



PS1 – S1-02



Защита шин с реализацией функций МЭК 61850

А. АПОСТОЛОВ
OMICRON electronics
США

Alexander.Apostolov@omicronusa.com

1 ВВЕДЕНИЕ

Работа систем защиты шин при различных повреждениях системы играет важную роль в обеспечении стабильности и безопасности работы энергосистемы из-за отключений линий и трансформаторов, присоединенных к шине. Быстрое отключение поврежденной цепи очень важно, но в то же время нужно избежать действия защиты шин при внешних повреждениях, чтобы уменьшить вероятность нарушения работы системы.

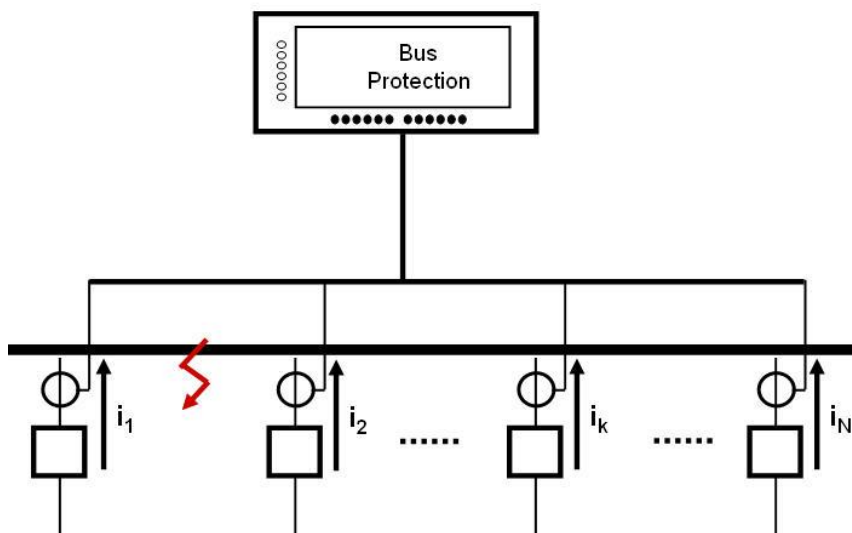


Рис. 1: Традиционная ДЗШ

Много лет системы защиты шин использовали принцип, основанный на физическом суммировании всех токов шин в дифференциальных реле.

Дифференциальный ток определяется:

$$I_{diff}(t) = i_1 + i_2 + \dots + i_N \quad (1)$$

Высокоимпедансные и низкоимпедансные реле с высоким быстродействием защищают шины подстанций различных уровней напряжения. Этот принцип довольно простой, но он требует того, что все трансформаторы тока (ТТ) будут более или менее одинаковые и их насыщение будет происходить при больших токах.

Дифференциальные низкоимпедансные реле защиты шин с множеством входов тормозного тока значительно уменьшают воздействие насыщения ТТ и позволяют использовать ТТ с различными коэффициентами трансформации. Их работа, как правило, основана на характеристике с одним или несколькими коэффициентами торможения, в плоскости тока срабатывания I_{diff} и тормозного тока I_{bias} , где:

$$I_{diff}(t) = |i_{diff}(t)| = |\sum i| \quad (2)$$

$$I_{bias}(t) = |i_1| + |i_2| + \dots + |i_N| = \sum |i_k| \quad (3)$$

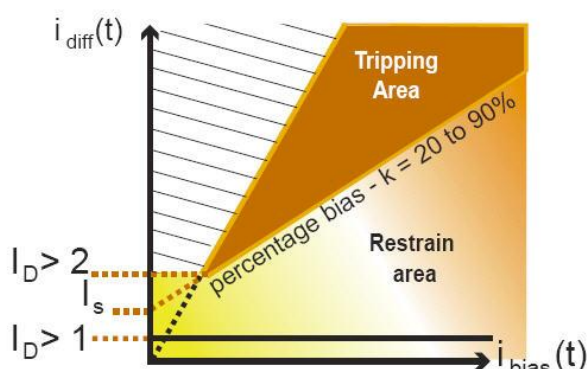


Рис. 2: Тормозная характеристика

Однако высокая стоимость ограничила применение дифференциальных реле защиты шин относительно небольшим количеством критических подстанций.

