечисленный список последствий демонстрирует чрезвычайную важность иметь четкое представление об активно-индуктивных сопротивлениях КЛ по прямой и нулевой последовательностям и способах определения этих сопротивлений. К сожалению, такого представления нет ни в России, ни в других странах. Сложившиеся ситуация, когда более чем за 20–25 лет массового применения современных кабе-

лей с твердой изоляцией (СПЭ и ЭПР) в энергетике до сих пор еще не внедрены понятные методы расчета продольных сопротивлений, не может не вызывать серьезного беспокойства Системного оператора ЕЭС (СО ЕЭС) и других профильных организаций.

На протяжении ряда последних лет специалисты СО ЕЭС занимаются уточнением методов расчета параметров современных КЛ, внедряют данные методы при построении моделей сетей различных классов напряжения, сопоставляют результаты расчетов с теми экспериментальными данными по нормальным и аварийным режимам (например, КЗ), которые были зафиксированы в сетях страны. В данной статье авторы хотели бы привлечь внимание к проблеме определения продольных сопротивлений современных КЛ 6–500 кВ и призвать специалистов отрасли разделить обеспокоенность СО ЕЭС.

КАБЕЛЬНЫЕ КАТАЛОГИ

Ключевым источником информации о сопротивлениях КЛ традиционно считаются каталоги кабельных заводов, и как раз именно использование таких каталогов (в части определения сопротивлений КЛ) приводит к ошибкам. С сожалением авторы вынуждены призывать не доверять каталожным значениям сопротивлений КЛ или, по меньшей мере, относиться к ним настороженно. Почему так? Во-первых, в самих каталогах сказано, что приведенная там информация носит оценочный характер и не является окончательной.

Во-вторых, известные каталоги предлагают сопротивления КЛ только по прямой последовательности, не давая параметры нулевой, что зачастую приводит пользователей каталогов к совершенно ошибочному и даже опасному предположению, что параметры нулевой последовательности совпадают с прямой (на самом деле сопротивление нулевой последовательности может в разы отличаться от сопротивления прямой [1]).

В-третьих, в каталогах в качестве исходных данных, которые влияют на параметры КЛ, рассмотрены только сечение и материал жилы, а также расстояние между фазами КЛ (оно важно, если кабели однофазной конструкции), что означает, что каталоги никак не учитывают процессов в экранах КЛ и броне. Вместе с тем, процессы в экранах (и броне) КЛ зачастую играют ключевую роль, причем не только для однофазных кабелей, но и для трехфазных. Поэтому, если каталоги игнорируют процессы в экранах и броне (это хорошо видно по отсутствию в каталожных таблицах с сопротивлениями КЛ даже упоминания о принятом в расчетах сечении/материале экранов и брони), то приведенными в каталогах сопротивлениями КЛ пользоваться не рекомендуется, так как они, к сожалению, могут до нескольких раз отличаться от реальных.

ВЛИЯНИЕ ЭКРАНОВ И БРОНИ НА СОПРОТИВЛЕНИЯ КЛ

Токи в экранах (и броне), наведенные там за счет действия переменного магнитного поля тока жилы, вызывают потери активной мощности в экранах (и броне). Как следствие, в кабелях к потерям мощности в жилах добавляются потери мощности в экранах (и броне), и таким образом результирующее активное сопротивление КЛ увеличивается [1].

Продольные токи в экранах (и проволочной броне из алюминия или его сплава), наведенные за счет действия переменного магнитного поля (50 Гц) тока жилы, обычно направлены встречно току жилы и поэтому ослабляют магнитное поле КЛ. Как следствие, результирующая индуктивность КЛ снижается [1].

Если броня КЛ изготовлена не из проволочной, а из стальной ленты (характерно для некоторых трехфазных кабелей), то влияние брони на сопротивление КЛ учесть сложно, особенно если лента выполнена из магнитных материалов.

Токи в экранах (и броне), а значит степень их влияния на активное и индуктивное сопротивление КЛ, определяются по меньшей мере следующими ключевыми факторами:

– конструкция кабеля (однофазная, трехфазная);
– схема заземления экранов (у трехфазных кабелей — двустороннее заземление, тогда как у однофазных — двустороннее заземление, одностороннее или транспозиция [1]);
– сечение и материал экрана (медь, алюминий);
– конструкция брони (проволочная, ленточная), ее сечение и материал (магнитный или немагнитный);
– схема заземления брони (иногда отказываются от двустороннего заземления брони).

