

Продольно компенсированные линии в большинстве энергосистем требуют особого подхода в испытаниях защит в режиме реального времени

B.M. BUCHHOLZ, NTB Technoservice

V. HENN, R. KREBS, Siemens AG

G. ARRUDA, CHEFS

R. DUTRA, FURNAS

P. CAMPOS, ELETRONORTE

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Транзитная система, конденсатор УПК (устройства продольной компенсации), инверсия напряжения, инверсия тока, дистанционная защита, дифференциальная защита, уменьшение времени отключения, испытания в режиме реального времени, RTDS (Real Time Digital Simulator = цифровой имитатор, работающий в режиме реального времени)

1. ВВЕДЕНИЕ

Недавно были разработаны современные технологии в области дифференциальных защит, применяемые для длинных линий электропередач; при этом использовались стандарты обмена данными, ликвидирующие мифы о том, что эти технологии можно использовать только для ЛЭП длиной менее 100 км [9].

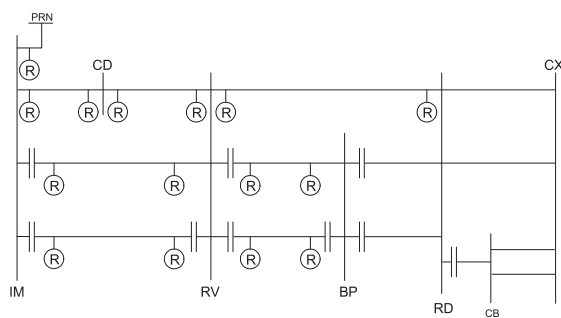
На практике был получен опыт использования дифференциальной защиты для линии 230 кВ длиной 202 км с использованием 70% продольной компенсации, линия располагается в смешанной системе.

Пример применения, используемый в этой статье, это линия 230 кВ Itumbiara-Rio Verde (IM-RV), двухцепная, длиной 220 км и имеющая 70% продольной компенсации. По соседству с этой линией находятся другие параллельные продольно компенсированные линии, что создает трудности при использовании традиционных принципов построения дистанционной и токовой защит.

Причиной выбора упомянутой линии стало то, что система, в которой располагается линия, является смешанной. В середине 1970-х в системе была только одна линия 138 кВ, соединяющая энергосистемы четырех разных компаний – CELG, FURNAS, ELETRONORTE, и CEMAT. Понемногу в течение многих лет система усиливалась, имея 3 цепи 230 кВ и одну цепь 138 кВ в начале 1990-х, и в конце концов в 2006 г. к ним добавилась линия 500 кВ, соединяющая параллельно остальным подстанции Itumbiara и Cuiabá.

Чтобы сделать возможным протекание мощности по линиям 230 кВ (даже в некоторых случаях это относится и к линиям 500 кВ), необходимо рассматривать возможность использования для этих линий продольной компенсации.

Из-за применения продольной компенсации существующие схемы защит (некоторые из которых имеют реле, неподходящие для применения при продольной компенсации) должны быть заменены подходящими системами защит.



®Тестируемые реле

Рис. 1: Моделирование 230 кВ FURNAS и сети Eletronorte

Согласно техническим данным новых защит, в состав которых входят дистанционная и направленная токовая защиты, они подходят для использования на линиях с продольной компенсацией. Новые системы защит проверялись в сериях смоделированных ситуаций согласно конфигурации энергосистемы, показанной на рисунке 1; для моделирования ситуаций использовался RTDS цифровой имитатор, работающий в реальном времени (Erlangen, Germany).

На рисунке 1 показано, что линия Itumbiara-Rio Verde, 230 кВ (IM-RV), двухцепная, имеет 70% компенсацию со стороны ПС Itumbiara (IM). Высокая степень компенсации, сосредоточенной только на одном конце линии, является одной из самых серьезных проблем. Особенно это касается коротких замыканий через переходное сопротивление или междуфазных КЗ близко к конденсатору, которые не вызывают срабатывания шунта конденсатора. Только при достижении с задержкой термического предела варистора (варистора на основе окиси металла) и срабатывания при этом шунта конденсатора, дистанционная защита сможет отключить повреждение. Таким образом, общее время отключения будет более 150 мс, что является максимальным значением для линии 230 кВ согласно Своду правил релейной защиты ONS (Brazilian National System Operator = Национальный системный оператор Бразилии). Следовательно, между заказчиком и производителем было заключено соглашение, что дистанционная защита 7SA6 будет заменена на дифференциальную защиту 7SD5, в которой функция дистанционной защиты используется в качестве резервной защиты. Оптический канал связи для обмена данными между терминалами в дополнение к последним разработкам с точки зрения функциональности 7SD5, сделал возможным обмен данными на расстоянии более 220 км.