Улучшения в технике связи привели к существенным изменениям в разработке и выполнении защиты шин для подстанций. Обычные централизованные системы защиты шин заменяются распределенными системами.

Обсудим 2 главных типа защиты шин:

- Основанная на удаленных (периферийных) устройствах, которые обеспечивают интерфейс процесса, и центральным устройством, выполняющим функцию дифференциальной защиты шин.
- Основанная на удаленных (периферийных) устройствах, которые обеспечивают интерфейс процесса и определяют направление повреждения, и центральным устройством, которое выполняет функцию направленной защиты шин.

Удаленными устройствами в обоих случаях могут быть многофункциональные IED. Для систем передачи данных по протоколу МЭК 61850 введен новый тип устройств – объединяющее устройство.

МЭК 61850 оказывает значительное влияние на системы защиты шин. В докладе анализируются и обсуждаются методы и средства для их тестирования. Представлены сравнения между обычными системами передачи данных и системами с протоколом МЭК 61850.

2 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН, ВЫПОЛНЕННАЯ ПО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ

В прошлом ДЗШ была централизованной, основанной на сумме токов всех ТТ, находящихся в зоне защиты. Внедрение усовершенствованных высокоскоростных каналов связи привело к развитию и внедрению нового поколения дифференциальных реле с распределенной архитектурой системы защиты.

Технология обработки числовой информации и ее применение к защите шин предлагает некоторые существенные преимущества. Классические схемы ДЗШ имеют более или менее фиксированные зоны действия защиты, потому что они имеют входной ток, определяемый суммой всех токов, втекающих в реле. Современные распределенные схемы могут легко изменить зону действия защиты, т.к. основаны на знаниях топологии схемы подстанции и состоянии выключателей и разъединителей.

В то время как в классических схемах необходимы ТТ с одинаковым коэффициентом трансформации, в современных схемах могут использоваться ТТ с разными коэффициентами по всей защищаемой зоне. Это должно учитываться в схеме.

В стандартном исполнении конфигурация комплекса дифференциальной защиты шин состоит из (Рис. 3):

- Периферийных модулей (ПМ)
- Центрального модуля (ЦМ)

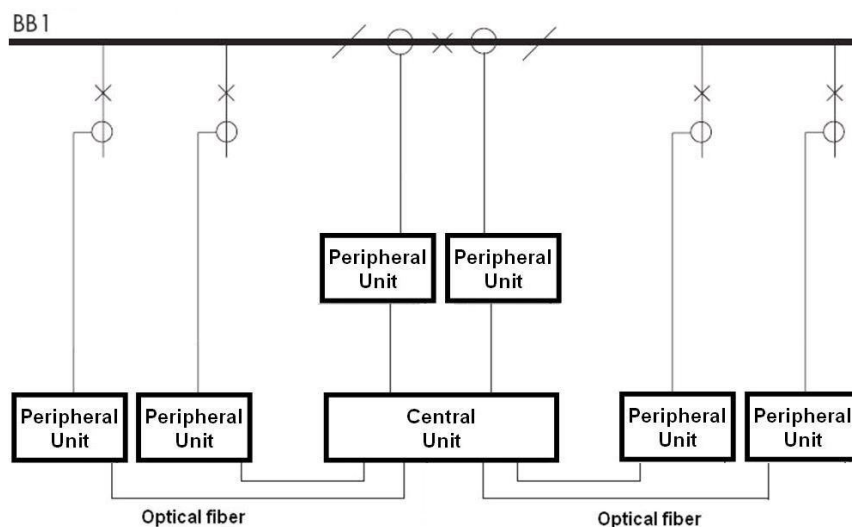


Рис. 3: ДЗШ с распределенной структурой

Комплекс дифференциальной защиты шин выполняют больше функций, чем обычная дифференциальная защита шин. Эти функции также распределены между периферийными модулями и центральным модулем. Типы таких функций могут быть разными в зависимости от производителя. Пример таких функций и их распределение:

Центральный модуль:

- Определение топологии схемы ПС
- Суммирование токов
- Дифференциальная защита шин
- УРОВ

Периферийные модули:

- Контроль токовых цепей
- Отслеживание положения выключателя
- Отслеживание положения разъединителей
- Управление выключателем
- Определение отказа выключателя
- Определение насыщения ТТ
- МТЗ, полностью независимая от центрального модуля

Соединение периферийных модулей с центральным осуществляется посредством оптоволоконных линий связи, которые обладают высокой скоростью передачи данных, и не подвержены влиянию электромагнитных помех. Одно из самых важных требований для таких распределенных систем – синхронизация данных, полученных от периферийных модулей. Убедившись в том, что выборки синхронизированы во всех периферийных модулях, центральный модуль одновременно посылает пакет данных по оптоволокну. Они получают эти данные одновременно и преобразуют их в текущий сигнал.