Авторам не известно ни одного кабельного каталога, где в таблицах с параметрами КЛ была бы хотя бы информация о том, а при каком сечении и материале экранов данные параметры КЛ были получены. Вместе с тем, учет экранов может увеличивать активное сопротивление КЛ в 3–5 раз, и снижать индуктивное сопротивление КЛ до 2 раз [1]. Учет брони (при ее наличии), в дополнение к экранам, еще больше изменяет активно-индуктивные сопротивления КЛ.

Современные кабельные заводы производят прекрасные надежные кабели, но вот в деле расчета параметров КЛ пока ситуация не такая хорошая, что неудивительно, ведь основная задача заводов — производство продукции, а не научные исследования в сферах, сопряженных с применением кабелей в электрических сетях. Поэтому заводы и приводят в своих каталогах лишь очень приближенные значения сопротивлений КЛ, справедливые для самых простых расчетных случаев, в которых не требуется учет сложных процессов в проводящих экранах (и броне) с учетом схем их соединения/заземления, а также той или иной последовательности (прямая/нулевая).

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Нормативные документы, как правило, разрабатываются организациями, которые имеют достаточный научный потенциал, и, казалось бы, уж им-то точно можно доверять. Например, в деле расчета параметров КЛ можно порекомендовать обратить внимание на следующие материалы:

– РД [2];
– СТО [3] и [4];
– техническая брошюра СИГРЭ [5].

Документ [2] введен в действие в 1979 году, этому документу более 45 лет, и он относится к тому времени, когда в сетях применялись прежде всего кабели с бумажно-пропитанной изоляцией, а также маслонаполненные кабели. Использовать этот документ для расчета параметров современных кабелей с твердой изоляцией (СПЭ или ЭПР) не представляется возможным.

Документы [3] и [4] введены в действие в 2009 и 2011 годах, соответственно. Они достаточно современные, однако они имеют те же проблемы, что кабельные каталоги, то есть не учитывают влияние процессов в экранах (и броне) и не обеспечивают различия между сопротивлениями прямой и нулевой последовательности.

Документ [5] опубликован в 2013 году. Его недостаток в том, что он содержит такие сложные математические выражения, что пользоваться ими для повседневных расчетов сопротивлений КЛ едва ли оправданно (есть риск неверного определения параметров КЛ не потому, что выражения не учитывают какого-то из ключевых влияющих факторов, а уже по причине чрезмерной сложности выражений и возможных ошибок и опечаток при их разработке, написании, использовании).

Итак, несмотря на наличие сразу нескольких нормативных документов, применять их для расчета продольных сопротивлений современных КЛ (с СПЭ- или ЭПР-изоляцией) затруднительно или даже невозможно. Имеющиеся нормы или создавались десятки лет назад для старых поколений кабелей, или же (хотя и современные) не учитывают всех ключевых исходных данных, или же излишне сложные. В качестве выхода из сложившей ситуации кажется разумным обратиться к помощи компьютерного моделирования КЛ.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ

Обычно инженеры с легкостью готовы поверить компьютерным программам, хотя алгоритмы их работы во многих случаях разработчиками не раскрываются, и применение такого «кота в мешке» может обойтись собственникам КЛ в десятки миллионов рублей. При этом цена лицензии на использование программы, какой бы большой не была, сама по себе не является гарантией корректности получаемых результатов.

Опираясь на многолетний опыт работы с кабелями, можем сказать, что почти не встречали программ расчета сопротивлений КЛ, которые задавали бы пользователю тот минимальный список упомянутых ранее вопросов, ответы на которые, в конечном счете, и предопределяют продольные параметры КЛ. Например, если программа не спрашивает о сечении экранов и брони, то значит она и не учитывает этих сечений в своих расчетах, и значит доверять сопротивлениям КЛ, полученным в такой программе, можно не более, чем типовому каталогу кабельного завода.

Из всех программ, которые нам известны и могли бы быть использованы в расчетах сопротивлений КЛ, более-менее доверие вызывают только две:

– российская программа-калькулятор ЭКРАН;
– канадская программа моделирования сетей EMTP.

Обе программы не являются идеальными, поскольку не позволяют рассчитать все известные конструкции кабелей. Однако, несмотря на явные недостатки, обе программы хотя бы имеют открытые алгоритмы работы и дают близкие друг другу результаты. Кроме того, обе они являются бесплатными (для EMTP также имеется и новая платная версия). Чтобы решить проблему расчета параметров, в СО ЕЭС инициирована разработка своего программного обеспечения, лишенного недостатков упомянутых выше аналогов.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ТИПОВ КАБЕЛЕЙ

Расчет продольных сопротивлений КЛ современной конструкции (с изоляцией из СПЭ и ЭПР) требуется для каждого из многочисленных типов кабелей, выпускаемых для сетей классов 6–500 кВ. Однако, в первую очередь, расчет требуется для следующих типов кабелей, наиболее распространенных в России и за рубежом:

– однофазные кабели 6–500 кВ (рисунок 1, без элемента 7);
– однофазные кабели 6–500 кВ с проволочной бронеей (рисунок 1);
– трехфазные кабели 6–35 кВ (рисунок 2, без элемента 7);
– трехфазные кабели 6–35 кВ с проволочной бронеей (рисунок 2).

