



Столыпинский
вестник

Научная статья

Original article

УДК 62

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И
ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСА СИСТЕМ
МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ**

**DEVELOPMENT OF VECTOR MEASUREMENT SYSTEM TECHNOLOGY
AND ITS IMPLEMENTATION AS PART OF A COMPLEX OF TRANSIENT
MONITORING SYSTEMS**

Пашковская Екатерина Евгеньевна, магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г Москва, Красноказарменная ул., 14

Груздов Андрей Геннадьевич, магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г Москва, Красноказарменная ул., 14

Сивеев Тихон Максимович, студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г Москва, Красноказарменная ул., 14

Котов Андрей Сергеевич, студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г Москва, Красноказарменная ул., 14

Pashkovskaya Ekaterina Evgenievna, Master's student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Gruzdev Andrey Gennadievich, Master's student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Tikhon Maximovich Siveev, student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Kotov Andrey Sergeevich, student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Аннотация: В данной статье анализируется актуальность применения технологии системы векторных измерений (СВИ) в качестве наиболее перспективной технологии развития крупнейших энергосистем мира, а также рассматриваются требования к составу комплекса систем мониторинга переходных режимов (СМНР) и возможности улучшения данной реализации технологии СВИ для более эффективного осуществления автоматического управления энергосистемой.

Abstract: This article analyzes the relevance of using the technology of the vector measurement system as the most promising technology for the development of the world's largest power systems, and also considers the requirements for the composition of the complex of transient monitoring systems and the possibility of improving this implementation of the vector measurement system technology for more efficient implementation automatic control of the power system.

Ключевые слова: системы векторных измерений, устройства СВИ, системы мониторинга переходных режимов в энергосистеме, синхронизация, дифференциальные защиты, автоматика ликвидации асинхронного режима.

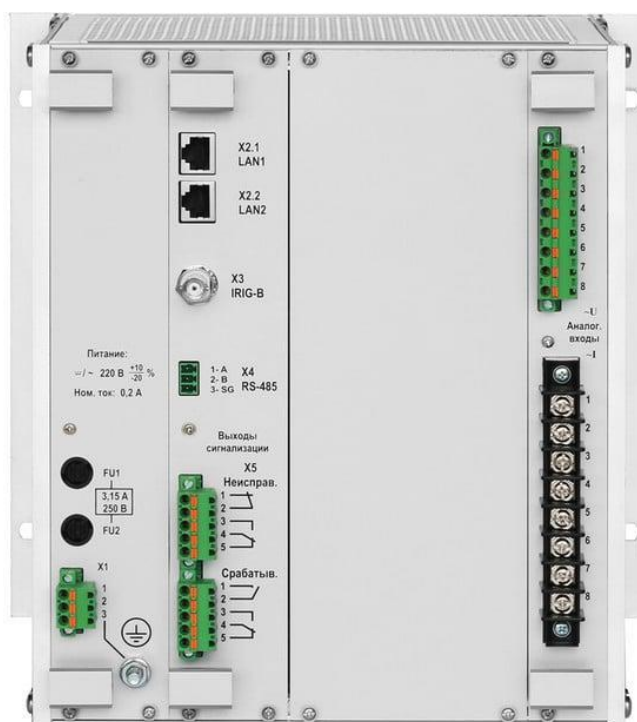
Keywords: vector measurement systems, SMI devices, systems for monitoring transient modes in the power system, synchronization, differential protection, automatic elimination of asynchronous mode.

В условиях усложнения функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) возникает необходимость развития средств автоматического управления режимами работы ЭЭС. Соответственно, необходимо использовать методики, позволяющие повысить эффективность управления системой. Стандарт АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.020.011-2016 [2] устанавливает требования к устройствам синхронизированных векторных измерений (УСВИ) и область их применения. Согласно [1, с. 16-17] применение УСВИ позволяет улучшить информационное обеспечение систем мониторинга, управления и защиты.