Основные алгоритмы обработки сигнала могут включать:

- Расчет потока и алгоритм для определения насыщения ТТ
- Контроль нулевой последовательности
- Определение изменения сигнала
- Порог блокировки защиты при внешних КЗ

Вся эта информация поступает на центральный модуль вместе с выборкой тока (амплитуда и угол), таким образом, центральный модуль суммирует все токи, вычисляет дифференциальный ток и определяет, было ли КЗ в защищаемой зоне.

Возможно функционирование с высоким уровнем насыщением ТТ, что может привести к нежелательному срабатыванию защиты при внешних КЗ. Алгоритмы для определения насыщения ТТ выполняются периферийными модулями. Различные алгоритмы осуществляются либо отдельно, либо в комбинации. Например, периферийный модуль вычисляет значение тока и сравнивает его с сигналом синусоидальной формы, основанным на разности между двумя последовательными выборками, заданными как функция частоты выборки модуля.

Знание общей топологии подстанции важно для определения зон защиты и выполнения отключений от УРОВ. Это важная функция ЦМ, которая управляет алгоритмом топологии ПС, который определяет электрическую схему ПС. Они основаны на данных, полученных от вспомогательных контактов выключателей и разъединителей, проверенных отдельными периферийными модулями.

Важное преимущество таких распределенных схем то, что периферийные модули могут устанавливаться в шкафах выключателей на ПС, тем самым значительно сокращая нагрузку ТТ и уменьшая вероятность их насыщения.

3 ШИНА ПРОЦЕССА СОГЛАСНО СТАНДАРТУ МЭК 61850

Вышеописанная система ДЗШ основана на специальных средствах измерений комплексного тока между периферийными модулями и центральным модулем, выполняющим функцию ДЗШ. МЭК 61850 позволяет выполнять распределенные системы ДЗШ, используя значения выборок аналоговых величин. Архитектура такой системы показана на рисунке 4.

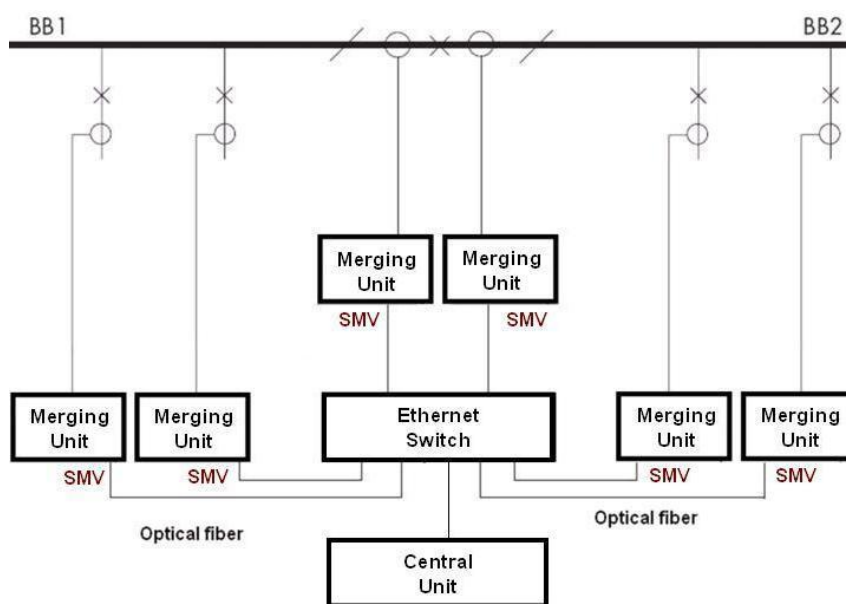


Рис. 4: Шина процесса согласно стандарту МЭК 61850 для ДЗШ

Периферийные модули, описанные в предыдущей системе ДЗШ, в МЭК 61850 заменяются Объединяющим Устройством. Задача Объединяющего устройства преобразовать аналоговый сигнал от нестандартных или стандартных датчиков в значения выборок, которые передаются по оптоволокну в ЦБ, в котором выполняется расчет дифференциального тока и определяется, было ли КЗ в зоне защиты.

