

## Проверка функционирования избирательной защиты кабельно-воздушной линии передачи постоянного тока

• Капитула Ю. В.<sup>1</sup>, ОАО «НИИПТ»

Проверено функционирование избирательной защиты кабельно-воздушной линии передачи постоянного тока при моделировании коротких замыканий в разных точках линии. Показано, что разработанный алгоритм избирательной защиты линии способен выявлять короткие замыкания на линии с учётом ненулевого переходного сопротивления в месте короткого замыкания, определять участок повреждения и формировать соответствующий сигнал отключения.

**Ключевые слова:** передача постоянного тока, кабельно-воздушная линия, короткое замыкание, избирательная защита линии.

В настоящее время ведётся проектирование передачи постоянного тока (ППТ) Ленинградская АЭС-2 – ПС Выборгская напряжением  $\pm 300$  кВ и мощностью 1000 МВт. Передача позволит существенно повысить надёжность энергоснабжения Санкт-Петербурга при создании дополнительной кольцевой структуры в Центральной части ОЭС Северо-Запада. Поскольку кратчайший путь для снабжения электроэнергией от ЛАЭС-2 до ПС Выборгская лежит через Финский залив, в данном проекте предусмотрен кабельно-воздушный вариант трассы. Выпрямительная часть ППТ будет располагаться вблизи ЛАЭС-2, а инверторная часть войдёт в состав преобразовательного комплекса ПС Выборгская.

Короткие замыкания на кабельно-воздушной линии в большинстве случаев связаны с перекрытием изоляции воздушного участка вследствие грозовой активности. Это, как правило, самопогасяющиеся замыкания. Для их устранения достаточно обеспечить на данной линии бестоковую паузу.

Повреждения на кабельном участке, вызванные пробоем изоляции, – неустраняемые, поэтому необходимо аварийное отключение линии без автоматического повторного включения.

Для соблюдения указанных требований защита линии должна быть выполнена избирательной, чтобы она могла выявлять короткие замыкания (КЗ) на линии и отличать их от повреждений на преобразовательных подстанциях. Помимо этого в функции защиты должна входить способность определять участок повреждения для формирования сигналов отключения линии с автоматическим повторным включением (АПВ) при КЗ на воздушном участке и без АПВ при КЗ на кабельном участке.

Как следует из проведённого обзора защит линий, при отсутствии измерительных датчиков в месте сопряжения кабельного и воздушного участков известные в настоящее время алгоритмы защит кабельно-воздушных линий передачи постоянного тока не способны определять участок повреждения. Зачастую при перекрытии полюса на землю в них заранее предусмотрено действие защиты либо с автоматическим повторным включением, либо без АПВ независимо от участка повреждения [1 – 3].

В [4] рассматриваются процессы при коротких замыканиях на участках кабельно-воздушной линии передачи постоянного тока и даётся описание алгоритма избирательной защиты такой линии.

В данной статье приводятся результаты проверки разработанной защиты на математической модели передачи постоянного тока при коротких замыканиях на линии в условиях действия систем автоматического регулирования выпрямителя и инвертора, а также с учётом моделирования экранирующего действия металлических оболочек кабеля и поверхностного эффекта в проводах и в земле воздушного участка линии.

Для проверки функционирования защиты рассматривались однополюсные повреждения на кабельном и на воздушном участках, при которых защита линии должна чётко и надёжно работать, и перекрытия полюса на землю на инверторной подстанции, при которых защита работать не должна.

Схема модели передачи, на которой производились исследования, изображена на рис. 1. Модель передачи содержит преобразователи  $П1 - П4$ , сглаживающие реакторы  $L_p$ , фильтро-компенсирующие устройства  $ФКУ$ , фильтры постоянного тока  $ФПТ$ , кабельный и воздушный участки линии, примыкающие линии переменного тока  $Л-1 - Л-3$  и эквиваленты отправной и приёмной энерго-