На рисунках 1 и 2 использованы следующие обозначения: 1 — жила; 2 — полупроводящий слой по жиле; 3 — изоляция (СПЭ или ЭПР); 4 — полупроводящий слой по изоляции; 5 — экран; 6 — разделительный слой (или заполнение); 7 — броня; 8 — наружная оболочка.

Любой из перечисленных типов кабелей имеет индивидуальные экраны 5 (из меди или алюминия), накладываемые поверх изоляции каждой из трех фаз (A, B, C). Для такого экрана сечение может варьироваться в широком диапазоне значений от 16 мм^2 до 300 мм^2, и процессы в экранах, как уже отмечалось ранее, оказывают заметное влияние на итоговые продольные сопротивления КЛ по прямой и нулевой последовательности. Единственный случай, когда экраны можно не учитывать — однофазные кабели, имеющие одностороннее заземление экранов, однако такой способ соединения экранов применяется только для КЛ длиной до 0,5–1,0 км, и столь короткие КЛ практически не влияют на режим работы сети (на уровни напряжений в узлах сети и величины токов КЗ сети).

В книге [6] обоснована относительно простая методика определения продольных сопротивлений КЛ для четырех основных конструкций современных кабелей, дающая хорошее (до 5%) совпадение с EMTP и, что важно, с результатами, полученными в результате анализа процессов в действующих электрических сетях страны (в архивах СО ЕЭС есть доста-



Рис. 1. Однофазный бронированный кабель



Рис. 2. Трехфазный бронированный кабель

точное число сетевых измерений и осциллограмм). В книге [6] величины $\dot{Z}_1$ и $\dot{Z}_0$ — это сопротивления каждой из цепей КЛ, а эквивалентные сопротивления Q параллельных цепей будут $\dot{Z}_1/Q$ и $\dot{Z}_0/Q$.

ОДНОФАЗНЫЕ КАБЕЛИ

Для расчета комплексных активно-индуктивных сопротивлений КЛ согласно [6] нужны следующие вспомогательные величины: $\dot{Z}_Ж$ — собственное сопротивление жилы; $\dot{Z}_Э$ — собственное сопротивление экрана; $\dot{Z}_{ЖЭ}$ — взаимное сопротивление между жилой и экраном; $\dot{Z}_К$ — взаимное сопротивление между фазами одной и той же цепи КЛ; $\dot{Z}_{К12}$ — взаимное сопротивление между соседними цепями КЛ.

Прямая последовательность:

– для двустороннего заземления экранов

$$\dot{Z}_1 = (\dot{Z}_Ж - \dot{Z}_К) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ} - \dot{Z}_К)^2}{\dot{Z}_Э - \dot{Z}_К};$$

– для одностороннего заземления экранов или транспозиции экранов

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_Ж - \dot{Z}_К.$$

Нулевая последовательность:

– для двустороннего заземления экранов или транспозиции экранов

$$\dot{Z}_0 = (\dot{Z}_Ж + 2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12}) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ} + 2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12})^2}{(\dot{Z}_Э + 2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12}};$$

– для одностороннего заземления экранов

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_Ж + 2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12}.$$

ОДНОФАЗНЫЕ КАБЕЛИ С БРОНЕЙ

Для однофазных бронированных кабелей транспозиция (экранов и/или брони) не применяется — такие кабели обычно имеют двустороннее заземление экранов и брони или же (в ряде случаев) их одностороннее заземление. В роли вспомогательной величины $\dot{Z}_Э$ здесь используется не собственное сопротивление экрана, а собственное сопротивление эквивалента экрана и брони — это позволяет проводить расчеты параметров по тем же формулам, что приведены выше для обычных однофазных (небронированных) кабелей.

ТРЕХФАЗНЫЕ КАБЕЛИ

Прямая последовательность:

$$\dot{Z}_1 = (\dot{Z}_Ж - \dot{Z}_К) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ} - \dot{Z}_К)^2}{\dot{Z}_Э - \dot{Z}_К}.$$

Нулевая последовательность:

$$\dot{Z}_0 = (\dot{Z}_Ж + 2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12}) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ} + 2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12})^2}{\dot{Z}_Э + 2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12}}.$$

ТРЕХФАЗНЫЕ КАБЕЛИ С БРОНЕЙ

Для трехфазных бронированных кабелей экран и броня всегда имеют двустороннее заземление, а одностороннее заземление и транспозиция не применяются. В выражениях используются следующие новые вспомогательные величины: $\dot{Z}_Б$ — собственное сопротивление брони; $\dot{Z}_{КБ}$ — взаимное сопротивление между жилой (экраном) и броней.

