



PS2 – Poster-02



Предлагаемые усовершенствования дифференциальной защиты линий и разработка систем защиты

Н. ФИШЕР, Б. КАСЗТЕННИ, Р. МОКСЛИ, Г. РЖЕПКА
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

США

roy_moxley@selinc.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Дифференциальная защита, переходное сопротивление, линия с ответвлениями, зарядный ток линии.

1 ВВЕДЕНИЕ

Принцип дифференциальной защиты несравним по селективности, чувствительности, а скорость срабатывания сопоставима с принципами, основанными на сравнении направленности, сравнения фаз и дистанционной защиты.

Принцип дифференциальной защиты осуществляет контроль суммы всех токов. В идеале сумма равна нулю для всех режимов за исключением внутренних повреждений. На практике, погрешности измерения и ответвления, входящие внутрь зоны, могут создавать паразитный дифференциальный сигнал.

Важные преимущества дифференциальной по сравнению с дистанционной защитой или защитой, основанной на сравнении направленности, заключены в ее хорошей эффективности на линиях любой длины, линиях с ответвлениями и линиях с установкой продольной емкостной компенсации (УПК). Микропроцессорные технологии открывают новые возможности: лучшая отстройка от насыщения трансформаторов тока (ТТ), компенсация зарядного тока линии, адаптация к отпаечным трансформаторам.

Эта статья описывает оптимизированную схему дифференциальной защиты, работающей с ограниченной пропускной способностью каналов и обеспечивающей при этом высокое быстродействие, чувствительность и отстройку от насыщения ТТ.

2 ТИПИЧНАЯ ТОКОВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

Наиболее характерная особенность дифференциальной токовой защиты линии состоит в том, что она состоит из множества устройств, работающих независимо и связанных цифровым каналом связи (Рис. 1).

Каждый токовый отсчет преобразуется при помощи аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) в цифровое представление (i_D) аналоговых величин (i_A).

Дискретизация может осуществляться с постоянной или с переменной частотами, в зависимости от частоты сети. Отсчеты могут быть асинхронизированными с локальным временем устройства или синхронизированными с абсолютным временем, упрощающими при этом выполнение синхронных измерений.

Используемые каналы связи для токовой дифференциальной защиты ограничены по пропускной способности (типовая скорость 64 kbps), вот почему между устройствами передается только ограниченное количество информации. Некоторые устройства защиты обмениваются выборками тока, некоторые – работают на базе векторных величин, а другие

работают на базе нестандартных величин, таких, как положительный или отрицательный заряд тока между последовательными переходами тока через ноль.

Это многообразие подходов обусловлено проблемами передачи необходимого количества данных для получения требуемых технических характеристик, ограничениями пропускной способностью каналов связи, обеспечивающих при этом надежную синхронизацию данных в течение всего времени работы.

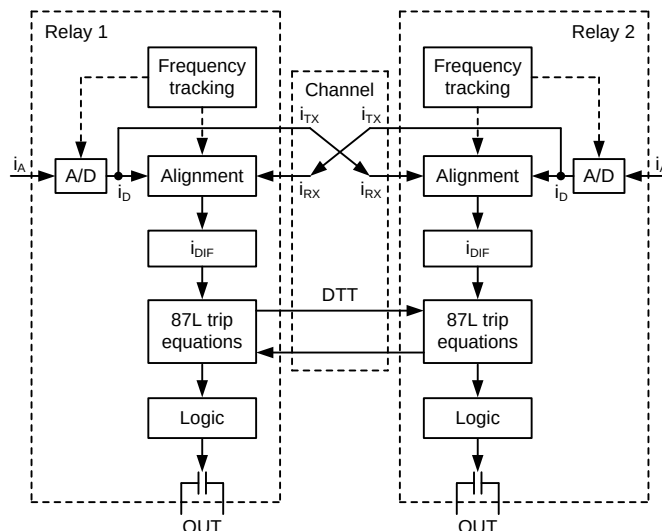


Рис.1: Упрощенная архитектура типовой дифференциальной защиты линии

До сих пор глобальная система позиционирования (GPS) являлась единственным практическим решением, обеспечивающим общее время на большой территории. Решение, при котором присутствует зависимость от спутниковой системы и дополнительных устройств, является неидеальным. На планете появляются системы обеспечивающие общее эталонное время. В режиме нормальной работы эти системы синхронизированы с GPS по средством большого количества ресиверов, распределенных по территории. Система должна продолжить обеспечивать общее время, когда потеря GPS сигнала. Эти системы являются частью системы связи и используются для устройств релейной защиты; по этой причине, они являются надежным средством, обеспечения внешним источником точного времени без подключения большого количества устройств, без ненужной взаимозависимости, и без снижения надежности и готовности к работе.