2. КОНДЕНСАТОРЫ УПК

2.1. Расположение конденсаторов и измерительных трансформаторов

Возможно следующее расположение конденсаторов УПК:

- высокая степень компенсации в середине линии
- низкая степень компенсации по обоим концам линии
- высокая степень компенсации на одном конце линии
- любая степень компенсации на соседней линии

Когда батареи конденсаторов располагаются на подстанции, имеет значение и места установки трансформаторов тока (ТТ) и трансформаторов напряжения (ТН). Варианты расположения:

- ТТ и ТН на стороне линии
- ТТ и ТН на стороне шин
- ТТ на стороне шин и ТН на стороне линии

Если ТТ и ТН располагаются по разные стороны от конденсатора, эффективной точкой измерения является место установки ТН.

2.2. Уровень защиты батарей конденсаторов

Обычно степень защиты конденсатора выбирается, исходя из того, что мы ожидаем, что при внешних повреждениях не сработает разрядник и шунт. Следовательно, большинство (но не все) внутренние низкоомные повреждения приведут к срабатыванию шунта, в то время как высокоомные замыкания ограничивают ток КЗ до значений, при которых конденсатор остается в работе. Всякий раз, когда срабатывает шунт, линия становится некомпенсированной [6].

2.3. Эффекты, возникающие при коротких замыканиях вследствие компенсации линии

При использовании конденсаторов УПК могут возникнуть следующие явления:

- уменьшение замера сопротивления при повреждении
- увеличение замера сопротивления при повреждении
- инверсия напряжения
- инверсия тока
- перенапряжения

2.3.1. Уменьшение замера сопротивления при повреждении

В какой бы точке между точкой измерения и точкой повреждения не находился бы конденсатор, происходит ошибочный замер сопротивления. Это явление и явление подсинхронных колебаний подробно описывается в [8,10]. Также необходимо учитывать наличие конденсаторов на смежных линиях, где промежуточная подпитка может усилить эффект уменьшения замера напряжения.

2.3.2. Увеличение замера сопротивления при повреждении

При расположении конденсатора между точкой измерения и точкой замыкания, и если оставшееся индуктивное сопротивление меньше емкостного, может возникнуть необходимость увеличить охват зоны действия ступени защиты до значения, большего сопротивления конденсатора. Это может оказаться интересным для ступеней защиты, направленных «назад» для обнаружения повреждений на шинах, в то время как ТН расположены на стороне линии.

2.3.3. Инверсия напряжения

Когда конденсатор расположен между точкой замера и точкой КЗ, и оставшееся индуктивное сопротивление меньше емкостного, то измеренное сопротивление будет иметь емкостной характер. Это приведет к инверсии напряжения. Как описано в [7,8], определение направления с использованием работы с напряжениями “по памяти”, может решить эту проблему, если только не возникнет инверсия тока.

2.3.4. Инверсия тока

Когда полное сопротивление петли КЗ имеет емкостной характер, ток КЗ приобретает емкостной характер, что называется инверсией тока. Инверсия тока возникает, главным образом, если конденсаторы с большим сопротивлением (используемые для длинных линий с высокой степенью компенсации) расположены на одном из концов линии. При наличии мощных источников КЗ может изменить свой тип от обычного активно-индуктивного на активно-емкостной, таким образом, ток КЗ зависит от конденсаторов, и ограничивается, главным образом, ими. В зависимости от степени защиты варистора (MOV) и искровых промежутков, конденсаторы не шунтируются мгновенно после возникновения КЗ, результатом чего может быть серьезная ошибка при определении направления на основе запомненных напряжений.

2.3.5. Перенапряжения

Последовательно включаемый конденсатор, линия и сопротивление источника представляют собой колебательный контур, где значение резонансной частоты задается сопротивлением линии между конденсатором и местом КЗ. При этом могут возникнуть неожиданные перенапряжения.

3. ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА НА ЛИНИЯХ С ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

В энергосистемах Бразилии можно видеть применение мощных конденсаторных УПК, устанавливаемых в начале линии. При наличии мощных источников это приведет к инверсии тока. Обычно токи КЗ ожидаются такого значения, при котором мгновенно срабатывает шунт конденсатора. При испытаниях ТНА мы обнаружили некоторые ситуации, особенно двухфазные КЗ и высокоомные КЗ вблизи конденсаторов, при которых токи достаточно малы и не вызывают срабатывания шунта.

3.1. Инверсия тока

В проверяемой системе возникает инверсия тока без срабатывания шунта, чего ранее не наблюдалось. Разделы с 3.1.1 до 3.1.5 наглядно иллюстрируют, что дистанционная защита, независимо от места установки ТН, не может использоваться для продольно компенсированных линий, если будет существовать возможность появления инверсии тока.

3.1.1. ТН на стороне линии, а повреждение в «прямом» направлении

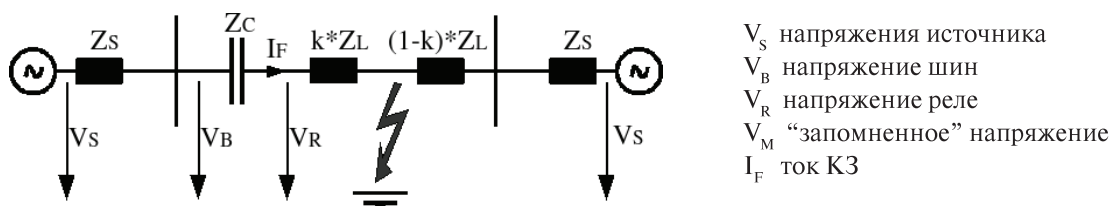


Рис. 2: Упрощенный случай КЗ при отсутствии нагрузки, КЗ в «прямом» направлении

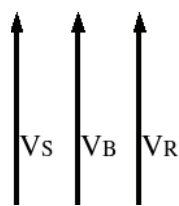


Рис. 3: Вектора напряжения доаварийного режима при отсутствии нагрузки

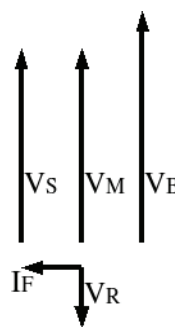


Рис. 4: Вектора напряжения при КЗ и токе КЗ I_F

На рисунке 3 показаны вектора напряжения доаварийного режима при отсутствии нагрузки. Напряжение источника V_S , напряжение на шинах V_B и напряжение в точке установки реле V_R находятся в фазе.

На рисунке 4 показаны вектора напряжения в момент КЗ. “Запомненное напряжение” V_M всегда идентично доаварийному напряжению в месте установки реле V_R . Из-за емкостного тока КЗ реле, которое осуществляет определение направление по фактическому току КЗ и запомненному напряжению (V_M, I_F), определит, что КЗ произошло “за спиной”, в то время как оно произошло в “прямом” направлении.

3.1.2. ТН на стороне линии, а КЗ в “обратном” направлении

В этом случае мы видим классическую инверсию напряжения. Таким образом, необходимо работать с «запомненными» напряжениями. Иначе замыкания на шинах за конденсатором будут расцениваться как КЗ в направлении «вперед».

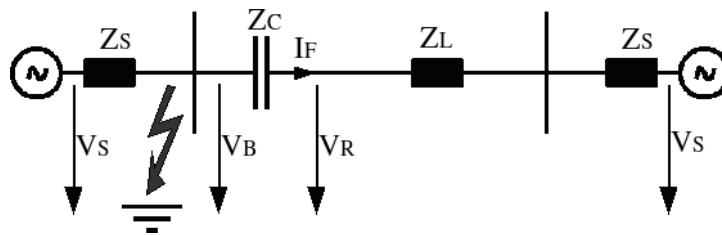


Рис. 5: Упрощенный случай КЗ при отсутствии нагрузки, КЗ в «обратном» направлении

3.1.3. ТН на стороне шин, а повреждение в “прямом” направлении

Из векторных диаграмм рисунков 3 и 4 можно видеть, что доаварийные напряжения (и, следовательно, “запомненное” напряжение) одинаковы с напряжением на стороне линии. Также и в этом случае, запомненное напряжение приведет к ошибочному определению направления.

При повреждениях в середине линии и при более слабом источнике (при коммутациях в системе), мы получаем классическую ситуацию с инверсией напряжения:

$$\begin{aligned} X_C + k \times X_L &< 0 \\ X_S + X_C + k \times X_L &> 0. \end{aligned}$$

Здесь необходимо работать по памяти, «незапомненные» напряжения не являются решением.