Функциональная совместимость между объединяющими устройствами и защитой, контролем, мониторингом или регистрирующими устройствами гарантирована в руководящих документах. Существует 2 режима обмена значениями выборок между объединяющим устройством и устройством данных. Для применяемых защит объединяющее устройство передает 80 выборок за период с помощью 80 сообщений за период, то есть, каждый пакет

Ethernet имеет данные, представленные в структуре MAC Client Data, содержащей единственный набор выборок U и I . Для регистраторов формы волны такая частота дискретизации возможно недостаточна. Именно поэтому 256 выборок за период могут быть отправлены 32-мя Ethernet посылками за цикл, каждая из которых будет содержать 8 наборов выборок[2].

Модель выборок аналоговых сигналов применяется для обмена данными в формате DATA-SET. Отличие в этом случае то, что данные набора данных имеют общий тип данных SAV (выборки аналоговых сигналов, описано в IEC 61850-7-3). Структура буфера определена для передачи выборочных значений из логических узлов группы измерительных трансформаторов TCTR и TVTR (Рисунок 5).

Обмен информацией для выборочных значений основан на механизме сервер/клиент. Сервер записывает данные в буфер посылающей стороны (см. Рисунок 5), в то время как клиент считывает данные из буфера принимающей стороны. Информация о времени, когда была сделана запись, добавляется к данным, таким образом, клиент может проверить своевременность данных и применять их затем для контроля выборок в дальнейшей работе. Система связи должна быть способной обновлять буферы клиентов. Контроль выборки значений (SVC) клиента используется для контроля системы связи.

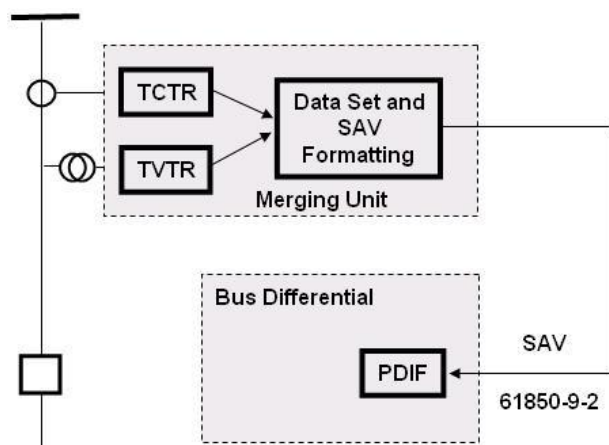


Рис. 5: ДЗШ, основанная на значениях выборок аналоговых величин

Значения токов и напряжений от группы измерительных трансформаторов TCTR и TVTR передаются как значения выборок по локальной вычислительной сети (ЛВС) ПС, используя любой из режимов передачи данных, описанные ранее. В этом случае, сеть становится шиной данных, обеспечивая интерфейс между логическими узлами группы измерительных трансформаторов и различными логическими узлами, моделирующими функциональные элементы ИЕД.

Состояние выключателя на ПС моделируется с помощью логического узла XCVR. Он обеспечивает информацией о состоянии трехфазного или однофазного выключателя, так же об использовании нормально открытого или нормально закрытого контакта для определения топологии ПС и зон ДЗШ. На рисунке 5 изображена упрощенная блок-схема логических узлов, моделирующих различные устройства функции ДЗШ. Можно заметить, что логические узлы TCTR, TVTR выполнены в объединяющем устройстве. Вместо объединяющего устройства можно использовать устройства сопряжения в связи с тем, что такие устройства имеют дискретные входы в дополнение к аналоговым входам обычно доступным в объединяющем устройстве.

PDIF – это логический узел, представляющий дифференциальный элемент шины в ЦБ. При вычислении дифференциального тока учитываются выборки, полученные из отдельных объединяющих устройств, используемых в системе.