3 РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ИСХОДЯ ИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ

Для понимания количества информации, которое может быть передано по каналу с пропускной способностью 64 kbps для целей релейной защиты, примем частоту дискретизации 16 отсчетов за период и в результате получим следующую оценку: 64 000 бит за секунду = 1067 бит за период промышленной частоты 60Гц = 267 бит за четверть периода промышленной частоты 60Гц.

Как и в любой цифровой коммуникационной сети, пакеты данных в заголовке содержат служебные данные, дополняющие полезную информацию:

- Для идентификации пакета необходим заголовок. В итоге может потребоваться 15 бит.
- Целостность данных должна быть защищена дополнительной проверкой. На это может потребоваться 32 бита.
- При использовании канального метода синхронизации в пакет данных необходимо добавлять точное время. На это может потребоваться 16 бит.
- Пакет должен поддерживать основную адресацию. На это может потребоваться от 4 до 8 бит.
- Должна поддерживаться передача сигнала прямого отключения и других сигналов. На эти цели может потребоваться от 4 до 8 бит.

Таким образом, служебные сигналы могут занимать от 50 до 80 бит.

Очевидно, что для передачи полезной части пакета информации, который используется защитой, и служебной информации необходимо использовать высокопроизводительную сеть. Очень важно выбрать те величины, которые необходимо передавать, определить то, как часто их передавать, как они должны быть закодированы, объединены в пакеты и защищены проверкой на четность. Рассмотрим пакет (контент приведен в таблице 1). Формулы, описывающие вычисление тех или иных величин представлены далее в статье. Это решение работает с частотой дискретизации токов 1 кГц и использует опробованные уравнения защиты на основе Альфа Плоскости [2].

Полезная часть пакета (таблица 1) может быть закодирована с использованием чуть более 100 бит, что позволяет нам передавать пакеты каждые 3 миллисекунды (за 3 миллисекунды на скорости 64 kbps можно передать 192 бита).

Передаваемые терминалом мгновенные значения состоят из полных фазных токов линии (сумма всех токов присоединений для схемы с двумя выключателями) и тормозных фазных токов (сумма амплитуд всех токов присоединений для схемы с двумя выключателями на присоединение).

Величина	Описание
$i_{A(k)}$	Текущий (k-й) отсчет тока линии фазы А
$i_{A(k-1)}$	k-1 отсчет тока линии фазы А
$i_{A(k-2)}$	k-2 отсчет тока линии фазы А
$i_{B(k)}$	Текущий (k-й) отсчет тока линии фазы В
$i_{B(k-1)}$	k-1 отсчет тока линии фазы В
$i_{B(k-2)}$	k-2 отсчет тока линии фазы В
$i_{C(k)}$	Текущий (k-й) отсчет тока линии фазы С
$i_{C(k-1)}$	k-1 отсчет тока линии фазы С
$i_{C(k-2)}$	k-2 отсчет тока линии фазы С
I_{AR}	Тормозной ток фазы А
I_{BR}	Тормозной ток фазы В
I_{CR}	Тормозной ток фазы С
I_{QR}	Тормозной ток обратной последовательности
I_{GR}	Тормозной ток нулевой последовательности

Табл. 1: Полезная часть пакета

Выбранная полезная часть пакета обеспечивает следующие преимущества:

- Новые данные передаются каждые 3 миллисекунды, более чем 5 раз за период промышленной частоты 60Гц, что уменьшает время срабатывания и увеличивает быстродействие устройства.
- В результате потери пакета теряется только 3 миллисекунды данных, что позволяет быстро восстановить работу защиты и уменьшить время задержки на срабатывание.
- Работа с частотой дискретизации в 1 кГц позволяет обеспечивать высокую точность в вычислении дифференциального тока, в расчете гармоник при выполнении защиты линия - трансформатор и быстрое обнаружение насыщения ТТ.
- Посыл трех мгновенных отсчетов токов в пакете данных позволяет улучшить соотношение полезная часть – служебная информация.
- Передача в каждом пакете только одного тормозного тока (или одного на три мгновенных отсчета) уменьшает требования к пропускной способности канала связи, что достаточно обосновано для целей релейной защиты.
- Амплитуда тормозного тока может быть закодирована с использованием всего нескольких бит.

- Формат пакета позволяет делать решение расширяемым, т.к. он работает с большим числом токов, которые измеряет терминал защиты. Пакет всегда содержит составляющие дифференциального и тормозного токов.

4 НАДЕЖНОСТЬ ЗАЩИТЫ ДЛЯ СХЕМЫ С ДВУМЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ НА ПРИСОЕДИНЕНИЕ

Использование токов выключателей для схемы два выключателя на присоединение может создать некоторые трудности. Рассмотрим трехконцевую линию (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**), каждый конец которой подсоединен через 2 выключателя.

В предложенном решении, каждый терминал защиты формирует свой частичный дифференциальный $i_{A(T1)} = i_{1A} + i_{2A}$ и тормозной токи $I_{AR(T1)} = I_{1A} + I_{2A}$ (аналогично для фаз В и С), а также $I_{QR(T1)} = I_{1Q} + I_{2Q}$ и $I_{GR(T1)} = I_{1G} + I_{2G}$, где маленькими символами обозначены мгновенные значения, а большими – модули. Аналогичные величины формируются и для концов Т2 и Т3.

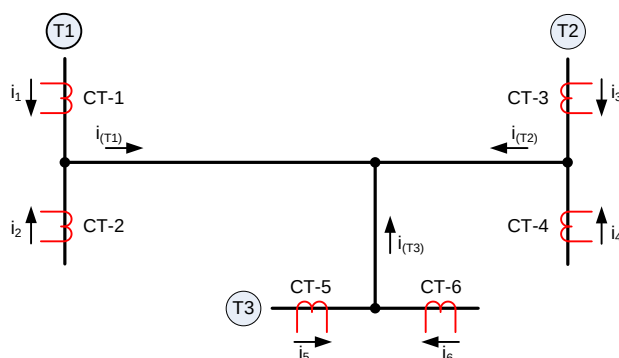


Рис. 2: Простая трехконцевая линия с двумя выключателями на присоединение

Величины, приведенные выше образуют полезную часть пакета согласно таблице 1. Каждый терминал защиты рассчитывает свои частичные величины и передает их на противоположные концы.

Для внешнего повреждения рядом с терминалом защиты Т1, сопровождающегося насыщением ТТ, частичный дифференциальный ток, передаваемый терминалом, может содержать погрешность. Однако в тоже время, этот терминал передает тормозной ток, который говорит о том, что случилось внешнее повреждение, обеспечивая уравнения альфа-плоскости информацией уравнивающей погрешность дифференциального тока.

Исходя из полученных частичных величин, каждый терминал рассчитывает полный дифференциальный и тормозной токи для каждой фазы согласно функции 87LP (приведен расчет токов для фазы А; расчеты для фаз В и С аналогичны):

$$i_{ADIF} = i_{A(T1)} + i_{A(T2)} + i_{A(T3)} = i_{1A} + i_{2A} + i_{3A} + i_{4A} + i_{5A} + i_{6A},$$

$$I_{ARST} = I_{AR(T1)} + I_{AR(T2)} + I_{AR(T3)} = I_{1A} + I_{2A} + I_{3A} + I_{4A} + I_{5A} + I_{6A},$$

а также согласно функциям 87LQ (обратная последовательность) and 87LG (нулевая последовательность):

$$I_{QRST} = I_{QR(T1)} + I_{QR(T2)} + I_{QR(T3)} = I_{1Q} + I_{2Q} + I_{3Q} + I_{4Q} + I_{5Q} + I_{6Q},$$

$$I_{GRST} = I_{GR(T1)} + I_{GR(T2)} + I_{GR(T3)} = I_{1G} + I_{2G} + I_{3G} + I_{4G} + I_{5G} + I_{6G}.$$

Поэтому, каждый терминал токовой дифференциальной защиты получает точные значения тормозного тока, вне зависимости от места повреждения или уровня тока короткого замыкания, протекающего через него.