В основе принципа работы СВИ лежит синхронизация по времени измерений параметров переходных процессов, происходящих в исследуемой системе, с последующим вычислением взаимных углов векторов напряжений. Синхронизация сигналов происходит благодаря использованию глобальных навигационных систем (GPS). Данная технология является одной из наиболее эффективных и приоритетных в развитии крупнейших мировых ЭЭС [3]. Системы мониторинга Китая, США, Российской Федерации, Бразилии, Индии, Мексики, использующие данные СВИ (Wide-area measuring systems – WAMS), достаточно активно развиваются в связи с возможностью данной методики оперативно реализовывать оценку состояния энергосистемы, что, в свою очередь, позволяет значительно повысить ее производительность и надежность функционирования.

На территории Российской Федерации технология СВИ используется при проектировании систем мониторинга переходных режимов (СМНР). Наиболее важной функцией данной системы является возможность осуществлять в режиме реального времени автоматическое противоаварийное управление. В ЭЭС России система представляет собой комплекс

регистрирующих приборов, каналов передачи информации между регистраторами, концентраторами данных и центрами управления, а также средства обработки получаемой информации [4]. О динамическом поведении электроэнергетической системы при технологических нарушениях и авариях позволяют сформировать точное представление установленные в крупных энергоузлах и электростанциях вторичного регулирования регистраторы. Соответственно, обеспечивается регистрация синхронизированных по времени параметров режима, на основании которых анализируются электромеханические переходные режимы.



**Рисунок 1. Устройство синхронизированных векторных измерений
ТПА-02**

Таким образом, технология СВИ, реализованная в системе мониторинга переходных процессов, позволяет с достаточно высокой скоростью обрабатывать и дискретизировать регистрируемые параметры электроэнергетической сети. Однако в настоящее время существует необходимость повысить технические возможности регистраторов, выполняющих первичное преобразование входных параметров режима. Для

повышения качества управления энергосистемой, в первую очередь, нужно повысить надежность их работы, требуется совершенствование протоколов обмена информацией, ускорение быстродействия используемых каналов связи, повышение гарантированности доставки информации. Только при выполнении данных требований возможна реализация потенциала СВИ [5, с.8-16].