<sup>1</sup> Капитула Юлия Владимировна: yul\_Kap@mail.ru



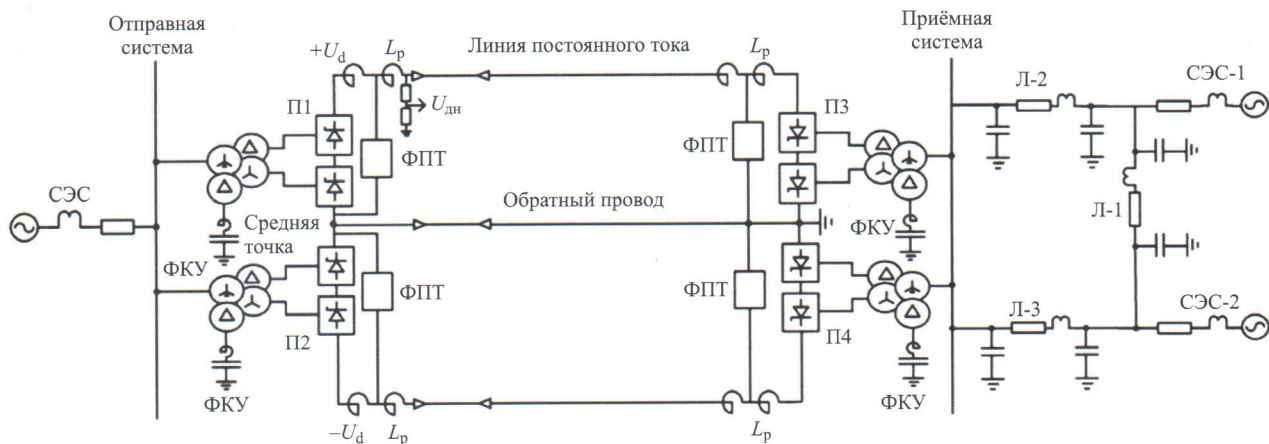


Рис. 1. Схема модели передачи

систем СЭС. Для адекватного отображения процессов при КЗ линия замещалась цепной схемой с частотно-зависимыми продольными параметрами, в которой кабельный участок моделировался 41 ячейкой по 1 км, а воздушный – 34 ячейками по 2 км.

В процессе испытаний нагрузочный режим модели электропередачи постоянного тока соответствовал передаче мощности 1000 МВт двумя полупецими. Номинальный ток составлял 1700 А.

Входным сигналом защиты служит напряжение полюса  $U_{дн}$  от делителя напряжения, установленного в точке соединения линейного реактора  $L_p$  и кабельного участка линии. При проверке действия алгоритма избирательной защиты линии приняты следующие значения уставок:

$U_{уст} = 200$  кВ – уставка напряжения деблокировки алгоритма;

$(dU/dt)_{уст} = 600$  1/с – уставка скорости изменения входного сигнала напряжения, приведённая к номинальному напряжению;

$f_{кл\ min} = 783$  Гц – уставка защиты по частоте.

При моделировании короткого замыкания в середине кабельного участка в момент  $t_{кз}$  волна возмущения, многократно отражаясь от места КЗ и от реактора  $L_p$ , вызывает скачкообразное изменение напряжения  $U_{дн}$  в точке измерения (рис. 2, а). Происходит деблокировка алгоритма по условию  $U_{дн} \leq U_{уст}$  и фиксируется нарушение на линии по условию

$$(dU_{дн}/dt) \geq (dU/dt)_{уст}.$$

По фиксированным алгоритмом точкам перехода вычисляется значение средней частоты  $f_{ср} = 1648,5$  Гц, что больше уставки  $f_{кл\ min}$ . В соответствии с этим защита выявляет повреждение на кабельном участке и формирует выходной сигнал на отключение аварийной полупеци без АПВ через  $t_{сраб} = 1,4$  мс после возникновения КЗ.

При перекрытии изоляции линии в середине воздушного участка через нулевое сопротивление

в момент  $t_{кз}$  возникает сложный процесс распространения волны возмущения между точкой перекрытия и точкой измерения напряжения линии. За счёт отличных на порядок значений волновых сопротивлений кабельного и воздушного участков к месту измерения напряжения приходят волны, многократно отражённые и преломлённые в точке КЗ и в месте сопряжения. По мере прихода тех или иных волн в начало линии в кривой напряжения можно видеть последовательные отрицательные и последовательные положительные скачки напряжения (рис. 2, б).