В добавлении к истинному уровню тормозного тока, устройства защиты объединены логикой выявления внешнего повреждения (EFD), повышающей надежность отстройки от внешних повреждений и уменьшающей требования к трансформаторам тока.

На рис. 3 приведена логика. Этот метод с успехом используется в дифференциальных

защитах шин и трансформатора [3], [4]. Увеличение мгновенного тормозного тока (выше уровня P) без такого же увеличения дифференциального тока с учетом множителя q сигнализирует о наличии внешнего повреждения

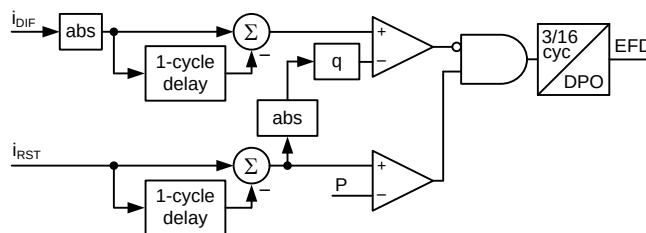


Рис. 3: Логика выявления внешнего повреждения

Каждый терминал защиты выделяет свой мгновенный тормозной ток рассчитываемый на основе собственных измеренных токов и частичных дифференциальных токов, полученных от терминалов защиты с противоположных концов (согласно **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, индексы токов фаз А, В и С опущены): $i_{RST(T1)} = |i_1| + |i_2| + |i_{(T2)}| + |i_{(T3)}|$, $i_{RST(T2)} = |i_3| + |i_4| + |i_{(T1)}| + |i_{(T3)}|$, $i_{RST(T3)} = |i_5| + |i_6| + |i_{(T1)}| + |i_{(T2)}|$, где $|x|$ - модуль мгновенного сигнала x .

Каждый терминал защиты включает в себя логику выявления внешнего повреждения, которая использует мгновенные тормозные и дифференциальные токи. Терминал защиты, установленный близко к внешнему повреждению зафиксирует его исходя из сквозного тока короткого замыкания. Терминал защиты на противоположном конце может зафиксировать, а может и не зафиксировать повреждения, в зависимости от уровня, протекаемого тока. Вот почему факт работы EFD полученный на одной конце добавлен в пакет, передаваемый защитой. Таким образом, все терминалы защиты работают с одной и той же информацией и работают правильно.

5 ОБОБЩЕННАЯ АЛЬФА ПЛОСКОСТЬ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА МНОГОКОНЦЕВЫХ ЛИНИЯХ

Принцип работы токового дифференциального принципа на Альфа плоскости основан на сравнении модулей и углов токов, входящих в зону защиты. Принцип легко понять для случая двухконцевой линии. В нормальном режиме, оба тока зоны (I_L and I_R) равны по модулю и противоположны по знаку. Это приводит к тому, что точка, соответствующая режиму на Альфа плоскости равна $k = 1 \angle 180^\circ$. При внутреннем повреждении соотношение комплексных токов выходит за область блокировки и устройство срабатывает. Области блокировки и срабатывания имеют форму, приведенную на рис. 4, которая задается двумя параметрами: радиусом и углом.