Передача значений выборок имеет ограничения по времени. Модель предоставляет обмен значениями выборок по организованному и контролируемому по времени пути, таким образом объединенная несогласованность выборок и момента передачи данных минимизируется до

уровня, предоставляющего точное расположение выборок, моментов времени и последовательности.

В случае распределенной ДЗШ, описанной в предыдущих разделах, сбор данных в периферийных модулях синхронизирован с центральным модулем. Для шины процесса это не так. В этом случае, синхронность времени отдельных объединяющих устройств должно быть точнее, чем 1 мкс. Так как протокол SNTP не обеспечивает такую точность, объединяющие устройства на этом этапе выполнения МЭК 61850 синхронизируются любым подходящим методом, выбранным производителем.

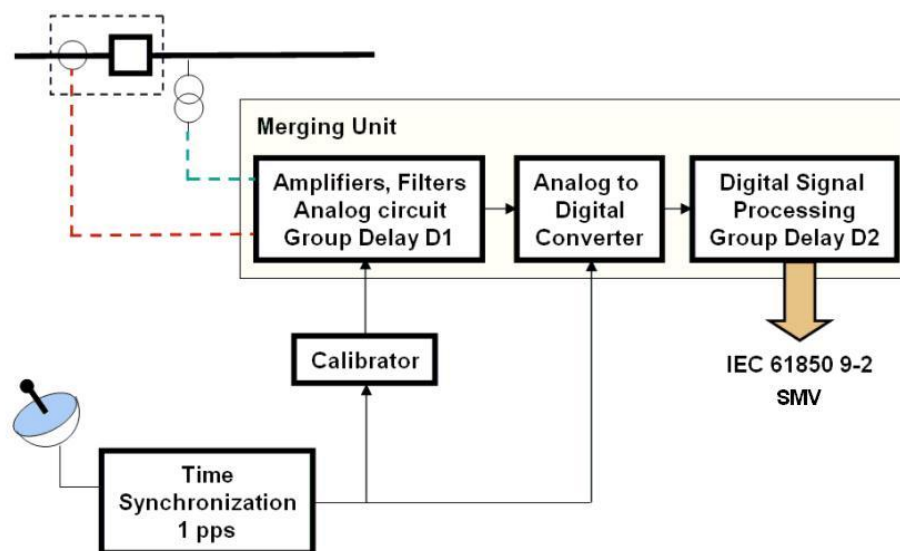


Рис. 6: Объединяющее устройство в системе передачи данных по стандарту МЭК 61850

Другое преимущество применения МЭК 61850 то, что он обеспечивает стандартный формат для описания топологии ПС. В основе лежит файл описания конфигурации ПС (SCD).

Распределенная архитектура дифференциальной защиты шин включает 4 типа устройств:

- ЦБ, выполняющий функции ДЗШ и других зависимых функций
- Объединяющее устройство, выполняющее функции обработки аналоговых сигналов
- Коммутатор для сети Ethernet
- Устройство синхронизации

Устройство синхронизации (или синхронизатор) применяется, чтобы удостовериться, что системы регистратора формы волны отвечает требованиям по временной синхронизации в соответствии с методическими рекомендациями. Оно посылает единичный импульс всем устройствам системы сети RS485. В этом случае достигается синхронизация по времени с точностью менее 1 сек.

Требования по стандартизации синхронизации по времени и элиминация сети, предназначенной для этой функции на ПС, привели к созданию новой рабочей группы в Комитете по Релейной защите IEEE с целью развития профиля стандарта IEEE 1588 для точной синхронизации по времени по Ethernet.

Каждое объединяющее устройство связано с коммутатором Ethernet, который в этом случае предназначен для шины процесса.

ЦБ получает от коммутатора все Ethernet сообщения от объединяющих устройств системы. Принимая во внимание размер Ethernet пакета и количество линий и трансформаторов, соединенных с шиной, возможно число портов Ethernet необходимо увеличить.

Другое решение для большого числа объединяющих устройств на большой ПС это использование ЦБ с портом Ethernet 1Gb/sec, соединенным с коммутатором Ethernet 1 Gb/sec, порты которого, пропускной способностью 100 Mb/sec, соединены с объединяющими устройствами.

