

ПРОБЛЕМЫ КОММУТАЦИИ КОМПЕНСИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ КЛ 330 кВ ЮЖНАЯ – ПУЛКОВСКАЯ

С.Е. КАСЬЯНОВ*, Е.Б. ШЕСКИН*, В.В. ВЕССАРТ**

***ОАО «НТЦ ЕЭС», г. Санкт-Петербург**

**** Филиал ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Северо-Запада, г. Санкт-Петербург**

В настоящее время в сетях сверхвысокого и ультравысокого напряжений получили распространение элегазовые выключатели с автокомпрессионным принципом гашения дуги. Опыт эксплуатации показал неспособность данных выключателей производить коммутацию по типу «включение – быстрое отключение» для линий с реакторами при высокой степени компенсации зарядной мощности вследствие наличия длительно затухающей апериодической составляющей в токе, протекающей в выключателе. Для воздушных линий электропередачи необходимость разработки мероприятий по предотвращению повреждения выключателей не вызывает сомнений, однако компенсированным кабельным линиям уделяется не так много внимания, что и показано на примере КЛ 330 кВ Южная – Пулковская.

Ключевые слова: апериодические токи, апериодическая составляющая тока, элегазовые выключатели, реакторы, кабельные линии, шунтирующие реакторы

I. Проблема апериодической составляющей

Широкое применение коммутационного оборудования с элегазовой изоляцией выявило новые технические проблемы, решение которых необходимо для надежной работы энергосистемы. Одной из них является коммутация компенсированных линий электропередачи, оборудованных элегазовыми выключателями с автокомпрессионным принципом гашения дуги.

Апериодическая составляющая возникает при постановке под напряжение линий электропередачи с установленными линейными шунтирующими реакторами (далее ШР), в момент отличный от максимума напряжения, вследствие возникновения в индуктивности ШР ЭДС самоиндукции. Величина апериодической составляющей зависит от величины тока в момент включения и мощности, и количества включенных линейных ШР.

В самом неблагоприятном случае значение апериодической составляющей, протекающей через линейный выключатель, равно сумме амплитуд токов реакторов, подключенных к линии. Если степень компенсации такова, что разница емкостного тока линии электропередачи (далее ЛЭП) и суммарного индуктивного тока реакторов меньше величины апериодической составляющей, возникают задержки перехода мгновенного значения тока через ноль, и условия для отключения элегазового выключателя (гашения межконтактной дуги) возникают только по мере ее затухания.

Ниже рассматривается выбор оптимального средства для обеспечения успешного отключения ЛЭП на примере КЛ 330 кВ Пулковская – Южная.

По проекту на линии предусмотрена установка двух реакторов, по 100 Мвар, со стороны ПС 330 кВ Южная и со стороны ПС 330 кВ Пулковская. Постановка под напряжение линии возможна с обеих сторон КЛ.

© В.В. Вессарт, С.Е. Касьянов, Е.Б. Шескин

Проблемы энергетики, 2016, № 11-12

II. КЛ 330 кВ Южная-Пулковская

КЛ 330 кВ Пулковская – Южная имеет длину 17,5 км и выполнена тремя кабелями с сечением жилы 2500 мм², экрана – 240 мм². Фазы расположены в ряд на расстоянии двух диаметров кабеля. Полное время отключения выключателей принято равным 0,04 с, время срабатывания релейной защиты – 0,02 с.

Реактор замещается тремя ветвями, соединенными в звезду с заземленной нейтралью. Параметры схемы замещения реактора – 4,2 Гн и 2,85 Ом [1].

Система представлена шинами бесконечной мощности.

Для моделирования переходных процессов используется программный комплекс АТР/ЕМТР.

Рассматриваются следующие расчетные случаи, наиболее характерные для кабельных линий:

- опробование напряжением;
- опробование напряжением при наличии короткого замыкания на одной из фаз

КЛ.

III. Опробование напряжением

На рис. 1 показана осциллограмма тока фазы А КЛ 330 кВ Пулковская – Южная при постановке ее под напряжение. Как следует из рис. 1, при включении КЛ с одним реактором возникает апериодическая составляющая, начальное значение которой равно 220 А, что соответствует амплитуде фазного тока реактора. В то же время величина амплитуды периодической составляющей тока в выключателе составляет 120 А, что значительно меньше величины апериодической составляющей и приводит к задержке перехода тока через ноль.

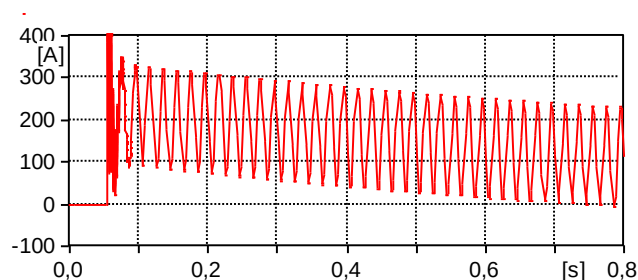


Рис. 1. Ток фазы «А» при трехфазном включении на холостой ход в момент максимума тока реактора при установке реакторов в начале линии

В табл. 1 приведены времена первого перехода тока через 0 для разного количества включенных фаз.

