

ПЕРЕХОД ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 20 кВ В МЕЖДУФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

ГЛАЗУНОВ К.Г., ГУСЕВ О.Ю., ГУСЕВ Ю.П., НИУ «МЭИ», кафедра «Электрические станции»

В распределительных электрических сетях напряжением 20 кВ преимущественно используются однофазные экранированные кабели АПвПу-1х500/70-20 и АПвПнг-1х240/50-20, прокладываемые в траншеях треугольником без просвета [1]. В отличие от воздушных линий, однофазные замыкания (ОЗ) в таких кабельных линиях возникают не между фазным проводником и землей, а между фазным проводником и экраном кабеля, поэтому называть их однофазными замыканиями на землю не логично. Такие ОЗ в кабелях происходят намного чаще, чем междуфазные короткие замыкания, что обусловлено наличием между фазными проводниками, дополнительно к двум слоям жильной изоляции, двух слоев покровной изоляции и двух экранов.

Ключевые слова: кабельные линии 20 кВ, резистивное заземление нейтрали, однофазные замыкания (ОЗ), переход в междуфазные замыкания

В распределительных сетях с низкоомным резистивным заземлением нейтрали ОЗ на кабельных линиях первого, второго и третьего пояса отключаются выключателями питающих центров под действием токовых защит нулевой последовательности (ТЗНП) с задержкой срабатывания 1,0–1,5 с, сразу вест «куст» кабельных линий. Междуфазные короткие замыкания отключаются максимальными токовыми защитами (МТЗ)

с задержкой срабатывания 1,5–2,5 с. Предполагается, что ОЗ должны отключаться раньше, чем электрическая дуга прожёт покровную изоляцию соседнего кабеля, нагреет жильную изоляцию соседнего кабеля до температуры, при которой происходит ее электрический пробой и возникает междуфазное короткое замыкание [2], рис. 1.

Для повышения надежности электроснабжения потребителей, в распре-

делительных сетях с резистивнозаземленной нейтралью целесообразно использовать селективные ТЗНП, позволяющие отключать ОЗ не только выключателями на питающих центрах, но и выключателями на распределительных пунктах, соединительных и трансформаторных подстанциях. В зависимости от конфигурации сети и наличия секционирующих выключателей, количество ступеней ТЗНП в сети будет равно одиннадцати и более. При ступени селективности 0,5 с максимальная продолжительность ОЗ окажется 5,5 с и более. Чем больше задержка срабатывания ТЗНП, тем больше вероятность перехода ОЗ в междуфазные, после которых придется вскрывать траншею кабельной линии на большей длине и увеличивать длину ремонтной вставки.

Возникают вопросы:

- следует ли заменять три кабеля или достаточно заменять только кабель, в котором возникло ОЗ?;
- на каком расстоянии от места повреждения следует вырезать поврежденные кабели?

Научно обоснованные ответы на эти вопросы отсутствуют.



Рис. 1. Характер повреждений кабеля АПвПуг-1х120/35-10 в результате ОЗ с током 340 А, перешедшего, через 2 с в двухфазное короткое замыкание

В статье представлены результаты расчетно-теоретического исследования тепловых полей в трехфазной кабельной линии, при переходе ОЗ в двухфазное короткое замыкание. Целью исследования являлось определение температур в кабелях АПВПу-1х500/70-20, при возникновении ОЗ с током 1000 А, определение продолжительности нагрева жильной изоляции кабеля, соприкасающегося с поврежденным кабелем, до температуры, при которой происходит ее электрический пробой. Задачей исследования также являлось определение температуры покровной и жильной изоляций кабелей трехфазной линии, при отключении ОЗ через 1 с после его возникновения, с целью оценки необходимости замены кабелей, соприкасающихся с поврежденным кабелем. Полученные расчетные значения продолжительности перехода ОЗ в двухфазное короткое замыкание можно использовать для координации параметров срабатывания селективных ТЗНП и МТЗ в распределительных сетях с резистивнозаземленной нейтралью.