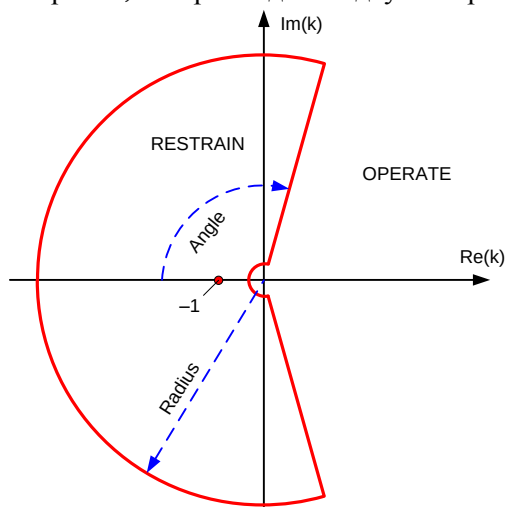


Рис. 4: Типичная характеристика альфа плоскости

Функции 87LP, 87LQ, и/или 87LG (Альфа плоскость) применяются. Этот принцип успешно внедряется, и его эффективность подтверждена опытом эксплуатации [5]. Наибольшие преимущества дают устойчивость к насыщению ТТ и ошибкам к синхронизации, отличная чувствительность и скорость функций 87LQ и 87LG, а также высокая устойчивость к емкостному току линии и хорошая работа на линиях с УПК.

Применение Альфа плоскости для N-концевой линии основано на расчете токов для эквивалентной двухконцевой линии и дальнейшем их использовании в зарекомендовавшем себя принципе защиты Альфа-плоскости для двухконцевой линии.

6 LINE-CHARGING CURRENT COMPENSATION

Зарядный ток линии оказывает влияние на стабильность и надежность дифференциальной защиты. Его компенсация исключает емкостный ток из дифференциального.

Емкостная проводимость линии (Рис. 5) может быть представлена сосредоточенными емкостями, установленными по концам линии, рядом с терминалом защиты, измеряющим напряжения.

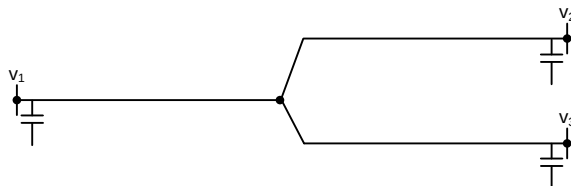


Рис. 5: Сосредоточенные параметры для трехконцевой линии

$$i_{C_TOTAL} = C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_{AVERAGE}$$

Среднее напряжение линии может быть приблизительно определено как среднее напряжение, измеряемое терминалами защиты, и таким образом

$$i_{C_TOTAL} = C_{TOTAL} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{d}{dt} (v_1 + v_2 + v_3)$$

Другими словами, полный зарядный ток линии состоит трех компонент, каждая из которых пропорциональна производным измеряемых напряжений: $i_{C1} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_1$,

$$i_{C2} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_2, \quad i_{C3} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_3.$$

Каждый из терминалов защиты рассчитывает часть зарядного тока линии на основе измеренного напряжения и полной емкости линии пропорциональной количеству ее концов, что обеспечивает компенсацию в любое время. При расчете итогового дифференциального тока, части зарядных токов полностью компенсируют реальный емкостной ток.

Этот принцип является ключевым – токовая дифференциальная защита линии рассчитывает зарядный ток на основе среднего напряжения на концах линии электропередачи, без передачи информации о напряжениях. Взамен каждый терминал защиты вычитает свою часть зарядного тока из измеренного тока и далее передает его.

Этот принцип компенсации зарядного тока линии более устойчив к проблемам, связанным с цепями напряжения. Можно сказать, что каждый терминал дифференциальной защиты работает как удаленный источник напряжения для других. Если все напряжения будут потеряны, то терминалы защиты автоматически загрузят уставку и продолжат работу только с токами.

7 IN-LINE TRANSFORMERS

В некоторых случаях линия и трансформатор подключаются без отдельного выключателя между ними (смотри Рис. 6).

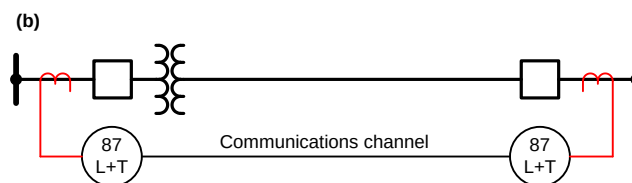


Рис. 6: Защита объекта линия-трансформатор

Будучи дифференциальным принципом, метод Альфа плоскости может обеспечить защиту силового трансформатора от коротких замыканий. В общем случае для N- обмоточного трансформатора, дифференциальный и тормозной токи должны суммироваться с учетом его коэффициента трансформации и компенсации группы соединения обмоток. Это ведет к простой реализации компенсации различных групп соединения обмоток в дифференциальной защите (Рис. 7).