Таблица 1

Кол-во вкл. фаз	Моменты перехода тока через ноль, с	
	Момент перехода тока через ноль, с	
	Один реактор	Два реактора
1	0,59	1,98
2	0,63	1,92
3	0,69	1,88

Из табл. 1 следует, что при включении КЛ 330 кВ Пулковская – Южная с одним реактором, присоединенным к КЛ, протекание по выключателю апериодической составляющей препятствует переходу тока через ноль в течение 0,69 с, а при наличии двух реакторов – около 2 с, что превышает суммарное время срабатывания релейной защиты и полное время отключения линейного выключателя.

Это означает, что ложное срабатывание релейной защиты на отключение КЛ приведет к попытке отключения выключателя, ток в одной из фаз которого может длительное время не переходить через ноль, что может привести к повреждению выключателя.

IV. Включение линии на короткое замыкание

При включении линии на короткое замыкание интерес представляют только токи неповрежденных фаз, так как в аварийных фазах величина периодической составляющей тока на порядок превосходит апериодическую составляющую тока реактора.

В табл. 2 приведены времена перехода тока через 0, отсчитываемые с момента включения.

Таблица 2

Вид КЗ	Моменты перехода тока через ноль, с	
	Момент перехода тока через ноль, с	
	Один реактор	Два реактора
K(1)	0,69	2
K(1,1)	0,75	1,98
K(2)	0,68	1,88

Из результатов, приведенных в таблице 2, следует, что при включении на короткое замыкание в неповрежденных фазах линии возникают недопустимо длительные задержки перехода тока через ноль.

Таким образом, эксплуатация КЛ 330 кВ Пулковская – Южная без специальных мероприятий по обеспечению успешного отключения КЛ может привести к повреждению линейных выключателей.

V. Основные способы обеспечения успешного отключения КЛ 330 кВ Пулковская – Южная

A. Выключатели с предвключаемыми резисторами

Как уже было отмечено выше, самым простым способом решения проблемы отсутствия нулей тока в выключателе можно считать кратковременное искусственное уменьшение добротности контура замыкания апериодической составляющей тока.

Этого можно достичь путем использования предвключаемых резисторов в выключателях или в нейтральных выводах ШР. Выключатели с предвключаемыми резисторами имеют ряд особенностей, среди которых можно выделить как достоинства, так и недостатки.

Во-первых, производителями электрооборудования успешно налажен выпуск данного типа аппаратов.

Во-вторых, требуемая величина сопротивления резисторов может зависеть от количества шунтирующих реакторов, подключенных к ЛЭП [2].

В-третьих, при шунтировании резистора, установленного в выключателе, возникает новая апериодическая составляющая, которая может препятствовать переходу тока через ноль [3].

Величину сопротивления предвключаемого резистора необходимо выбирать исходя из двух условий: быстрое затухание аperiodической составляющей тока и отсутствие больших по величине аperiodических составляющих при переходном процессе после замыкания главных контактов выключателя.

Для этого необходимо выполнить серию расчетов с разными величинами сопротивлений и разным временем их действия в цепи. По некоторым данным время действия резисторов в цепи составляет 10 мс, а их величина лежит в диапазоне 150 – 300 Ом.

Ниже, в табл. 3, приведены коммутации, в которых время до первого перехода тока через ноль было наибольшим.

На рис. 2 показана осциллограмма тока фазы «А» при однофазном включении и двух реакторах по концам линии, и сопротивлении предвключаемого резистора 150 и 300 Ом.

Таблица 3

Моменты перехода тока через ноль

Кол-во вкл. фаз	Тип КЗ	Кол-во реакторов	Момент перехода тока через ноль, с	
			R=150 Ом	R=300 Ом
3	-	1	0,31	0,005
1	-	2	1,05	0,005
-	K(1,1)	1	0,005	0,005
-	K(1)	2	0,96	0,005

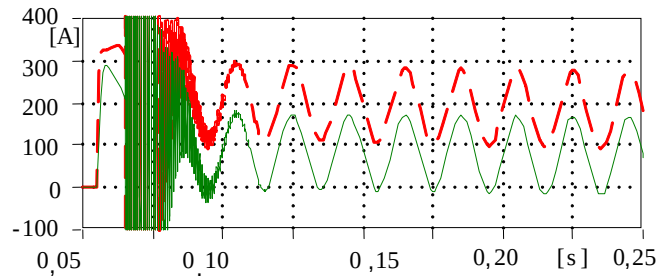


Рис.2. Осциллограмма тока фазы «А» при однофазном включении линии и наличии двух реакторов, при сопротивлении предвключаемого резистора 150 Ом (красная пунктирная линия) и 300 Ом (зеленая сплошная линия)

Еще одним критерием выбора резисторов служит максимальное количество энергии, выделяемое в каждом резисторе во время работы. Наиболее опасными режимами, с этой точки зрения, являются короткие замыкания. Наибольший ток наблюдается либо при трехфазном КЗ, либо при однофазном, в зависимости от соотношения сопротивлений прямой и нулевой последовательности. Величина энергии, выделяемая в наиболее опасных режимах, представлена в табл. 4.