3.1.4. ТН на стороне шин, а КЗ в «обратном» направлении

В таком случае реле может работать «по памяти», а в случае, если в обратном направлении нет конденсаторов, реле также может работать и с фактическими значениями напряжения.

3.1.5. ТН на стороне линии, КЗ между конденсатором и ТТ

При КЗ между конденсатором и ТТ, реле будет получать значение тока КЗ I_{F1} , и значение напряжения

$$V_R = X_C \times I_{F2},$$

Замер напряжения будет равен

$$X_M = V_R / I_F = X_C \times I_{F2} / I_{F1},$$

который ничего общего не имеет с фактическим сопротивлением. Мы предполагаем, что $I_{F1} > I_{F2}$, таким образом, модуль измеренного напряжения меньше X_C и меньше ступени с полным охватом Z1B. Поскольку определение направления происходит на основе “запомненного” напряжения, то КЗ будет расцениваться в направлении “вперед”, и мы будем иметь отключение во всех случаях.

3.2. Выбор уставок ступени и использование схем телеускорения

Первым требованием для возможности использования дистанционной защиты в продольно компенсированных сетях является то, что необходимо исключить инверсию тока, как это было показано в разделе 3.1.

В зависимости от зоны действия ступеней в некомпенсированных сетях, будет использоваться охват ступени Z_1 , составляющий 80-90% от длины линии. Для сетей с продольной компенсацией необходимо сильно уменьшить охват. Даже в случае, если перед реле на защищаемой линии не установлен конденсатор, конденсаторы на смежных или параллельных линиях влияют на уменьшение зоны действия.

Как следствие этого, схема телеускорения является абсолютно необходимой, а функциональность дистанционной защиты уменьшается до функции определения направления. Времена отключения для КЗ в любой точке защищаемой линии составляют 35-45 мс с учетом времени передачи сигнала.

4. ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ТНЗНП) НА ЛИНИЯХ С ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

4.1. Определение направления

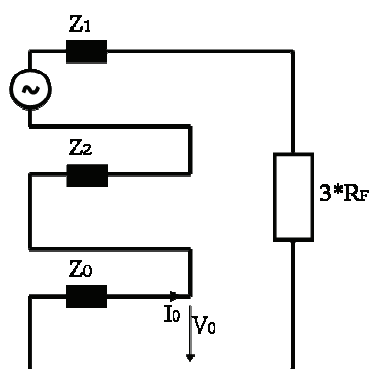


Рис. 6: Эквивалентная схема симметричных составляющих для замыкания на землю

ТНЗНП работает, главным образом, с током и напряжением нулевой последовательности. Выражение

$$Z_0 = -V_0 / I_0$$

дает нам сопротивление источника, но не сопротивление КЗ. Если КЗ произошло в “обратном” направлении, то ток I_f изменяет свое направление. В результате этого измеренное сопротивление имеет отрицательное значение реактанса. Или наоборот: если измеренное сопротивление имеет положительную мнимую часть, КЗ произошло в “прямом” направлении. Если реактанс имеет отрицательный знак, то КЗ произошло “за спиной”.

4.2. Продольно компенсированная линия и ТН на стороне линии

На рисунке 7 показана однолинейная схема – исходная и схема замещения с использованием симметричных составляющих. Даже если конденсаторы не находятся в цепи протекания тока нулевой последовательности, они имеют сопротивление нулевой последовательности

$$Z_{C1} = Z_{C2} = Z_{C0} = Z_C.$$

При высокоомных КЗ токи КЗ малы, и шунт конденсаторной батареи не срабатывает.