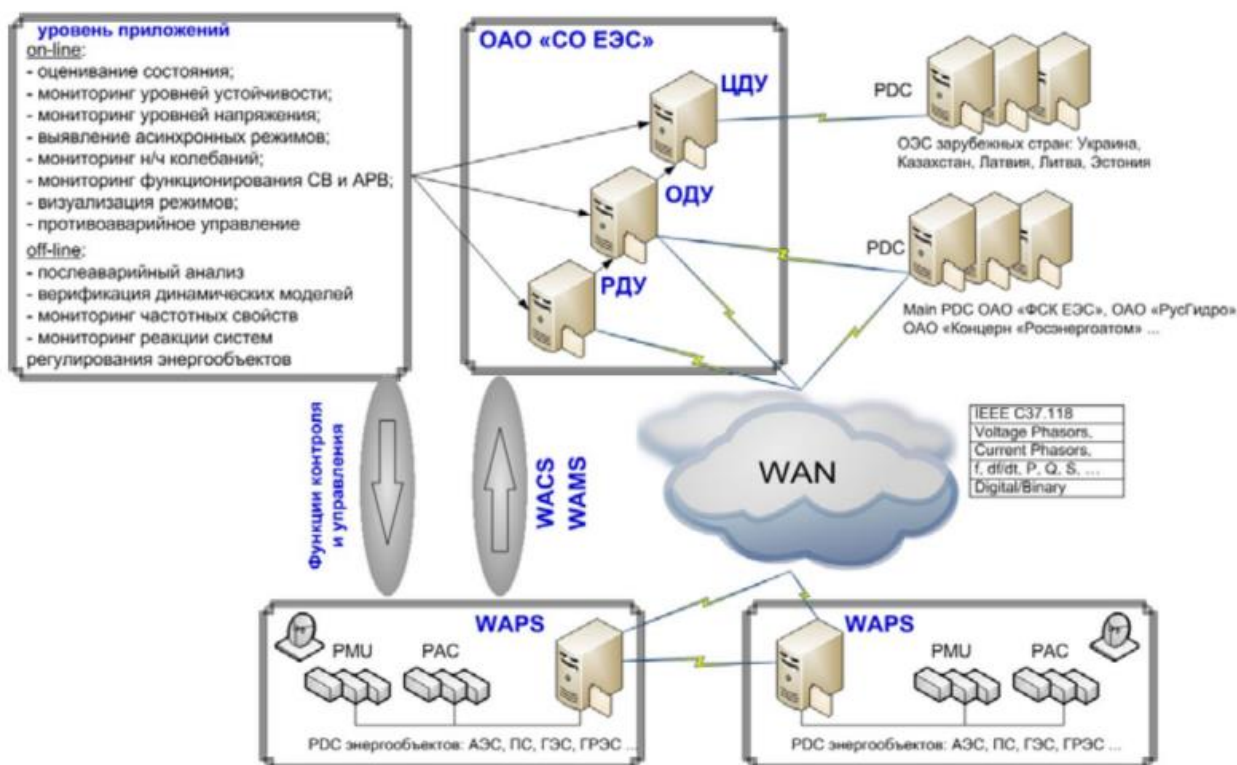


Рисунок 2. Структурная схема системы сбора и использования технологии СВИ

Соответственно, в программно-технический комплекс системы мониторинга переходных процессов входят:

- Измерительные преобразователи на контролируемых присоединениях, предназначенные для формирования векторных значений измеряемых параметров в соответствии с временными метками;
- Сигнализирующая о неисправностях подсистема диагностики;

- Сервер сбора для обеспечения сбора информации от измерительного прибора и архивации получаемой информации с возможностью последующей передачи пользователю по имеющемуся запросу;
- Приемник GPS, предназначенный для точной синхронизации выполняемых временных измерений;
- Информационно-вычислительная сеть, связывающая измерители преобразователи с серверами сбора;
- Электропитающие средства компонентов системы;
- Базовое программное обеспечение компонентов системы;
- Программное обеспечение для конфигурации системы мониторинга местным персоналом.