В данном случае значение  $f_{ср} = 209,4$  Гц, что меньше уставки  $f_{кл\ min}$ . Защита выявляет повреждение на воздушном участке и формирует выходной сигнал на отключение аварийной полупеци с АПВ через  $t_{сраб} = 10,8$  мс после возникновения КЗ.

Моделирование перекрытия в конце воздушного участка линии постоянного тока и формирование выходных сигналов защиты представлено на рис. 3, где  $f_{ср} = 161,3$  Гц. Защита выявила повреждение на воздушном участке и сформировала сигнал на отключение повреждённой линии с АПВ через 14,3 мс после возникновения КЗ.

Особенность кабельно-воздушной линии состоит в том, что по мере приближения возможных точек короткого замыкания (как на воздушном участке, так и на кабельном) к месту сопряжения протекание переходных процессов при повреждениях в первые моменты времени становится практически идентичным. Преимущество разработанного алгоритма заключается в обеспечении надёжной работы защиты вблизи места сопряжения двух однородных участков, ограниченного областью 50 м как в сторону воздушного, так и в сторону кабельного участков линии от точки сопряжения. При возникновении перекрытия внутри этой области происходит выявление аварии и формируется сигнал защиты на отключение линии без АПВ независимо от участка повреждения.

На рис. 4 показана работа алгоритма защиты по выявлению участка повреждения при модели-



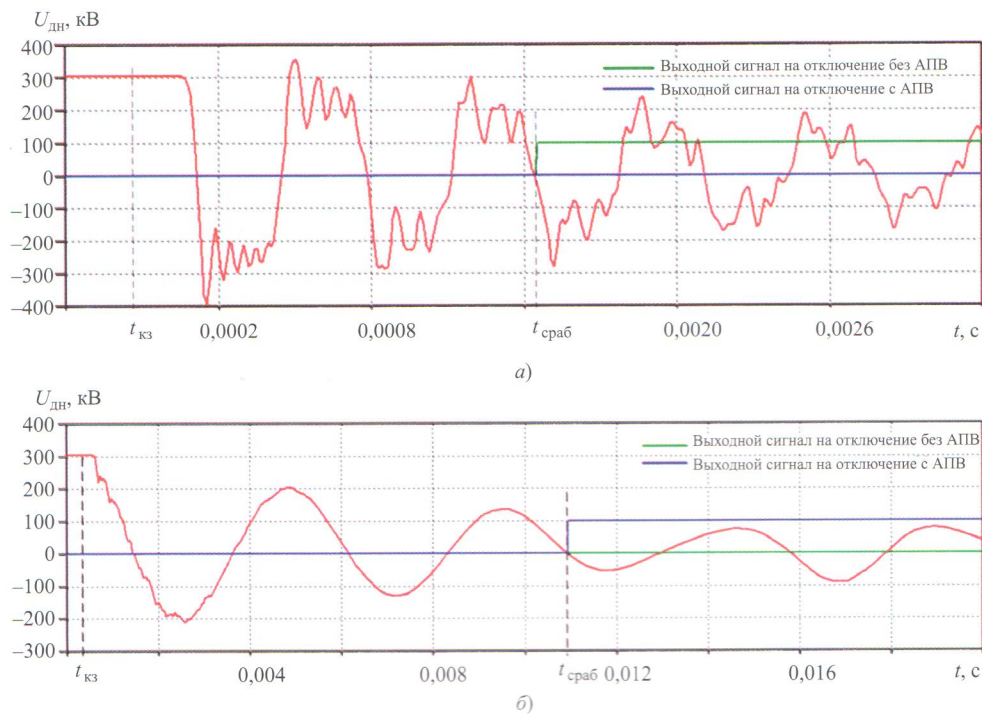


Рис. 2. Осциллограммы напряжения линии и выходные сигналы защиты при моделировании пробоя изоляции в середине кабельного (а) и в середине воздушного (б) участков линии постоянного тока