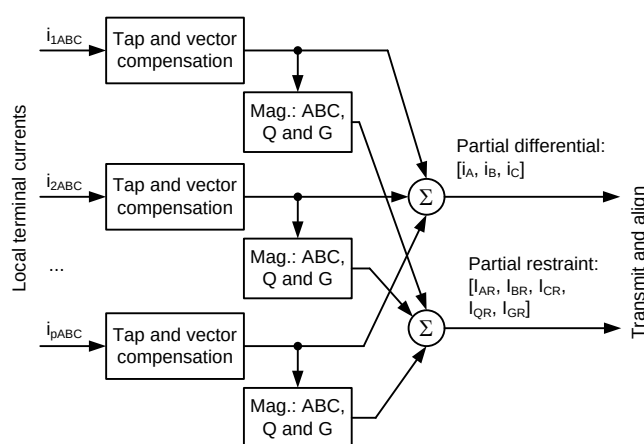


Рис. 7: Компенсация группы соединения обмоток силового трансформатора для объекта линия-трансформатор

Блокировки при броске намагничивающего тока и при перевозбуждении традиционно выполнены на основе контроля уровня измеренных второй и пятой гармоник в дифференциальном токе. В зависимости от технического решения может быть также использована Cross-phase блокировка на основе контроля четвертой гармоники [4] [6].

8 БЫСТРОДЕЙСТВИЕ

Внутреннее время на обработку информации, время работы алгоритма, задержка в канале связи ограничивает время срабатывания токовой дифференциальной защиты. Прямой оптоволоконный канал связи добавляет незначительную задержку. Мультиплексированные каналы могут добавить задержку от нескольких миллисекунд до десятков миллисекунд, в зависимости от количества устройств, которые передают информации между терминалами.

Внутреннее время на обработку информации состоит из времени работы аналогово-цифрового преобразователя, подготовку информации к передаче, компоновку исходящего пакета, прием входящего пакета, обработку принятой информации, расчет полного дифференциального тока и действие на выходы.

Время работы алгоритма зависит от размера окна наблюдения. Не правильно понимать под ним окно наблюдения фильтров – это то время, когда необходимой информации достаточно для принятия решения о срабатывании.

В этой связи, функции 87LQ и 87LG очень быстрые. Даже с использованием однопериодных фильтров, время срабатывания этих функции занимает всего лишь часть периода (Рис. 8).

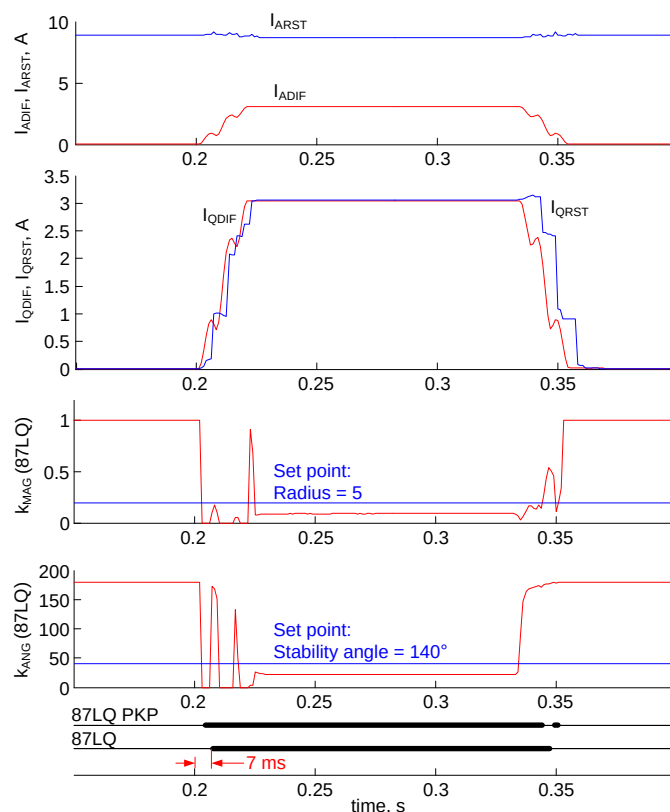


Рис. 8: Работа функции 87LQ при однофазном замыкании фаза А – земля через переходное сопротивление 100 Ω