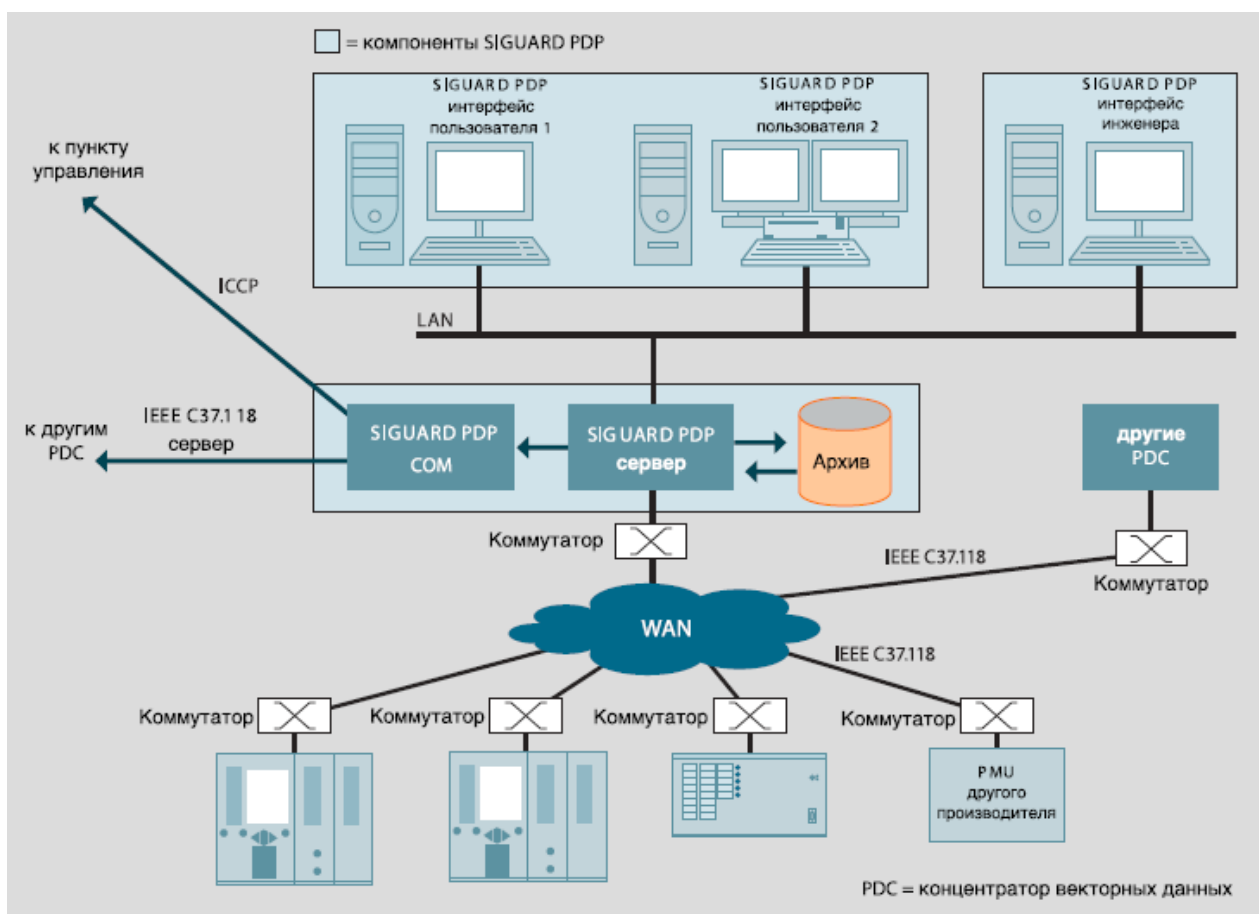


Рисунок 3. Схема распределительного мониторинга

Так как данная совокупность устройств системы мониторинга переходных режимов должна обеспечивать высокую степень надежности и точности автоматики защиты, а также в процессе возникновения аварийных ситуаций в энергосистеме своевременно анализировать и производить отключение поврежденных компонентов системы, то формируются требования к данным устройствам СВИ [2, с. 8 - 9]:

- Измерение необходимых параметров: синхронизированные векторы фазных напряжений и тока (модулем является действующее значение основной гармоники фазного напряжения), фазовый угол – «абсолютный угол», то есть угол между основной гармоникой фазного напряжения (тока) и условной синусоидой промышленной частоты, фаза которой считается равной нулю при смене секунд UTC; частота пофазно и прямой последовательности; скорость изменения частоты;
- Синхронизация УСВИ происходит при помощи приемников сигналов глобальных навигационных систем с точностью синхронизации не хуже 1 мкс.

Важно отметить, что УСВИ может выполняться как отдельным устройством, так и быть в составе многофункционального устройства и выполнять заданную функцию. В соответствии с этим, УСВИ разделяются на следующие классы точности [2, с. 7]:

- УСВИ класса Р. Применяется в составе локальных систем автоматического управления и для задач, требующих максимальной скорости отклика устройства;
- УСВИ класса М. Применяются для задач мониторинга на присоединениях ЛЭП и генераторов, а так же в задачах, где допускается время отклика устройства более 35 мс.

В настоящее время применяются устройства синхронизированных векторных измерений, разрабатываемые для систем мониторинга стационарных режимов энергосистем, по этой причине в динамических режимах данные устройства не соответствуют условиям их работы в системах

управления и защиты. Данная проблема связана с низкой частотой дискретизации рассчитываемых параметров, достаточно низкой скоростью передачи данных и недостаточной надежностью защиты каналов связи [4]. Улучшить качество измерений в динамических режимах до требуемого системой можно с помощью повышения частоты определения интегральных параметров электрического режима (ПЭР) [4]. Более подробно анализировать переходные процессы в аварийных режимах в системе возможно при вычислении значений ПЭР чаще четырех раз за период основной частоты. Однако такое увеличение частоты измерений требует увеличения быстродействия каналов передачи собираемых данных.

Функции узлового устройства выполняют концентраторы синхронизированных векторных данных (КСВД). Данные устройства применяются в цикле передачи информации от уровня энергообъектов до центра обработки данных СВИ. Размещение данных устройств определяется в основном местоположением объекта контроля и используемых каналов связи. Концентраторы данных также являются шлюзами для информационных потоков между диспетчерским центром и энергообъектом, что значительно снижает нагрузку на каналы передачи данных и увеличивает скорость доставки информации.