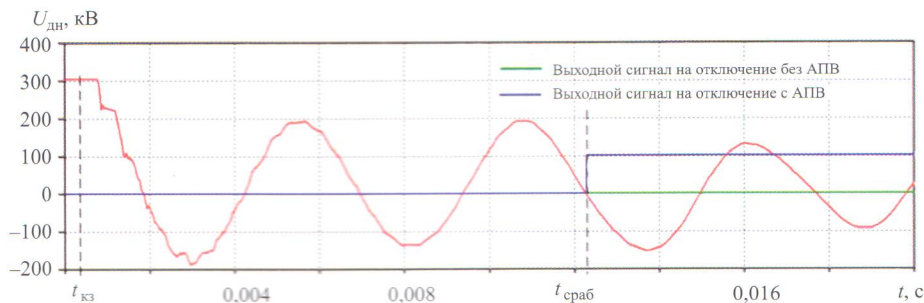


Рис. 3. Осциллограмма напряжения линии и выходные сигналы защиты при моделировании КЗ на землю в конце воздушного участка

ровании аварии вблизи места сопряжения на кабельной и на воздушной линии; на рис. 4, а – при моделировании перекрытия изоляции в точке, находящейся в конце кабельного участка на расстоянии 50 м от места сопряжения. Измеренная алгоритмом частота переходов напряжения через 0 составляет в этом опыте 784,1 Гц, что больше  $f_{кл\ min}$ . Защита выявляет повреждение на кабельном участке и формирует сигнал отключения полупеци без АПВ через 2,9 мс после начала КЗ.

На рис. 4, б представлен процесс изменения напряжения полюса линии при моделировании короткого замыкания на землю в точке, находящейся в начале воздушного участка на том же расстоянии 50 м от места сопряжения. Значение средней частоты сигнала в этом случае  $f_{cp} = 779,3$  Гц. Время работы защиты по выявлению повреждения на воздушном участке и формированию сигнала от-

ключения линии с АПВ при этом КЗ составляет так же 2,9 мс.

Все описанные случаи моделирования коротких замыканий на кабельно-воздушной линии передачи постоянного тока рассматривались при условии нулевого переходного сопротивления в КЗ на землю или на оболочку кабеля. Выявление КЗ через ненулевое переходное сопротивление – ещё одно преимущество разработанного алгоритма избирательной защиты линии. Такого вида повреждения могут возникать на воздушном участке. Защита и в этом случае должна функционировать чётко и надёжно. На рис. 5 показана осциллограмма напряжения линии в точке измерения при моделировании перекрытия на землю через сопротивление 100 Ом в конце воздушного участка. В этом случае переходы сигнала через 0 отсутствуют. Деблокировка алгоритма происходит по условию  $U_{дн} \leq U_{уст}$ .

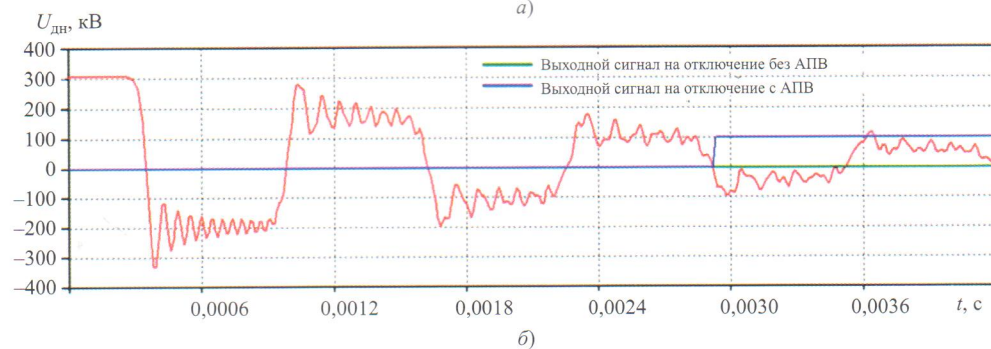
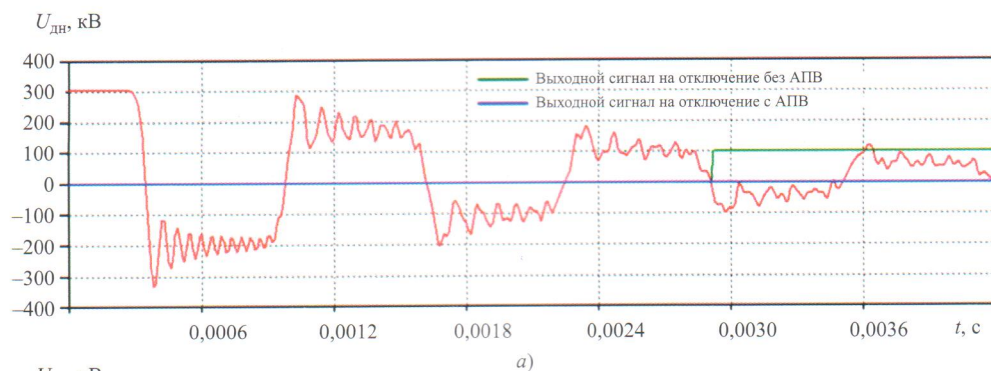


