

Повышение эффективности систем защит воздушных линий сверхвысокого напряжения с управляемой продольной компенсацией.

Колобродов Е.Н., Нудельман Г.С.

ОАО «ВНИИР»

Россия

ekolobrodov@abselectro.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Интеллектуальная энергосистема с активно-адаптивной сетью (ИЭС с ААС), управляемое устройство продольной компенсации (УУПК), дистанционная защита (ДЗ), усовершенствованный метод применения устройств ДЗ, повышение быстродействия и селективности защит

1 ВВЕДЕНИЕ

Развитие новых технологий в электроэнергетике ведущих стран, включая Россию, связано с внедрением интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью (ИЭС с ААС), элементами которой являются управляемые шунтирующие реакторы (УШР), СТАТКОМ, управляемые устройства продольной компенсации (УУПК), фазоворотные устройства (ФПУ) и др., повышающие эффективность работы электроэнергетической системы.

Необходимость построения ИЭС с ААС обусловила новый интерес к проблеме внедрения УУПК на воздушных линиях сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН) в России. Однако известно, что применение подобных устройств изменяет условия, в которых функционируют комплексы релейной защиты и автоматики (РЗА), что может приводить к ухудшению показателей технического совершенства РЗА, прежде всего селективности и быстродействия и требует модернизации систем РЗА как самого объекта, так и смежных с ним элементов сети.

В рамках данного доклада на примере применения управляемой продольной компенсации авторами рассмотрен ряд явлений существенно ухудшающих свойства комплексов ступенчатых дистанционных защит линий. Кратко проанализированы существующие способы отстройки от части указанных проблем. Предложен усовершенствованный метод применения устройств дистанционной защиты на воздушных линиях сверхвысокого напряжения с управляемой продольной компенсацией.

В докладе также представлены результаты проведенного в программе PSCAD исследования работы ступенчатых дистанционных защит компенсированной и смежных с ней линий для случая традиционного и нового метода их применения

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Влияние продольной компенсации на дистанционную защиту.

Применение на ВЛ СВН управляемых и неуправляемых устройств продольной компенсации (УПК) позволяет решать широкий спектр задач от повышения пропускной способности компенсированной линии до обеспечения устойчивости всей системы в целом. Однако применение УПК приводит к существенному изменению условий функционирования комплексов РЗА. Наиболее уязвимы в этой связи комплексы ступенчатой дистанционной защиты (ДЗ), устанавливаемые на линиях высокого и сверхвысокого напряжения в качестве резервных защит от междуфазных коротких замыканий (КЗ) [1].

К основным проблемам указанных защит, возникающим на компенсированных линиях, относят инверсии напряжения или тока, низкочастотные колебания при КЗ и динамическое изменение параметров компенсированной линии.

Инверсии возникают при КЗ вблизи конденсаторной батареи (КБ) управляемого или неуправляемого УПК. При этом инверсии напряжения или тока вызваны соответственно превышением емкостным сопротивлением УПК значений индуктивного сопротивления участка от КБ до места КЗ (1) или суммарного индуктивного сопротивления схемы рис. 1 (2). Векторные диаграммы (ВД) тока компенсированной линии и напряжений по обоим концам УПК для указанных случаев инверсии приведены на рис. 2 и 3. Расположение векторов токов и напряжений на приведенных ВД указывает на нахождение замера сопротивления комплекта ДЗ (см. рис. 1) в 3-ем квадранте характеристики срабатывания. Это означает отказ срабатывания ДЗ при внутреннем КЗ.

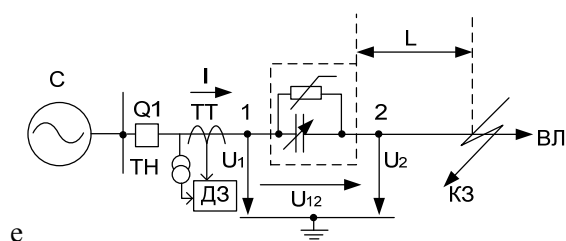


Рис. 1. Поясняющая схема.