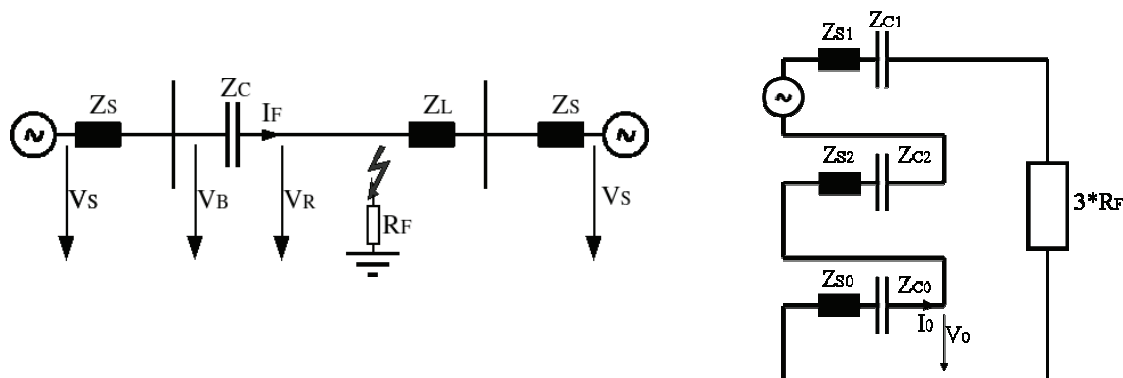


Рис. 7: Упрощенный случай КЗ на землю в «прямом» направлении с большим переходным сопротивлением при установке ТН на стороне линии и схема замещения на базе симметричных составляющих

4.2.1. Малое сопротивление источника и высокая степень компенсации

В некоторых случаях, особенно при высокой степени компенсации, емкостное сопротивление может быть больше индуктивного сопротивления эквивалентной ЭДС. Заземленные трансформаторы, подключенные к шинам, также имеют меньшее значение сопротивления нулевой последовательности. Таким образом, может случиться так, что результирующее сопротивление будет иметь емкостной характер (даже если сопротивления прямой и обратной последовательности имеют индуктивный характер).

В этом случае защита будет расценивать КЗ в «прямом» направлении как КЗ «за спиной»!

С другой стороны, если КЗ и в самом деле произошло «за спиной», то сопротивление $Z_L + Z_S$ находится на стороне линии и имеет индуктивный характер, а поэтому рассчитываемое сопротивление будет иметь мнимую часть с отрицательным знаком. Это означает, что КЗ будет корректно определено как произошедшее «за спиной».

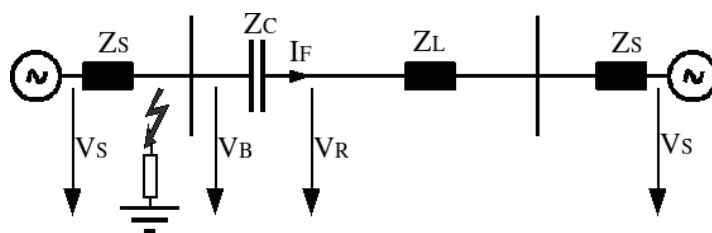


Рис. 8: Упрощенный случай КЗ с высокоомным КЗ на землю в обратном направлении и ТН на стороне линии

4.2.2. Малое сопротивление источника и высокая степень компенсации

Как только замер сопротивления рассматривается как индуктивный, все работает корректно.

4.3. Продольно компенсированные линии и ТН на стороне шин

В этом случае мы видим сопротивление источника слева как чисто индуктивное. Результирующее сопротивление для КЗ «за спиной» всегда реактивно, поскольку полное сопротивление линии больше, чем емкостное сопротивление. ТЗНП будет работать правильно.

5. ЗАЩИТА ОТ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Общим правилом при проектировании защиты батареи конденсаторов является несрабатывание защиты при внешних КЗ.

На стороне линии возникает напряжения, рассчитываемое следующим образом (пренебрегаем активными составляющими сопротивлений):

$$\begin{aligned} V_R &= I_F \times X_L \\ V_{S1} &= I_F \times (X_{S1} + X_C + X_L) \\ V_R / V_{S1} &= X_L / (X_{S1} + X_C + X_L). \end{aligned}$$

В качестве примера имеем:

$$\begin{aligned} X_{S1} &= 0.1 \times X_L \\ X_C &= -0.7 \times X_L \\ V_R / V_{S1} &= 1 / (0.1 - 0.7 + 1) = 2.5. \end{aligned}$$

В этом примере напряжение возрастает до 250%. Это может составлять опасность для оборудования. Если защита от повышения напряжения со стандартными уставками подключается к ТН, расположенному на стороне линии, то она может выполнить мгновенное отключение при внешнем КЗ.