Решения стандарта МЭК61850 более надежны, чем запатентованные системы, потому что ЦБ может обратиться ко второму объединяющему устройству в случае отказа устройства, которое обычно предоставляло текущие выборки от измерительного трансформатора.

4 СХЕМА НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ШИН ПО СТАНДАРТУ МЭК 61850

Шины передающих ПС, как правило, защищаются реле ДЗШ. Как обсуждалось ранее в докладе, необходимо чтобы, текущие сигналы от каждого первичного оборудования, соединенного с шинами, были доступны в центральной ячейке ДЗШ в централизованной или распределенной системе. Как правило, используемые схемы низкоимпедансных защит являются более сложными и дорогими, если ТТ имеют различные коэффициенты трансформации. Еще хуже обстоит дело, если ДЗШ применяется на ПС, конфигурация шин которых может меняться.

Из-за высокой стоимости и постоянно растущих требований к обслуживанию ПС, во многих случаях, ДЗШ не применяется на шинах распределительных подстанций. В этом случае, устранение КЗ на шинах с помощью резервной защиты занимает много времени. Это является существенной проблемой в качестве электроэнергии из-за кратковременных падений напряжения.

Использование шины процесса согласно стандарту МЭК 61850 значительно уменьшает стоимость таких схем, так как нет необходимости в использовании периферийных модулей и их замены объединяющими устройствами. Однако, если шина процесса не доступна на подстанции, то все еще требуется использование низкоимпедансной защиты, если требуется быстрое устранение КЗ на шине.

Альтернативный метод защиты шин на подстанциях, основанных на стандарте МЭК 61850, использующих станционные шины, применение схем защиты шин по направлению мощности. Употребление понятия Распределенных Приложений, описанных в МЭК 61850, объединено с использованием расширенных высокоскоростных алгоритмов определения направления мощности, основанных на наложении компонентов токов и напряжений, рассчитанных реле защиты. Это применение основано на высокоскоростном р2р GOOSE соединении.

В случае КЗ на любом из защищаемых элементов, одно или несколько устройств IED увидит КЗ в зоне. Каждое реле защиты линий электропередачи, трансформаторов, секционных выключателей, подключенных к шине, посылает GOOSE сообщения об ошибке. В этом случае, одно или несколько реле увидит КЗ вне зоны, обращаясь к ЦБ, который выполняет функцию направленной защиты.

Если КЗ на шине, то все IED увидят КЗ вне зоны, либо не увидят КЗ вообще (если это связано со слабым источником), то есть ни одно IED не увидит КЗ в зоне.

ЦБ должен быть запрограммирован на получение GOOSE сообщений от всех защищаемых устройств, подключенных к шине. В случае КЗ, функция распределенной защиты шин в контроллере IED проверяет GOOSE сообщения, получаемые из отдельных реле, включенных в систему функции распределенной защиты шин.

Если все сообщения указывают на КЗ вне зоны или на отсутствие КЗ и не определяют КЗ в зоне, то функция защиты шин распознает КЗ на шинах и посылает коммуникационные сообщения на отключение всех выключателей, подключенных к шинам. Небольшое время задержки требуется, чтобы гарантировать, что все реле имеют достаточно времени для определения места повреждения.

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НАЛОЖЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Быстрое определение места КЗ имеет важное значение при оценке системы распределенной защиты шин.

Как правило, орган направленности в многофункциональных реле основан на фазовом соотношении между фазными токами или током симметричных составляющих и выбранными параметрами, такими как токи нулевой последовательности или напряжения обратной или нулевой последовательности.

Однако изменение конфигурации системы может привести к нарушению параметров, используемых для определения направления и привести к неправильной работе реле. Например, если орган направленности – напряжение обратной последовательности и источник имеет низкоимпедансное сопротивление, измерение напряжения обратной последовательности будет очень медленным.

Составляющие тока и напряжения, которые непосредственно связаны с определением места повреждением, также могут успешно использоваться для определения направления КЗ.

Дальнейшее развитие метода, основанного на сравнительном признаке Δi и Δu это использование Δi и Δu , то есть использование переходной мощности или дальнейшее определение среднего значения этой мощности за определенный период времени после повреждения для получения переходной энергии.