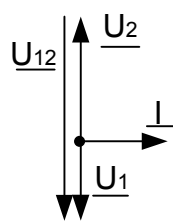


Рис. 2. ВД токов и напряжений при инверсии напряжения в фазе А

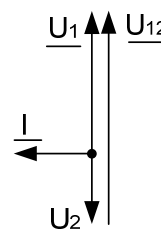


Рис. 3. ВД токов и напряжений при инверсии тока в фазе А

$$\underline{U}_1 = \underline{I} \times j(X_L - X_C) \Rightarrow X_L < X_C, \quad (1)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}}{j(X_{C1} + X_L - X_C)} \Rightarrow X_{C1} + X_L < X_C, \quad (2)$$

где X_{C1} , X_L , X_C - индуктивные сопротивления системы, участка линии до КЗ и емкостное сопротивление КБ УПК соответственно;

E , $\underline{I}$, $\underline{U}_1$, - фазное ЭДС, линейный ток и напряжение в точке замера 1 (см. рис. 1) соответственно.

Возникновение новых явлений в электромагнитном переходном процессе при установке управляемого или неуправляемого УПК обусловлено изменением схемы замещения сети, в которой происходит авария или сильное возмущение. В этом случае наблюдается введение в сеть с активно индуктивными элементами сосредоточенной емкости. Это приводит к изменению дифференциальных уравнений, описывающих работу схемы, что влечет возникновение свободных периодических составляющих токов и напряжений пониженной частоты (менее 50 Гц) с одновременным исчезновением свободной апериодической составляющей [2].

Динамическое изменение сопротивления линии приводит к искажению замера сопротивления. Уровень искажения определяется значением степени компенсации УПК при КЗ. Указанный параметр в каждом конкретном случае зависит от множества факторов [3]:

- типа продольной компенсации (управляемой/неуправляемой);
- защиты от перенапряжения на КБ;
- топологии сети и места возникновения КЗ.

Для неуправляемого УПК обычно в качестве защиты от перенапряжения на КБ применяют разрядники, ограничители перенапряжений (ОПН) или их комбинацию. В первом случае значение сопротивления УПК при КЗ либо остается равным емкостному сопротивлению КБ (несрабатывание разрядника), либо снижается до значения близкого к 0 (шунтирование КБ разрядником). При применении ОПН сопротивление УПК при КЗ принимает активно-емкостной характер [4]. В обоих вариантах диапазон изменения степени компенсации

компенсирующего устройства при КЗ зависит от параметров защиты от перенапряжений КБ УПК и текущего действующего значения тока компенсированной линии [3].

Еще более усложняется рассматриваемый вопрос при применении управляемых устройств продольной компенсации (УУПК). При КЗ на компенсированной или смежных линиях УУПК по команде от своей системы управления и защиты (СУРЗА) или переходит в индуктивный режим путем полного открытия тиристоров, или сохраняет предшествующее аварии значение степени компенсации [5]. Сохраненное значение степени компенсации УУПК определяется по заранее заданному закону регулирования в доаварийном режиме и варьируется в диапазоне от одного до трех сопротивлений КБ УУПК (наиболее вероятное значение $1,1X_{кб}$). От возможных перенапряжений на УУПК в емкостном режиме защищает ОПН. Переменный характер степени компенсации УУПК приводит к варьированию уровней токов КЗ компенсированной линии, необходимых для срабатывания ОПН (рис. 4), что приводит к возможному несрабатыванию ОПН при КЗ на смежных с ней участках.

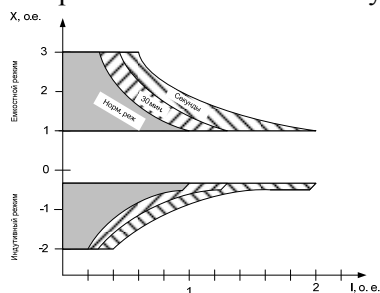


Рис. 4. Диапазон изменения сопротивления УУПК в зависимости от тока в компенсированной линии, отнесенного к номинальному току УУПК

Следовательно, диапазон изменения состояния УУПК при КЗ по сравнению с неуправляемым УПК существенно расширился. Одновременно с этим очевидно и увеличение объема параметров, от которых зависит указанное состояние УУПК. В частности, помимо выше указанных факторов оно зависит и от команд СУРЗА УУПК, сформированных как в доаварийном режиме, так и в процессе развития аварии. При этом состояние указанного комплекса без применения каналов связи (КС) однозначно определимо только в месте установки УУПК.