На основании полученных данных можно рекомендовать установку выключателей с предвключаемыми резисторами с сопротивлением порядка 300 Ом и временем действия около 10 мс. Возникающая при замыкании главных контактов выключателя аperiodическая составляющая незначительна и опасности для

выключателя не представляет. Максимальное количество энергии, выделяемой в резисторах, составляет 1,38 МДж.

Таблица 4

Тип КЗ	Количество энергии на фазу, МДж	
	R=150 Ом	R=300 Ом
K(3)	2,72	1,38
K(1)	2,72	1,38

В. Устройства управляемой коммутации

Для уменьшения начального значения апериодической составляющей могут применяться устройства управляемой коммутации, позволяющие производить включения вблизи от заданных моментов времени.

В действительности устройства управляемой коммутации не могут гарантировать включение в заданный момент времени, поскольку механическая инерция привода, время движения контактов, момент предпробоя – все это зависит от множества факторов. В связи с этим устройства управляемой коммутации имеют значительную погрешность, исключить которую невозможно, и для ЛЭП с высокой степенью компенсации их использование не приведет к обеспечению перехода тока в выключателе через ноль к моменту возможного отключения.

С. Резисторы в нейтральных выводах ШР

Резисторы в нейтрали шунтирующего реактора позволяют кратковременно увеличить фазные сопротивления шунтирующих реакторов, что эквивалентно уменьшению добротности реактора. После коммутации ЛЭП резисторы должны быть зашунтированы для снижения потерь.

По рекомендациям [1] класс напряжения резисторов, предназначенных для установки в нейтральные выводы фаз ШР, – 35 кВ.

Резистор следует вводить в цепь за 100 мс до пробного включения и шунтировать еще через 100 мс. Таким образом, суммарное время действия резистора в цепи составляет примерно 200 мс.

Оценка величины требуемого сопротивления производилась из следующих соображений:

- затухание апериодической составляющей до величины периодической должно произойти не более чем за 50 мс;

- принято, что апериодическая составляющая должна затухнуть до $|1-K|/n_t$ от своей максимальной величины, где K – коэффициент компенсации, n_t – количество реакторов;

- напряжение на резисторе должно соответствовать классу 35 кВ.

Параметры для выбора резистора в нейтраль реактора:

а) при установке одного реактора

$K = 0,65$; $|1 - K| = 0,35$; $T = 0,048$ с ; $R = 96$ Ом.

б) при установке двух реакторов

$K = 1,3$; $|1 - K| / 2 = 0,15$; $T = 0,026$ с ; $R = 178$ Ом.

Ниже, в табл. 5 приведены коммутации, в которых время до первого перехода тока через ноль было наибольшим.

На рис. 3 показана осциллограмма тока фазы «А» при установке резисторов в нейтраль реакторов.

Таблица 5

Моменты перехода тока через ноль

Кол-во вкл. фаз	Тип КЗ	Кол-во реакторов	Момент перехода тока через ноль, с
3	-	1	0,032
1	-	2	0,037
-	$K^{(1,1)}$	1	0,030
-	$K^{(1)}$	2	0,038

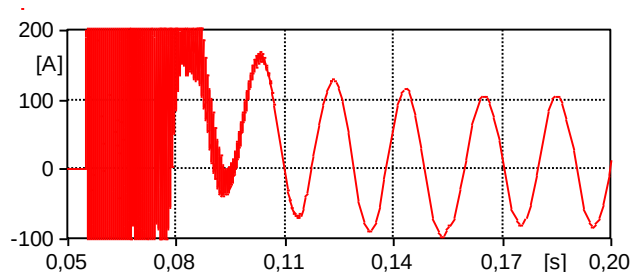


Рис.3. Осциллограмма тока фазы «А» при включении на однофазное короткое замыкание и наличии двух реакторов, при установке резистора в нейтраль реакторов

Для предотвращения повреждения резисторов необходимо рассчитать максимальное количество энергии, выделяющейся в них во время работы, и производить выбор конкретного типа резисторов с учетом возможностей его теплоотвода. Количество энергии, выделяющееся в резисторах в различных режимах работы, приведено в табл. 6.