Рис. 4. Осциллограммы напряжения линии и выходные сигналы защиты при моделировании КЗ в конце кабельного (а) и в начале воздушного (б) участков

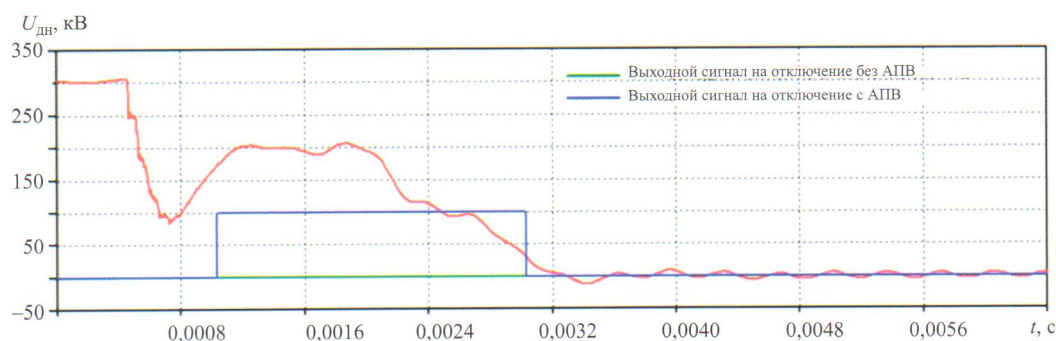


Рис. 5. Осциллограмма напряжения линии и выходные сигналы защиты при моделировании КЗ в конце воздушного участка через переходное сопротивление

По условию  $(dU_{\text{дн}}/dt) \geq (dU/dt)_{\text{уст}}$  фиксируется нарушение на линии. По отсутствию переходов сигнала через 0 происходит выявление КЗ на воздушном участке (считается, что повреждения на кабельном участке происходят практически через нулевое переходное сопротивление). Защита формирует сигнал на отключение линии с АПВ через 6,3 мс после начала КЗ.

На рис. 6 показана осциллограмма напряжения линии при моделировании перекрытия полюса на землю на инверторной подстанции. В данном случае формирование выходного сигнала защиты не происходит, поскольку максимальное значение скорости изменения сигнала, приведенное к номинальному напряжению,  $(dU_{\text{дн}}/dt)$  составляет 265 1/с, что меньше, чем  $(dU_{\text{дн}}/dt)_{\text{уст}}$ .

## Вывод

Проверка действия избирательной защиты при моделировании коротких замыканий в разных точках линии и с учётом переходного сопротивления показала, что разработанный алгоритм по выявлению участка повреждения на кабельно-воздушной линии передачи постоянного тока работает правильно при всех моделируемых повреждениях на линии и не работает при авариях на преобразовательных подстанциях, сопровождаемых снижением напряжения.

Алгоритм избирательной защиты является составной частью комплекса защит проектируемой в настоящее время ППТ ЛАЭС-2 – ПС Выборгская с кабельно-воздушной линией.