2.2 Адаптация ДЗ для воздушных линий сверхвысокого напряжения с УПК

Для обеспечения необходимых показателей быстродействия и селективности комплектов ДЗ, устанавливаемых на ВЛ СВН с неуправляемыми и управляемыми устройствами продольной компенсации, применяют целый комплекс мероприятий по их адаптации к новым условиям [3], [6]:

1) подключение комплектов ДЗ к линейному трансформатору напряжения (ТН), установленному за УПК – частичная компенсация эффекта динамического изменения параметров компенсированной линии при КЗ, путем исключения УПК из зон действия одного из двух комплектов;

2) модернизация структуры реле, учитывающая рассмотренные выше эффекты, а именно:

- применение поляризации и запоминания предшествующего значения напряжения – отстройка от инверсии напряжения;

- применение дополнительного компенсирующего параметра, позволяющего учитывать влияние продольной компенсации – снижение эффекта динамического изменения параметров компенсированной линии при КЗ;

3) корректировка параметров и уставок реле с учетом рассмотренных выше эффектов – отстройка от динамического изменения параметров компенсированной линии и низкочастотных колебаний при КЗ;

4) проведение исследований работы комплектов защит на моделях сетей, реализованных в различных программных и программно-аппаратных комплексах моделирования.

Первый способ имеет существенное ограничение по применению в части вариантов установки УПК. При этом сам УПК и его ошиновка выводятся из зоны действия одного из комплектов ДЗ.

Модернизация структуры защиты путем использования поляризации полностью решает лишь проблему инверсии напряжения [3]. Применение дополнительного компенсирующего параметра, позволяющего удаленно расчетным путем определить падение напряжения на УУПК, рационально при выполнении условия проведения расчетов на базе локальных измерений в месте установке комплекта ДЗ и известных постоянных параметров продольной компенсации. Реализация подобного решения для снижения влияния эффекта динамического изменения параметров возможно только для случая неуправляемого УПК, для которого все параметры постоянны. В случае УУПК провести удаленно корректную оценку текущей степени компенсации при КЗ не представляется возможным в связи с влиянием на нее СУРЗА УУПК.

Таким образом, основным способом отстройки от динамического изменения параметров линии и низкочастотных колебаний при КЗ для УУПК может служить только расчет уставок комплектов ДЗ. При этом дистанционная защита должна учитывать возможность как сохранения в работе КБ, так и ее частичного или полного шунтирования. Первая ступень ДЗ линии с УУПК должна выбираться исходя из предположения, что КБ введена в работу (3) [7]. При этом $k_{омс1}$ задается с учетом возможного возникновения низкочастотного колебательного процесса [3], а степень компенсации УУПК максимальная. Это приводит к сокращению зон отключения без выдержки времени первых ступеней комплектов ДЗ при внутреннем КЗ и шунтировании КБ УУПК. В зависимости от максимального значения степени компенсации УУПК указанное сокращение составляет от 9 до 60% длины компенсированной линии.

$$X_{Iст} = k_{омс1} (X_{ВЛ\ УУПК} - X_{УУПК_max}), \quad (3)$$

где $k_{омс1}$ - коэффициент отстройки для 1-ой ступени;

$X_{ВЛ\ УУПК}$, $X_{УУПК_max}$ - индуктивные сопротивления компенсированной линии и максимальное значение степени компенсации УУПК.