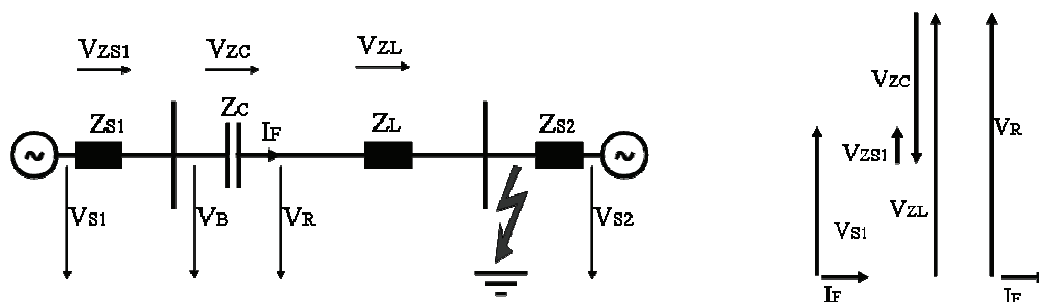


Рис. 9: Упрощенный случай внешнего КЗ и соответствующая ему векторная диаграмма

6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

Во многих спорах между инженерами по релейной защите можно услышать утверждения, что дифференциальная защита не подходит для линий с продольной компенсацией, потому что инверсия тока на одной стороне линии приводит к возникновению емкостного тока КЗ. При протекании индуктивного тока КЗ на другой стороне линии суммарный ток в точке КЗ, а, следовательно, и в дифференциальной защите, будет равен нулю, и отключения от реле не последует.

Следующие разделы с 6.1 по 6.3 помогут ответить на два основных вопроса:

- Возможно ли нулевое значение тока КЗ и какие должны быть условия для возникновения такой ситуации?
- Возможно ли построить характеристику срабатывания дифференциальной защиты для отключения всех внутренних металлических КЗ?

6.1. Возможно ли нулевое значение тока КЗ?

Может ли такое случиться, что при протекании емкостного тока КЗ на одной стороне линии, на другой стороне линии будет протекать индуктивный ток КЗ такого же по модулю значения?

Согласно рисунку 10, мы предполагаем, что напряжение источника одинаково по обеим сторонам линии.

$$\begin{aligned} I_{F1} &= -I_{F2} \\ V_s / (X_{S1} + X_C + k \times X_L) &= -V_s / (X_{S2} + (1-k) \times X_L) \\ X_{S1} + X_C + k \times X_L &= -X_{S2} - X_L + k \times X_L \\ X_C &= -(X_{S1} + X_{S2} + X_L). \end{aligned}$$

Таким образом, конденсатор не только компенсирует 100% индуктивного сопротивления линии, но также и сопротивления обоих источников. Этот случай нереален, поэтому нулевой ток КЗ невозможен.

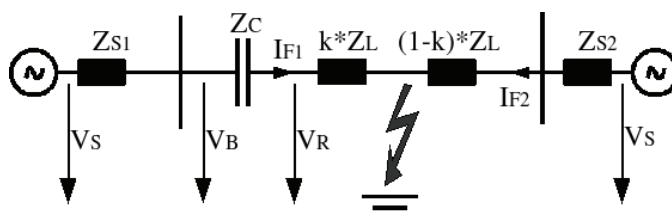


Рис. 10: Упрощенный случай КЗ на линии

6.2. Проверка наклона характеристики срабатывания дифференциальной защиты

Мы проверим, существует ли на линии такая точка, в которой ток торможения больше дифференциального тока, т.е. условия, при которых отключение не произойдет.

Хотя дифференциальные защиты и поставляются разными производителями, которые рассчитывают тормозные величины по разным методикам, дифференциальный ток всегда вычисляется согласно закону Кирхгофа. Для грубого расчета мы используем классический подход с коэффициентом торможения

$$STAB = k_{STAB} \times (|I_{F1}| + |I_{F2}|).$$

Посмотрим на токи в различных точках линии. Наиболее критичная точка находится на стороне линии, где расположен конденсатор УПК при $k = 0$. Здесь емкостной ток равен

$$I_{F1} = V_s / (X_{S1} + X_C + k \times X_L)$$

минимальному значению, и быстро возрастает по гиперболе, теоретически до бесконечности в точке резонанса емкости конденсатора и индуктивности линии плюс индуктивность источника. Индуктивный ток

$$I_{F2} = V_s / (X_{S2} + (1-k) \times X_L)$$

также минимален и возрастает по гиперболе, но с асимптотой, теоретически находящейся внутри источника, поэтому увеличение тока не такое быстрое.