Расчеты тепловых полей выполнены на специально разработанной, на основе программы ELCUT [3], конечно-элементной расчетной модели с 17098 узлами, рис. 2.

Для параметризации расчетной модели использованы каталожные данные кабелей АПВПу-1х500/70-20, рис. 3. Толщины жильной изоляции, экрана и покровной изоляции равны, соответственно: 5,5 мм, 1,5 мм и 2,7 мм.

Термодинамические параметры элементов расчетной модели определены с помощью нейро-сети [4]: для алюминиевой токоведущей жилы теплоемкость 920 Дж/кг·К, плотность 2712 кг/м³, теплопроводность 237 Вт/К·м; для медного экрана, соответственно, 400 Дж/кг·К, 8900 кг/м³, 401 Вт/К·м; для жильной и покровной изоляции из сшитого полиэтилена температура пиролиза 250 °С, теплопроводность 0,41 Вт/К·м, теплоемкость 1920 Дж/кг·К, плотность 950 кг/м³. Для грунта теплоемкость принята равной 194 Дж/кг·К, плотность 1500 кг/м³, теплопроводность 0,6 Вт/К·м. Температура дугового столба принята равной 6000 °С, диаметр 2 мм.

На расчетной модели, для анализа процесса нагрева кабельной линии выбраны 5 точек, для которых определя-

лись температуры. Точки расположены на оси дугового столба: точка 1 – на наружной поверхности экрана фазы «А», точка 2 – на соприкасающихся наружных поверхностях покровных изоляций кабелей фаз «А» и «В», точка 3 – на наружной поверхности экрана фазы «В», точка 4 – на внутренней поверхности экрана фазы «В», точка 5 – на удалении 3,3 мм от наружной поверхности фазного проводника фазы «В». Выбор местоположения точки 5 сделан на основе электрической прочности сшитого полиэтилена, принятой для температуры 150 °С – 6 кВ/мм. При междуфазном напряжении 20 кВ, как только фронт температуры приблизится к фазной жиле на расстояние 3,3 мм, произойдет электрический пробой жильной изоляции фазы «В».

При параметризации модели выяснилось, что термодинамические свойства сшитого полиэтилена, используемого в качестве изоляции кабелей, в разных источниках существенно различаются [4, 5]. В действующих нормативных документах температуры термической стойкости и невозгораемости сшитого полиэтилена XLPE установлены, соответственно, 250 и 400 °С. Однако, в источниках, опирающихся на экспериментальные данные, указывается, что начиная с температуры 100 °С начинается разложение сшитого полиэтилена, фиксируемое изменением его массы. При наличии кислорода интенсивность разложения возрастает. При температуре 150–160 °С начинается интенсивная необратимая деградация физико-химических свойств сшитого полиэтилена XLPE [5]. При температуре 250 °С начинается пиролиз сшитого полиэтилена, в котором можно выделить три стадии [4]:

- иницирование, при 250–300 °С, сопровождающееся разрывом слабых связей в полимерной сетке, пероксидных «мостиков» и началом деполимеризации;
- основное разложение, при 300–400 °С, сопровождающееся разрывом углерод-углеродных связей в цепях полиэтилена и образованием летучих углеводородов: метана, этилена, пропана;
- при температуре, превышающей 400 °С, формируется углеродистый кокс (сажа).

В связи с вышесказанным возникают сомнения в достоверности

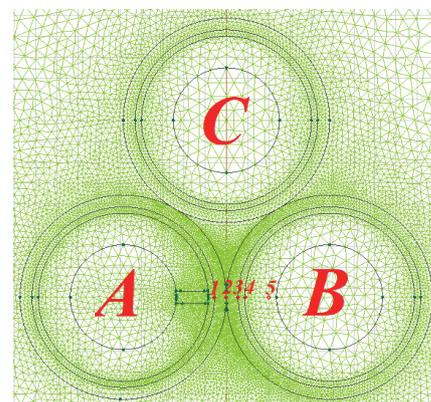


Рис. 2. Конечно-элементная расчетная модель трехфазной кабельной линии для анализа тепловых полей при ОЗ, 17098 узлов