Обеспечить отключение на оставшемся незащищенном участке ВЛ СВН с УУПК возможно двумя вариантами, основанными на противоположных допущениях. В первом варианте, исходя из предположения, что КБ выведена из работы, защита реализована на базе одной ступени (соотношения (4)-(5)). Во втором варианте, исходя из обратного предположения - на базе двух ступеней (соотношения (6)-(7)). Первое решение приводит к возникновению зоны излишнего срабатывания при КЗ на смежном участке. Второй вариант вызывает увеличение до 1,0 с задержки в отключении КЗ в конце компенсированной линии.

$$X_{IIст} = k_{омсII} (X_{ВЛ\ УУПК} + k_{T1} k_{омс1} X_{ВЛ\ смеж}), \quad (4)$$

$$X_{IIст} = k_{омсII} (X_{ВЛ\ УУПК} + k_{T2} X_{T\ min}) \quad (5)$$

$$X_{IIст} = k_{омсII} (X_{ВЛ\ УУПК} - X_{УУПК_max} + k_{T1} k_{омс1} X_{ВЛ\ смеж}), \quad (6)$$

$$X_{IIIст} = k_{омсIII} (X_{ВЛ\ УУПК} - X_{УУПК_max} + k_{T1} X_{IIссмеж_ВЛ}), \quad (7)$$

где $k_{омсII} = k_{омсIII} = 0,85 - 0,9$, k_{T1} и k_{T2} - коэффициенты отстройки для 2-ой и 3-ей ступеней, а также коэффициенты токораспределения в рассматриваемой сети;

$X_{ВЛ\ смеж}$, $X_{T\ min}$ - индуктивные сопротивления смежного с компенсированной линией участка(ов) и силового трансформатора соответственно;

$X_{IIссмеж_ВЛ}$ - уставка реле сопротивления второй ступени дистанционной защиты смежного с компенсированной линией участка.

Отмеченное при рассмотрении вопроса выбора уставок ухудшение селективности и быстродействия комплектов ДЗ вызвано их расчетом для фиксированного режима, не учитывающего динамическое изменение параметров линии. Остальные мероприятия так же не могут полностью нивелировать указанный эффект продольной компенсации, а проведение моделирования лишь позволяет подтвердить или опровергнуть корректность выбора уставок. При этом применение УУПК еще более усложняет проблему как в связи с расширением возможного диапазона изменения степени компенсации, так и в связи с отказом от ряда мероприятий по адаптации ДЗ. Таким образом, требуется разработать усовершенствованный метод применения комплектов ДЗ на линиях с УУПК, позволяющий устранить указанные выше недостатки.

2.3 Усовершенствованный метод применения дистанционной защиты на ВЛ СВН с УУПК.

Для синтеза усовершенствованного метода применения комплектов ДЗ на ВЛ СВН с УУПК, позволяющего повысить показатели селективности и быстродействия указанных защит, проведен анализ мест их подключения к ТН. Выявлено расширение зоны отключения без выдержки времени первой ступени комплекта ДЗ при установке УУПК в начале/конце линии и применении линейного ТН.

В связи с этим предложен усовершенствованный метод применения комплектов ДЗ при установке УУПК в середине или на 1/3 длины линии. В этом случае компенсированная линия разбивается на участки в месте установки УУПК. На каждом участке применяются два комплекта ДЗ (рис. 5). Подобное решение реализовано только для 1-ой и 2-ой ступеней. Резервирование действия указанных ступеней линии 3-ими ступенями производится только по концам компенсированной ВЛ.

Для реализации предлагаемого варианта в СУРЗА УУПК дополнительно вводятся два двухступенчатых комплекта ДЗ, подключенных к ТН, расположенным по обеим сторонам от УУПК. Указанные комплекты (далее комплекты ДЗ УУПК) контролируют возникновение междуфазных КЗ на линии с обеих сторон от УУПК. При этом применение двух независимых комплектов, взаимоисключающих УУПК из зоны срабатывания каждой из защит, позволяет зафиксировать и расширить зоны защиты первых и вторых ступеней участков компенсированной линии.