При $k = 0$:

$$\begin{aligned} I_{F1} &= V_s / (X_{S1} + X_C) \\ I_{F2} &= V_s / (X_{S2} + X_L). \end{aligned}$$

При $X_{S1} = X_{S2} = 0.1 \times X_L$ (как пример с сильными подпитками) и $X_C = -0.7 \times X_L$ получаем

$$\begin{aligned} I_{F1} &= V_s / X_L \times (1 / (0.1 - 0.7)) = -1.66 \times V_s / X_L \\ I_{F2} &= V_s / X_L \times (1 / (0.1 + 1.0)) = 0.91 \times V_s / X_L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{DIFF} &= |-1.66 + 0.91| \times V_s / X_L = 0.75 \times V_s / X_L \\ \text{STAB} &= (|-1.66| + |0.91|) \times V_s / X_L = 2.57 \times V_s / X_L \end{aligned}$$

$$k_{\text{СТАБ}} < 0.75 / 2.57 < 0.29.$$

В этом случае КЗ может быть отключено при угле характеристики менее 0.29. Конечно, это нужно проверить для одно-, двух- и трехфазных КЗ по формуле вычисления, применяющейся для реле, и учесть необходимые отстройки. Здесь необходимо упомянуть, что перемещение точки КЗ вправо увеличивает П, который в итоге приведет к срабатыванию защиты конденсатора и шунтированию конденсатора. В этом случае, при повреждениях на правой стороне линии будут возникать только индуктивные токи, которые являются стандартной ситуацией и не создают проблем при работе защиты.

Точку КЗ около конденсатора (со стороны линии) необходимо проверить на предмет того, достаточен ли угол наклона характеристики дифференциальной защиты; особенно это относится к энергосистемам с высокой степенью компенсации и сильными подпитками с малыми сопротивлениями источников. Если наклона достаточно, то дифференциальная защита будет отключать все повреждения без выдержки времени.

6.3. Высокоомные КЗ

Если рассмотреть высокоомные КЗ, то мы увидим, что провал напряжения в точке КЗ незначителен, а также то, что ток КЗ (и, таким образом, и дифференциальный ток) определяется только активным сопротивлением. Вклад токов КЗ с левой и правой сторон неизвестен, однако они суммируются с нагрузочным током, что мы можем выразить общей формулой:

$$\begin{aligned} |a + b| &= < |a| + |b| \\ \text{DIFF} &= |I_F| \\ \text{STAB} &< |I_L| + |I_L| + |I_F| \\ \text{DIFF} &> k \times \text{STAB} \\ |I_F| &> k \times (|I_L| + |I_L| + |I_F|) > k \times \text{STAB} \\ |I_F| / |I_L| &> 2k / (1-k). \end{aligned}$$

В качестве примера, при наклоне 20% ток КЗ будет превышать 50% нагрузочного тока. Существуют современные реле дифференциальной защиты, в которых допускается значение наклона менее 5% в диапазоне нормальных нагрузочных токов. Таким образом, эти реле также чувствительны, как и реле токовой защиты от замыканий на землю.

Конечно, здесь также необходимо применять точные формулы расчета параметров реле с необходимыми коэффициентами запаса.

7. ОМП (ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ)

Корректная работа ОМП, несомненно, очень важна для защиты длинных линий, поскольку после КЗ необходимо провести инспекцию места повреждения. Однако, в устройствах ОМП, работающих на дистанционном принципе, используются аварийные напряжения, а также на эти устройства влияют емкостные сопротивления.

Точка КЗ на шинах (показаны слева на рисунке) определяется реле (показано на рисунке правее) как на расстоянии 70% вперед. 70% это сопротивление конденсатора, а «вперед» — результат ошибки в определении направления. Однако, реле на правой стороне линии определяет направление корректно («вперед»), и «видит» точку КЗ на расстоянии 30%, поскольку батарея конденсаторов остается в работе. Таким образом, результаты внешне выглядят правдоподобно, но, тем не менее, ошибочны.

Функцию определения места повреждения можно улучшить при использовании принципа работы ОМП, когда берутся данные по обоим концам линии.