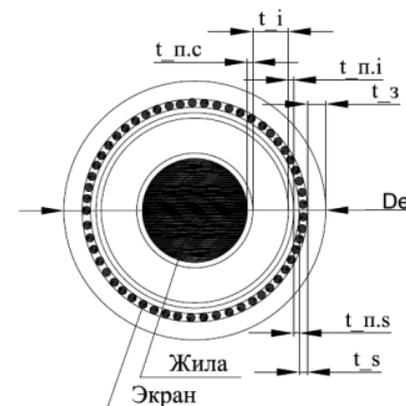


Рис. 3. Параметры кабеля, использованные для параметризации расчетной модели: De – наружный диаметр кабеля, t₃ – толщина покровной изоляции, t_s – толщина экрана, t_{p.s} – толщина слоя из полупроводящей ленты под экраном, t_{n.i} – толщина слоя из полупроводящей ленты на жильной изоляции, t_{n.i} – толщина жильной изоляции, t_{n.c} – толщина слоя из полупроводящей ленты на токоведущей жиле

данных о преимуществах сшитого полиэтилена по сравнению с поливинилхлоридом, у которого термическая стойкость ограничена температурой 160 °С, а невозгораемость температурой 350 °С.

На рис. 4 представлены результаты расчета изменений температур в пяти точках трехфазной кабельной линии. В режиме предшествующем ОЗ кабельная линия работала на холостом ходу, температура всех ее элементов была принята равной 15 °С. После пробы жильной изоляции в левом нижнем кабеле, соответствующем фазе «А»,

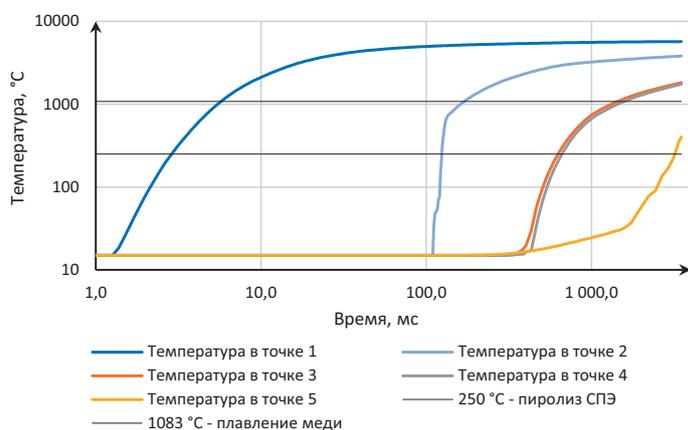


Рис. 4. Расчетные изменения температур в кабелях трехфазной линии в процессе перехода ОЗ в двухфазное короткое замыкание

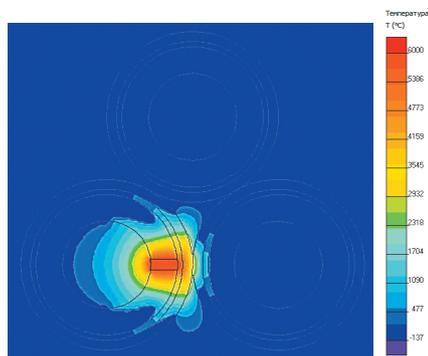


Рис. 5. Тепловое поле в сечении трехфазной кабельной линии по оси электрического дугового столба через 1с после возникновения ОЗ

возникло ОЗ с электрической дугой диаметром 2 мм между фазной жилой и экраном. Температура внутри дугового столба принята равной 6000 °С.

Через 6 мс после возникновения ОЗ температура экрана на оси дугового столба поврежденного кабеля достигает температуры плавления меди, 1083 °С. Столь быстрый нагрев и плавление экрана обусловлено его толщиной, равной 1,5 мм. На момент предполагаемого отключения ОЗ, через 1 с после возникновения дугового столба, температура в точке 2, в зоне соприкосновения кабелей, становится равной 3210 °С, т.е. покровная изоляция кабелей фаз «А» и «В» превращается в сажу. Учитывая, что при температуре 300–400 °С из сшитого полиэтилена выделяются горючие газы: метан, этилен и пропан, возможен микровзрыв и механическое повреждение рядом лежащих кабелей.