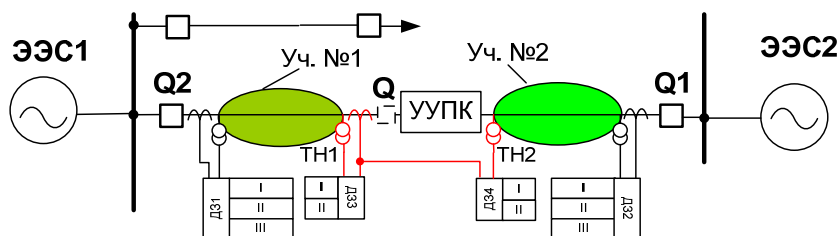


Рис.5.а. Разбивание компенсированной линии на две защищаемые зоны

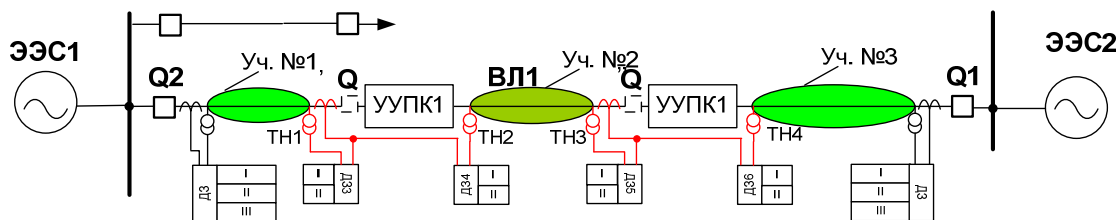


Рис. 5.б. Разбивание компенсированной линии на три защищаемые зоны

Сигналы срабатываний от ступеней комплектов ДЗ УУПК объединяются по схеме «ИЛИ» в единую команду на отключение. Указанная команда передается или по КС на отключение выключателей, установленных по концам линии (рис. 6.а), или на отключение дополнительного выключателя вблизи УУПК (рис. 6.б). В первом случае необходимо преобразовать КС, связывающий автоматику управления концевых выключателей с УУПК, из одностороннего в двусторонний. Во втором случае требуется установка дополнительного выключателя УУПК.

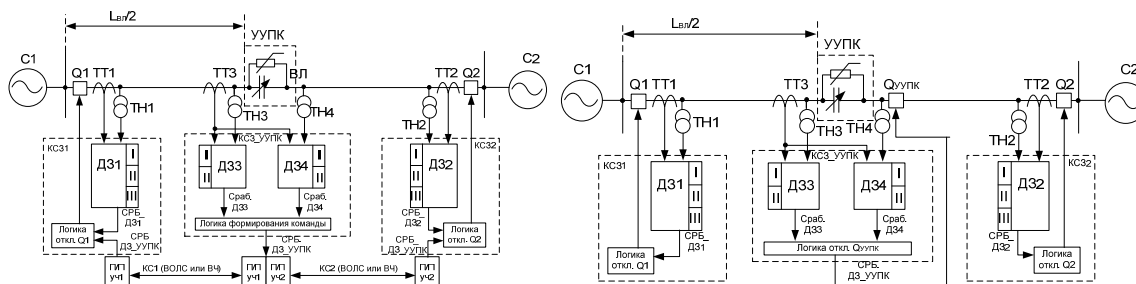


Рис. 6.а. Схема взаимодействия комплектов ДЗ компенсированной линии при передаче команды на отключение на концевые выключатели.

Рис. 6.б. Схема взаимодействия комплектов ДЗ компенсированной линии при передаче команды на отключение на выключатель УУПК.