Таблица 6

Количество энергии, выделяющееся в резисторах

Кол-во вкл. фаз	Тип КЗ	Кол-во реакторов	Количество энергии на фазу для реакторов в начале/конце линии, кДж	
			R=96 Ом	R=178 Ом
3	-	1	324	-
1	-	2	-	515/515
-	$K(1,1)$	1	350	-
-	$K(1)$	2	-	515 443

В результате получено, что при установке резисторов в нейтраль реакторов проблемы с отсутствием перехода тока через 0 не наблюдается. Максимальное количество энергии, выделяемой в резисторах, зависит от величины его сопротивления, которое обусловлено количеством реакторов, установленных на линии, и находится в пределах 350 – 515 кДж.

Д. Схемно-режимные мероприятия

Использование этого способа успешного отключения ЛЭП заключается в определении порядка переключений в схеме до и после коммутации, обеспечивающего наименьшее значение аperiodической составляющей и наибольшее возможное значение периодической составляющей тока в выключателе.

Список мероприятий может включать в себя:

- изменение местоположения ШР, в том числе и их переподключение на шины;
- включение линии без ШР, с последующим вводом их в работу;
- включение линии с определенной стороны для включения ее активного сопротивления в контур, протекания апериодической составляющей.

Первые два мероприятия могут быть достаточно эффективными для кабельных линий, где нет необходимости разрабатывать и проверять алгоритмы коммутаций в циклах АПВ.

Е. Программируемое отключение линии

Это мероприятие по успешному отключению ЛЭП выполняется средствами противоаварийной автоматики и основано на последовательном отключении фаз линии и реактора [3].

Так может быть реализовано последовательное отключение:

- аварийной фазы ЛЭП;
- фаз реактора, подключенных к неповрежденным фазам ЛЭП;
- неповрежденных фаз КЛ для полного отключения ЛЭП.

С одной стороны отключение ЛЭП подобным образом затягивает процесс отключения и последующего ввода в работу, с другой – оно может стать достаточно эффективным решением проблемы именно для кабельных линий, для которых не предусматривается АПВ.

VI. Заключение

При рассмотрении коммутационных процессов в КЛ 330 кВ Пулковская – Южная установлено, что коммутирование линии сопровождается появлением длительно затухающих апериодических составляющих тока в реакторах, подключенных к КЛ на конечных подстанциях.

Анализ существующих способов обеспечения успешного отключения показал эффективность уменьшения добротности контура протекания апериодической составляющей.

По результатам рассмотрения основных коммутаций КЛ было определено, что требуемое сопротивление резисторов для обеспечения успешного отключения КЛ составляет 300 Ом при установке резисторов в выключатель и 178 Ом при установке в нейтрали шунтирующих реакторов.

В обоих случаях почти полное затухание апериодической составляющей происходит за один-два периода промышленной частоты, что позволяет обеспечить успешное отключение КЛ.

Summary

Nowadays SF6-insulated circuit breakers are the most widely used breakers for extra high voltage grids. Operational experience has shown that they are incapable of making fast switching of power transmission lines equipped with shunt reactors due to zero-missing phenomena in case the coefficient of line charge capacity compensation is sufficiently high. Though the necessity of development of measures for prevention of breaker damage in overhead lines is quite clear, not enough attention is given to the compensated power cable lines. The problem is considered using the example of 330 kV cable line Yuzhnaya - Pulkovskaya.

Keywords: *DC component, zero missing phenomena, SF6 circuit breakers, cable lines, shunt reactors*

Литература

1. Распоряжение ФСК ЕЭС № 838 от 10.12.2012.
2. Дмитриев М.В., Шескин Е.Б. Проблемы отключения реактированных линий 330 – 750 кВ элегазовыми выключателями // Энергетик. 2013. № 10. С. 46–50.
3. Sheskin E.B., Evdokunin G.A.. Switching of High-Voltage Cable Lines with Shunt Reactors // Power Technology and Engineering, vol. 50. 2016. № 1. pp 1–7.

Поступила в редакцию

16 октября 2016 г.

Касьянов Сергей Евгеньевич – инженер АО «НТЦ ЕЭС», г. Санкт-Петербург. Тел: 8(911)759-07-50. E-mail: kasyanov.s.e@ya.ru.

Шескин Евгений Борисович – заместитель заведующего отделом электроэнергетических систем (ННО-3), заведующий лабораторией исследования электроэнергетических систем АО «НТЦ ЕЭС», г. Санкт-Петербург. Тел: 8(812)292-94-56. E-mail: sheskin_e@ntcees.ru.

Вессарт Василий Владимирович – заместитель начальника службы электрических режимов филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Северо-Запада, г. Санкт-Петербург. Тел: 8(812)495-83-41. E-mail: vessart@oducz.so-ups.ru.