Направление энергии в переходном процессе зависит от трехфазных произведений наложенных токов и напряжений. Направление повреждения определяется сигналом переходной энергии, вызванной возникновением повреждения, вычисляется

$$S = \int U I dt \quad (4)$$

Трехфазная энергия вычисляется как:

$$S = \int (\Delta U_a \Delta I_a + \Delta U_b \Delta I_b + \Delta U_c \Delta I_c) dt \quad (5)$$

Вычисления в реле выполняются как:

$$S = \Sigma (\Delta U_{ai} \Delta I_{ai} + \Delta U_{bi} \Delta I_{bi} + \Delta U_{ci} \Delta I_{ci}) \quad (6)$$

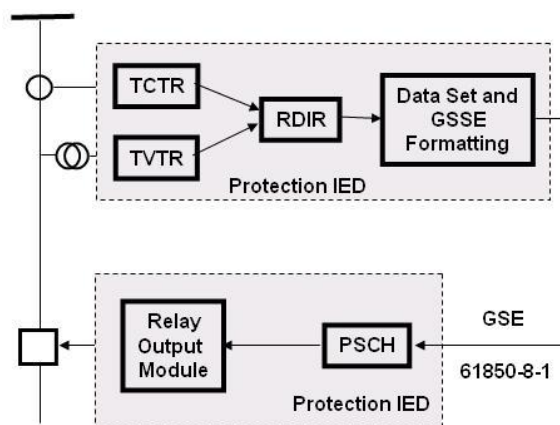


Рис. 7: Сообщения GSE используются в схемах направленной защиты шин

Этот метод позволяет точно определить направление повреждения при изменяющихся условиях системы и не зависти от последовательно компенсированной линии передачи и взаимной связи. Поэтому, уменьшается вероятность неправильной работы реле, обеспечивается очень быстрое (между $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$ периода) и надежное определения направления, котрое может применяться в системе распределенной защиты шин.

Функция определения направления представлена логическим узлом RDIR в стандарте МЭК 61850.

6 ЗАЩИТА ШИН ПО ПРИНЦИПУ СРАВНЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Все устройства, защищающие первичное оборудование, подключенное к шинам станции (подстанции) в данной схеме работают в качестве определителей направления мощности (посылающие IED), а центральное устройство является принимающим IED.

Система направленной защиты шин по своей архитектуре состоит из устройств трёх типов:

- Центральное устройство, сравнивающее направление мощности и выполняющее ряд других смежных функций
- Устройства, определяющие направление мощности

- Ethernet-свитч

В устройстве защиты шин предусмотрена небольшая выдержка времени ($1/4$ периода), запускающаяся при получении сообщения о КЗ «за спиной», которая обеспечивает надёжное срабатывание всех органов направления мощности в защитах первичного оборудования.

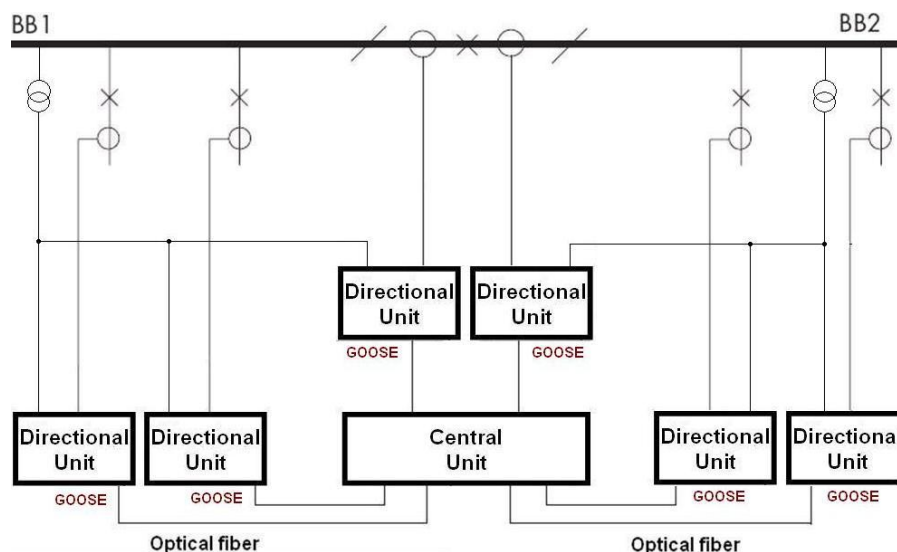


Рис. 8: Схема направленной защиты шин

Принцип равноправной передачи между устройствами в системе защиты шин предполагает определение направления мощности при КЗ за время не более полупериода для всех направленных органов. С учётом времени передачи сообщения (4-5 мс) и выдержки времени на срабатывание защиты шин (тоже 4-5 мс), полное время срабатывания составляет не более 1 периода.