Параметры характеристик срабатывания 1-х и 2-х ступеней ДЗ для обоих вариантов выполнения отключения одинаковы и задаются соотношениями (8) - (10).

$$X_{\text{Iст}} = k_{\text{уупк}} k_{\text{отсI}} X_{\text{ВЛ УУПК}}, \text{ при } (X_{\text{ВЛ УУПК}} - X_{\text{УУПК_max}}) > k_{\text{уупк}} X_{\text{ВЛ УУПК}}, \quad (8)$$

$$X_{\text{IIст}} = k_{\text{отсII}} (k_{\text{уупк}} X_{\text{ВЛ УУПК}} + k_{\text{T1}} k_{\text{отсI}} X_{\text{ВЛ смеж}}), \quad (9)$$

$$X_{\text{IIст}} = k_{\text{отсII}} (k_{\text{уупк}} X_{\text{ВЛ УУПК}} + k_{\text{T2}} X_{\text{T min}}), \quad (10)$$

где $k_{\text{уупк}}$ - коэффициент, учитывающий место установки УУПК на линии (при установке одного УУПК $k_{\text{уупк}} = 0,5$; при установке двух УУПК - 0,33).

Оба решения в части выполнения отключения имеют свои преимущества и недостатки. Очевидный недостаток первого – это отсутствие локального действия, присущего второму решению. С другой стороны для первого решения наблюдается несколько большая эффективность в части повышения показателей быстродействия и селективности.

2.4 Проведенные испытания.

Проведены исследования эффективности работы комплектов ДЗ для традиционного и усовершенствованного метода применения защит и различных вариантов подачи команды на отключение от комплектов ДЗ УУПК. Анализ проведен как теоретически, так и на модели сети, реализованной в программе моделирования PSCAD.

В рамках теоретических исследований выполнен расчет длин зон 1-х и 2-х ступеней, а также требуемых коэффициентов чувствительности. Расчеты проведены для введенного/выведенного состояния КБ УУПК при условии изменения степени компенсации, длин линий и коэффициента токораспределения в широком диапазоне. Оценены участки, на которых предполагается двухстороннее отключение КЗ без и с выдержками времени (рис. 7). Для усовершенствованного метода применения комплектов ДЗ наблюдается фиксация и существенное расширение зон защищаемой линии, где отключение КЗ происходит без выдержки времени.

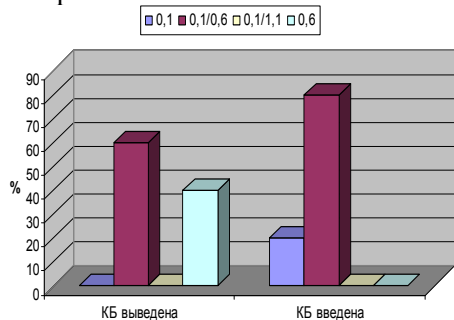


Рис. 7.а. Длины зон, отключаемых с разными выдержками времени (традиционный метод,

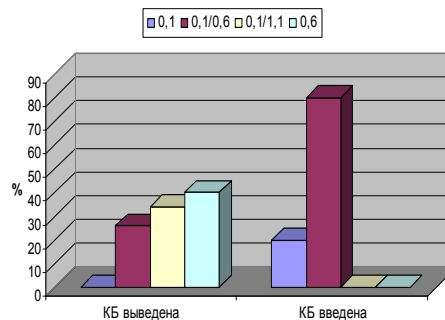


Рис. 7.б. Длины зон, отключаемых с разными выдержками времени (традиционный метод, расчет

расчет по соотношениям (3)-(5))

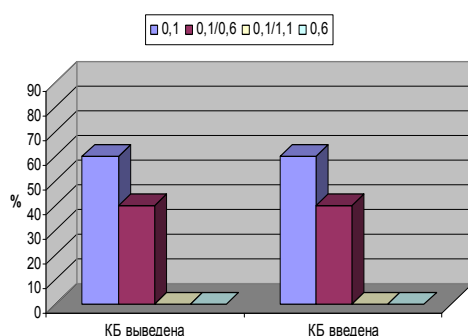


Рис. 7.в. Длины зон, отключаемых с разными выдержками времени (усовершенствованный метод, отключение концевых Q)

по соотношениям (3), (6), (7))