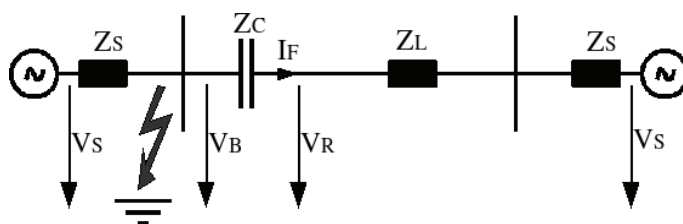


Рис. 11: Упрощенный случай внешнего КЗ

8. ИСПЫТАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТНА (АНАЛИЗАТОР ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕТИ)

Лаборатория TNA (transient network analyzer = анализатор переходных процессов в сети) Erlangen (Germany) оборудована RTDS (цифровой имитатор, работающий в режиме реального времени) для испытаний двух комплектов защит. Моделируемая система (показана на рисунке 1) содержит более 10 линий и 9 продольных конденсаторов. Сотни испытаний были проведены с дистанционной и дифференциальной защитой за многие недели с целью проверки уставок защит и в документирования испытаний.

9. ВЫВОДЫ

Последовательная компенсация (продольная компенсация) широко используются для увеличения пропускной способности длинных воздушных линий электропередач и для увеличения эффективности энергосистемы [1,2,3]. Эти конденсаторы не только влияют на режим работы энергосистемы, но и на ее характеристики при возникновении КЗ. Такие эффекты, как инверсия напряжения, хорошо известны; эти проблемы в реле дистанционной защиты решаются путем использования для определения направления принципа работы “по памяти”. В зависимости от места установки батареи конденсаторов, ее размеров и степени защиты платформы батареи, а также в зависимости от сопротивления источника, также возможно явление инверсии тока. Если возникает инверсия тока, то для защит появляется новая проблема. Высокоомная защита от замыканий на землю, ОМП и дифференциальная защита будут затронуты этим явлением тем или иным способом. Это было подтверждено при испытаниях на RTDS в режиме реального времени.

Мы увидели, что комбинация дистанционной защиты и ТНЗНП полезна, особенно при всех КЗ, при которых срабатывает шунт конденсатора. Тем не менее, для обеих защит требуется система обмена данными, например, высокочастотный канал. Если доступна для использования современная система обмена данными со скоростью передачи 64 кБит/с (рекомендуется 128 кБит/с, оптимальная скорость 512 кБит/с), то дифференциальная защита будет отключать все металлические КЗ и КЗ через переходные сопротивления с временами от 10 до 20 мс, а высокоомные КЗ – менее, чем за 40 мс.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Johns, A.T.: Flexible AC Transmission Systems (FACTS). ISBN 0-85296-771-3, IEE, UK.
- [2] Anderson, P.M.; Farmer R.G.: Series Compensation in Power Systems, ISBN 1-888747-01-3, PBLSH, Encinitas, CA, 1996.
- [3] Kimbark, E.W.: Improvement of System Stability by Switched Series Capacitors. IEEE Summer Power Meeting, Detroit, 20. June – 2. July, 1965, pp. 180-188.
- [4] Krebs, R.; Kumar, A.; Pretorius, C.; Retzmann, D.: Real-Time System Studies for FACTS and Protection. International Conference on Power System Technology (ICPST), Beijing, China, 1994.
- [5] Krebs, R.; Kumar, A.; Retzmann, D.: Real-Time Simulation for Evaluation of Transmission Line Protection Under Transient Conditions. 8th National Power System Conference (NPSC), New Delhi, 1994.

Москва, 7–10 сентября 2009 г.

- [6] Hofmann, S.; Krebs, R.; Kumar, A.; Wokusch, M.: A Novel Series-Capacitor Bank Protection Scheme. – Validity Tests with RTDS. 3rd International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS), Vasteras, Sweden, 1999.
- [7] Claus, M.; Holbach, J.; Krebs, R.: Fast Protection Under Difficult Conditions. – Real-Time Testing of Protection Relays on Series Compensated Lines. 12th International Conference on Power System Protection, (PSP 2000), Bled, Slovenja, 27th-29th September, 2000.
- [8] Ziegler, G.: Numerical Distance Protection – Principles and Application. ISBN 978-3-89578-318-0, Publicis, Erlangen, 2008.
- [9] Ziegler, G.: Numerical Differential Protection – Principles and Application. ISBN 3-89578-234-3, Publicis, Erlangen, 2005.
- [10] Krebs, R.; Henn, V.; Holbach, J.; Morais, P.; Arruda, G.: Series Capacitors and Distance Protection – Subsynchronous Frequencies and Real-Time Test of Distance Protection Relays. CIGRE B05 National Conference, 9th-16th September 2005, Calgary.