Преимущество защиты шин с равноправной передачей состоит в том, что она обеспечивает быстрое отключение КЗ на шинах передающих и распределительных подстанций без необходимости реализации дополнительных схем защит (функция защиты шин при этом выполняется комплексом IED). Такая защита может использоваться вместо защиты шин высокого или низкого сопротивления, а иногда позволяет отказаться от дополнительной установки или замены трансформаторов тока.

Распределенная защита шин легко приспосабливается к изменениям конфигурации шины ПС, так как получает GOOSE сообщения о любых переключениях на подстанции. Основываясь на этой информации, контроллер IED динамически изменит свой подписной лист, чтобы получить сообщения только от IED, присоединенных к защищаемой шине.

Другое важное преимущество этой схемы по сравнению шиной процесса на основании ДЗШ это то, что не требуется точная синхронизация по времени, то есть, нет необходимости в отдельной сети синхронизации.

7 ПРЕИМУЩЕСТВА ШИН ПРОЦЕССА ПО СТАНДАРТУ МЭК61850

Применение шин процесса имеет несколько преимуществ перед обычными аналоговыми цепями, которые очень важны для защиты шин. Первое преимущество — значительное сокращение стоимости системы после замены многожильных медных кабелей небольшим количеством оптоволоконных кабелей.

Использование шины процесса также приводит к значительному уменьшению вероятности насыщения ТТ вследствие уменьшения сопротивления токовых цепей. Обычно напряжение точки насыщения ТТ это функция от сопротивления различных присоединений токовой цепи:

$$V_K = f(R_{CT}, R_L, R_{RP}) \quad (7)$$

где:

V_K = Напряжение точки насыщения ТТ (вольт)

R_{CT} = Сопротивления вторичной обмотки ТТ (Ом)

R_L = Сопротивление провода от реле до ТТ (Ом)

R_{RP} = Импеданс реле фазы тока

В некоторых случаях, сопротивление R_L умножается на 2 и играет ключевую роль в определении требований ТТ.

В этом случае, вторичная обмотка ТТ подключена к входу фазного тока Объединяющего Устройства и R_L фактически равно 0. Напряжение точки насыщения ТТ в этом случае будет зависеть от

$$V_K = f(R_{CT}, R_{RP}) \quad (8)$$

Сопротивление R_{RP} токовых входов Объединяющего Устройства очень небольшое, тем самым уменьшается возможность насыщения ТТ и все проблемы, связанные с этим.

Решения использования шин процесса также повышают безопасность подстанции, устраняя одну из главных проблем безопасности – разомкнутое состояние токовой цепи. Так как небольшое расстояние между вторичной обмоткой ТТ и входом Объединяющего Устройства, то вероятность разомкнутого состояния очень мала. Это становится вообще несущественным, если используются датчики тока.

В конце концов, шина процесса увеличивает гибкость ДЗШ. Так как токовые цепи нельзя легко переключить из-за опасности разрыва цепей тока, применение ДЗШ становится сложным. Вышеупомянутое не является проблемой для шины процесса, потому что любые изменения требуют только модификации в подписке защиты IED, получающих значения аналоговых выборок по МЭК 61850 9-2.

8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе анализируются современные тенденции развития распределенных систем защиты шин и сосредоточено внимание на воздействии МЭК 61850 на примере защиты шин.

Описана ДЗШ, основанная на шине процесса по МЭК 61850 9-2, и направленная защита шин, использующая высокоскоростное соединение.

Современные распределенные системы защиты шин, основанные на МЭК 61850, предлагают некоторые существенные преимущества по сравнению с обычными устройствами ДЗШ:

- Уменьшение монтажных соединений, стоимости установки, обслуживания и ввода в эксплуатацию
- Легкая адаптация к изменению конфигурации шин ПС, устранение насыщения ТТ и обрыва цепей.