На рис. 5 показано поле температур для момента времени 1 с после возникновения ОЗ, соответствующего вре-

мени срабатывания ТЗНП. Видно, что основной фронт температур движется по оси дугового столба от кабеля фазы «А» к кабелю фазы «В». Температура в зоне соприкосновения кабелей фаз «А» и «С» за 1 с не увеличилась, осталась равной 15 °С. Следовательно, к моменту срабатывания ТЗНП, даже если междуфазное короткое замыкание еще не возникает, повреждается изоляция двух из трех кабелей, и они подлежат замене при ремонте кабельной линии. Электрическая дуга при ОЗ, за 1 с, сжигает сшитый полиэтилен жилой изоляции фазы «А», образуя отверстие диаметром 10 – 15 мм и оплавляет поверхность фазной жилы на глубину до 5 мм. По медному экрану, обладающему высокой теплопроводностью, температурный фронт перемещается быстрее, чем по оси дугового столба.

Из результатов расчета, представленных на рис. 4, следует, что через 2,24 с, температура в точке 5 достигает 150 °С. Электрическая прочность сшитого полиэтилена уменьшается до 6 кВ/мм и происходит пробой жилой изоляции фазы «В» с переходом ОЗ в двухфазное короткое замыкание. Продолжительности стадий перехода ОЗ в короткое замыкание, по отношению к полному времени перехода: плавление экрана кабеля фазы «А» – 0,2 %, покровных изоляций соприкасающихся кабелей – 19,5 %, экрана кабеля фазы «В» – 31,8 %, жилой изоляции кабеля фазы «В» – 48,5 %.

ВЫВОДЫ

1. Используемое в настоящее время условие термической стойкости кабелей с изоляцией из сшитого полити-

лена – 250 °С, не соответствует опытным данным, указывающим на начало деструктивного разложения сшитого полиэтилена при 100 °С и на интенсивное разложение и необратимую деградацию его физико-химических свойств при температуре выше 150–160 °С.

2. При ОЗ в трехфазных линиях с пофазно-экранированными кабелями, продолжительностью 1 с, происходит необратимое увеличение коэффициента диэлектрических потерь. После отключения ОЗ, в нормальном режиме, в соприкасающихся кабелях увеличивается тепловыделение и ускоряется старение изоляции, снижается срок службы кабелей, снижается электрическая прочность изоляции, увеличивается риск повторных ОЗ. При ремонте кабельных линий определять длину вырезаемых участков кабелей по результатам измерения коэффициента диэлектрических потерь последовательно вырезаемых отрезков кабелей длиной 0,5–1 м.

3. Целесообразность перехода на селективные ТЗНП в резистивнозаземленных сетях зависит от теплового взаимодействия кабелей в трехфазных линиях при ОЗ. Выбирать уставки ТЗНП по времени срабатывания следует с учетом способов прокладки кабелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Положение о технической политике АО «ОЭК». [Электронный ресурс]. URL: <https://uneco.ru/upload/doc/2025 г – Положение о ТП АО ОЭК от 03.03.2025.pdf> .
2. Антонов А.А., Гусев Ю.П. Электродуговые процессы при однофазных замыканиях в пофазно-экранированных кабелях // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 5. С. 325-344. DOI: 10.7463/0513.0598819.
3. ELCUT. Новый подход к моделированию полей. [Электронный ресурс]. URL: <https://elcut.ru/index.htm>
4. DeepSeek [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deepseek.com/>
5. Camille Blivet, Jean-François Larché, Yaël Israël, Pierre-Olivier Bussière, Jean-Luc Gardette. Thermal oxidation of cross-linked PE and EPR used as insulation materials: Multi-scale correlation over a wide range of temperatures. Polymer Testing 2021, 93 <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106913>.