Прямая последовательность. Расчет $\dot{Z}_1$ ведется по той же приведенной выше формуле, по которой определяется сопротивление обычного трехфазного (небронированного) кабеля.

Нулевая последовательность:

$$\dot{Z}_0 = (\dot{Z}_Ж - \dot{Z}_{ЖЭ}) - (\dot{Z}_{ЖЭ} - \dot{Z}_Э) \times \frac{\left(\dot{Z}_{ЖЭ} + (2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12}) - 3\frac{(\dot{Z}_{КБ} + (Q-1)\dot{Z}_{К12})^2}{(\dot{Z}_Б + (Q-1)\dot{Z}_{К12})}\right)}{\left(\dot{Z}_Э + (2\dot{Z}_К + 3(Q-1)\dot{Z}_{К12}) - 3\frac{(\dot{Z}_{КБ} + (Q-1)\dot{Z}_{К12})^2}{(\dot{Z}_Б + (Q-1)\dot{Z}_{К12})}\right)}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Корректный расчет продольных активно-индуктивных сопротивлений КЛ 6–500 кВ действительно важен для решения задач, стоящих перед СО ЕЭС и другими отраслевыми организациями страны. К сожалению, расчет параметров современных КЛ, выполненных кабелями с изоляцией из СПЭ или ЭПР, во многих случаях пока осуществляется неверно, так как не учитывает:

– влияния проводящих экранов и брони;
– различия параметров последовательностей.

Исправление ситуации вполне возможно, поскольку необходимые математические выражения уже разработаны и верифицированы с привлечением накопленной в СО ЕЭС информации о нормальных и аварийных режимах сетей. Далее планируется работа по созданию современных руководящих документов и программ расчета продольных параметров КЛ 6–500 кВ различной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Продольные параметры кабельных линий 6–500 кВ с однофазными кабелями // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2018, № 1(46). С. 84–90.
2. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.
3. СТО 56947007-29.060.20.020-2009. Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ и выше. URL: http://www.skonline.ru/doc/60040.html.
4. СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования. URL: https://xlpe.org/documents/standards/CTO_56947007-29.060.20.071-2011.pdf.
5. CIGRE Technical Brochure 531 «Cable Systems Electrical Characteristics», 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/271448370.
6. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. СПб.: Изд-во Политех-ПРЕСС, 2021. 688 с.

REFERENCES

1. Dmitriev M.V. Longitudinal parameters of 6-500 kV cable lines with single-phase cables // *ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredeleniye* [ELECTRIC POWER. Transmission and Distribution], 2018, no. 1(46), pp. 84-90. (In Russian)
2. Calculation of fault currents for relay protection and system automation in 110–750 kV. Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p. (In Russian)
3. Company standard STO 56947007-29.060.20.020-2009. Methodical guidelines on application of XPLE power cables for 10 kV and higher voltage. URL: http://www.skonline.ru/doc/60040.html.
4. Company standard STO 56947007-29.060.20.071-2011. 110-500 kV power cable lines. Construction terms. Norms and requirements. URL: https://xlpe.org/documents/standards/CTO_56947007-29.060.20.071-2011.pdf.
5. CIGRE Technical Brochure 531 «Cable Systems Electrical Characteristics», 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/271448370.
6. Dmitriev M.V. High voltage cable lines. St. Petersburg: Polytech-PRESS, 2021, 688 p.

Романов В.С., Гольдштейн В.Г.



Повышение эффективности эксплуатации погружных электроустановок нефтедобычи

В книге рассматриваются проблемы эффективности эксплуатации и обеспечения технического состояния погружных электроустановок (ПЭУ) нефтедобычи и реализации путей ее повышения с учетом обобщения и анализа опыта их эксплуатации. Производится классификация и анализ результатов эксплуатационных физических воздействий на ПЭУ, их сопоставление со статистическими данными эксплуатации и формулируются практические мероприятия и рекомендации, направленные на обеспечение и повышение надежности ПЭУ. Книга предназначена для инженерно-технического персонала эксплуатации и проектирования электроснабжения погружного электрооборудования в нефтедобыче, а также преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов бакалавриата и магистратуры электротехнических специальностей вузов.

Издательство журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», 2023. 192 с.

Книга доступна на сайте издательства www.eepir.ru