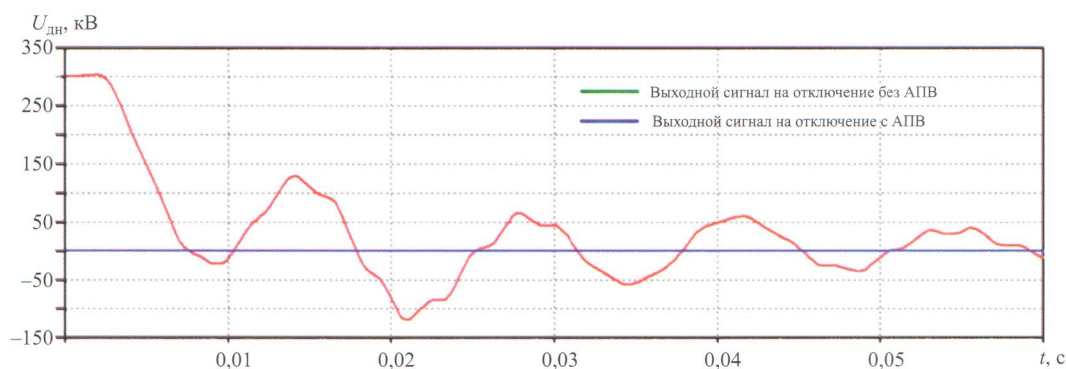


Рис. 6. Оциллограмма напряжения и выходные сигналы защиты при моделировании перекрытия полюса на землю на инверторной подстанции

### Список литературы

1. Kunlun Han, Zexiang Cai, Yang Liu. Study on protective performance of HVDC transmission line protection with different types of line fault. – Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011, 4th International Conference.
2. Shuo Zhang, Yongli Li. Simulation and analysis of HVDC line protection under the single pole to ground fault with high transition resistance. – Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011, 4th International Conference.
3. Naidoo D. and Ijumba N. M. HVDC line protection for the proposed future HVDC systems. – Power System Technology, 2004, Vol. 2.
4. Канитула Ю. В. Координация действия защит от коротких замыканий на кабельно-воздушной линии передачи постоянного тока. – Электрические станции, 2013, № 11.

## Тенденции построения технологической сети связи электроэнергетики в современных условиях

• Пилипенко Г. В.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ООО “Инлайн технолоджис”

Показаны тенденции построения технологической сети связи электроэнергетики в современных условиях на основе зарубежного опыта. Определены основные преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, технологическая сеть связи, универсальный узел доступа.

Принципы и специфика построения технологических сетей связи (ТСС) в электроэнергетике складывались годами и были неразрывно связаны с передовыми, на момент внедрения, информационными и телекоммуникационными технологиями. Так, в 80-е годы прошлого столетия массово внедрялись системы дальней связи с частотным разделением каналов, а 1990-е годы были ознаменованы внедрением систем дальней связи с временным разделением каналов TDM (TDM – Time Division Multiplexing) и началом глобальной экспансии решений на базе технологии TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol). Первое десятилетие 2000-х привнесло такие глубинные изменения в сфере транспортировки и агрегации информационных данных, что описать их полностью в объеме статьи не представляется возможным.

Нарастающие темпы морального старения и смены технических решений на рынке информационных и телекоммуникационных технологий усложняют задачу, рассматриваемую в данной статье. По этой причине хотелось бы выделить те технологии, которые прошли проверку временем и до сих пор используются потребителем в промышленном секторе экономики. Таковыми на сегодняшний день являются технологии SDH (Synchronous Digital Hierarchy) и MPLS (Multiprotocol Label Switching). Рассмотрим логику построения современной инфокоммуникационной инфраструктуры электроэнергетической компании, используя передовой зарубежный опыт.

**Построение современной ТСС на базе концепции универсального узла доступа.** В настоящий момент в современных сетях связи наблюдается тенденция снижения объема передачи данных с использованием систем PDH/SDH (PDH – Plesiochronous Digital Hierarchy). При этом объем трафика пакетных систем постоянно возрастает.

<sup>1</sup> Пилипенко Геннадий Викторович: g\_pilipenko@in-line.ru