Это короткое время срабатывания определяется тем, что функции не используют ток нагрузочного режима. Благодаря способу торможения, логике фиксации внешних повреждений и компенсации зарядного тока линии, эти функции могут работать исходя из собственного времени срабатывания без использования выдержек времени на срабатывания для повышения надежности.

В добавок, функция 87LP использует быстродействующий алгоритм в параллель с алгоритмом, использующим сигналы с однопериодного фильтра. Быстродействующая дифференциальная защита практически осуществима по предлагаемой схеме т.к. доступны отсчеты сигналов. В дифференциальной защите, большинство переходных процессов не мешают формированию сигнала срабатывания, вот почему безопасно принимать решение о срабатывании за время меньше периода. Насыщение ТТ может создать проблемы, но они решаются быстрой и надежной логикой выявления внешних замыканий. Если она срабатывает, то быстродействующая часть запрещается.

В результате тщательно продуманной архитектуры устройства защиты имеют минимальные задержки при передаче данных. Используемые алгоритмы защиты очень быстро выявляют внутренние повреждения т.к. применяемый способ торможения не снижает скорость. Вообще, при наличии скоростных каналов связи представленное решение обеспечивает время срабатывания менее периода.

9 ВЫВОДЫ

Эта статья очерчивает требования для следующего поколения токовой дифференциальной защиты:

- Метод синхронизации с использованием каналов связи и метод с использованием сигналов точного времени позволяют реализовать надежную дифференциальную защиту для основных применений.
- Наземный GPS независимый источник точного времени позволяет безопаснее и более надежно реализовывать токовую дифференциальную защиту с использованием

асимметричных каналов связи.

- Стратегия нейтрализации позволяют всей системе в целом выносить временную потерю источника точного времени
- Торможение с использованием Альфа-плоскости используется для оптимальной надежности. Размер и структура полезной передаваемой информации не зависит от количества концов линии и количества токов на каждом конце.
- Система работает с токовой информацией высокого качества, позволяющей применять быстродействующую логику выявления внешних повреждений и выделять гармонические составляющие для защиты объектов линия-трансформатор.
- Комбинация функции выявления внешних повреждений и правильного формирования тормозного тока делает устройство защиты очень надежным и быстродействующим.
- Встроенная компенсация зарядного тока линии, повышает надежность несрабатывания при постановке линии под напряжение и улучшает чувствительность к внутренним повреждениям.
- Способы, применяемые при формировании пакетов связи и для внутренней обработки данных, позволяют обеспечивать минимальное время срабатывания. Комбинация высокоскоростных каналов связи и большой скоростью расчета, применяемых в защите, позволяет обеспечивать быстродействие менее периода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] K. Fodero, C. Huntley, and D. Whitehead, "Secure, Wide-Area Time Synchronization," proceedings of the 12th Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA, April 2010.
- [2] J. Roberts, D. Tziouvaras, G. Benmouyal, and H. Altuve, "The Effect of Multiprinciple Line Protection on Dependability and Security," proceedings of the 55th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, May 2001.
- [3] A. Guzmán, C. Labuschagne, and B.-L. Qin, "Reliable Busbar and Breaker Failure Protection With Advanced Zone Selection," proceedings of the 31st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2004.
- [4] A. Guzmán, N. Fischer, and C. Labuschagne, "Improvements in Transformer Protection and Control," proceedings of the 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2009.
- [5] G. Benmouyal, "The Trajectories of Line Current Differential Faults in the Alpha Plane," proceedings of the 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2005.
- [6] K. Behrendt, N. Fischer, and C. Labuschagne, "Considerations for Using Harmonic Blocking and Harmonic Restraint Techniques on Transformer Differential Relays," proceedings of the 33rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2006.