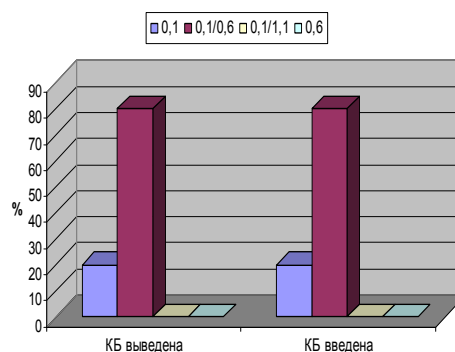


Рис. 7.г. Длины зон, отключаемых с разными выдержками времени (усовершенствованный метод, отключение Q УУПК)

Далее рассмотрена схема рис. 8 в программе моделирования PSCAD. Результаты моделирования действия 1-х и 2-х ступеней дистанционной защиты комплектов ДЗ1-ДЗ4 (см. рис. 8) при возникновении внутренних и внешних КЗ (К1-К4) подтвердили теоретические оценки, приведенные выше.

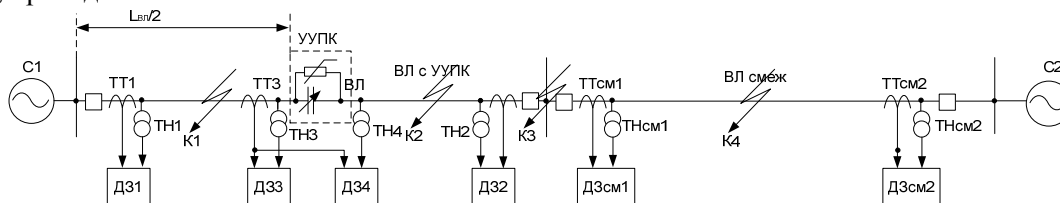


Рис. 8. Исследуемая схема.

В зависимости от вариантов отключения от ДЗ УУПК эффективность усовершенствованного метода варьируется. Наибольший эффект зафиксирован при применении отключения концевых выключателей и выражается:

- в расширении зоны двухстороннего отключения поврежденной линии без выдержки времени с 0 до 56% длины линии соответственно;
- в расширении суммарной длины зон первых ступеней ДЗ, действующих без выдержки времени с каждой из сторон с 28 до 78% длины линии соответственно;
- в обеспечении согласованной и селективной работы комплектов ДЗ линии с УУПК и комплектов ДЗ смежного некомпенсированного участка сети.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Предложен и исследован усовершенствованный метод применения дистанционной защиты линии сверхвысокого напряжения с управляемой продольной компенсацией. Метод впервые основан на разбиении линии с управляемым устройством продольной компенсации на ряд защищаемых участков. Это достигается за счет применения двух комплектов дистанционной защиты, подключенных к трансформаторам напряжения, расположенным по обеим сторонам от управляемого устройства продольной компенсации, что повышает показатели селективности и быстродействия рассматриваемых защит.

2). Проведенные исследования усовершенствованного метода применения защит указывают на повышение показателей эффективности использования дистанционной защиты на компенсированных линиях. Это приводит к уменьшению длительности негативного воздействия токов короткого замыкания на первичное оборудование в случае неисправности или вывода из работы комплекта основных защит, а также к предотвращению излишних срабатываний при коротких замыканиях на смежном элементе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Руководящие указания. Выпуск 7. «Дистанционная защита линий 35-330 кВ». Москва, изд. «Энергия», 1966 г .
- [2] Лосев С.Б., Абрамов Б.Ч. «Расчет электромагнитных переходных процессов для релейной защит на линиях большой протяженности». Москва, изд. «Энергия», 1972 г.
- [3] Technical Brochures 411 – WG B5.10 CIGRE «Protection Control and Monitoring of Series Compensated Networks».
- [4] Goldsworthy, Daniel, L. «A Linearised model for MOV-Protected Series Capacitors», IEEE Trans., v. PWRS-2, n.4, Nov. 1987.
- [5] Mohan Mathur, Rajiv K. Varma. Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission System. Wiley-IEEE Press, 2002.
- [6] Anderson P. M., Farmer R. G. «Series Compensation of Power System». California: PBLSH! Inc, 1996 г.
- [7] Атабеков Г.И. «Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей». Москва, Госэнергоиздат, 1957 г.