Шлюз-концентратор векторных измерений (Phasor Data Concentrator – PDC) используется для сбора и хранения информации, получаемой от устройства СВИ, далее вычисляются векторы напряжения и тока прямой последовательности и значения активной и реактивной мощностей. Кроме того, PDC имеет возможность визуализировать изменения системы за произвольный период времени в виде графиков зависимости параметров от времени, фиксировать условия формирования сигналов при отклонениях измеряемых величин и их скоростей изменения.

Согласно [6], существует классификация КСВД в структуре СМПР ЕЭС России на следующие категории в зависимости от объема функциональных требований:

- Локальные – устанавливаются на электростанциях и подстанциях;
- Региональные – предназначены для установки в филиалах АО «СО ЕЭС» ОДУ и в филиалах АО «СО ЕЭС» РДУ
- Главный – устанавливается в главном Диспетчерском Управлении (ЦДУ).

Данный стандарт регламентирует требования к быстродействию КСВД [6, с. 8-9]: локальные КСВД – 20-100 мс, региональные КСВД – 20-2000 мс, главные КСВД – 20-15000 мс.

Также КСВД должен обеспечивать время агрегирования (объединения данных с определенной меткой времени в один кадр и отправкой на более высокий уровень) за время, которое не должно превышать 50 мс для локальных КСВД, 100 мс – для региональных.

Таким образом, технология СВИ предоставляет возможность получать унифицированный набор данных о режиме работы ЭЭС. Данная технология позволяет снабжать информацией не конкретный класс устройств, а как можно большее количество устройств, чьим требованиям по качеству производимых измерений данная система может соответствовать.

Основным достоинством технологии СВИ является возможность получать достоверную синхронизированную по времени информацию об электрических параметрах режима достаточно удаленных друг от друга узлов электроэнергетической системы. Закономерно, что применение технологии СВИ целесообразно применять на ЛЭП сверхвысокого напряжения (500 кВ и выше), а так же на электростанциях достаточно большой мощности (более 500 МВт). Соответственно, к устройствам СВИ, при использовании для реализации релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА), предъявляются следующие требования:

1) Необходимо использовать регистраторы, способные производить замеры не реже раза в четверть периода промышленной частоты, что позволяет более точно интерпретировать результаты измерений;

2) Качественные замеры должны сниматься не только в стационарных, но и динамических режимах. В силу того, что изначально комплекс СМПР разрабатывался для мониторинга состояния сети в доаварийных и послеаварийных режимах, диапазон выполнения замеров для величины тока присоединения чаще всего ограничен диапазоном рабочих токов, что делает невозможным использовать данные СВИ в алгоритмах РЗ и ПА, если необходимо реагировать на изменения величины первичного тока, значительно превышающего рабочие значения;

3) Структура обмена информацией между устройствами комплекса СМПР должна обеспечивать выполнение требований к быстродействию РЗ и ПА. Согласно требованиям современной документации, не подразумевается возможность извлечения информации сторонними устройствами по пути передачи данных СВИ в темпе процесса, что не позволяет во многом внедрять алгоритмы РЗ и ПА, которые используют данные СВИ. Соответственно, для их внедрения необходима подготовка соответствующей нормативной базы, описывающей способы и возможный порядок подключения сторонних устройств к технологической сети обмена данными комплекса СМПР, а также реализация УСВИ с необходимыми свойствами согласования с РЗ и ПА;

4) Поскольку стандарт АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.020.003-2018 [6] не регламентирует требования к обмену информацией между несколькими КСВД локального уровня или к отправке данных СВИ вниз по иерархии КСВД, то необходимо проанализировать возможность создания горизонтальных связей между объектами или реализовать двустороннюю связь между КСВД различных уровней, таким образом, упрощается работа РЗ и ПА;

5) Необходима реализация доступа к дискретной информации о состоянии защищаемого или контролируемого объекта, так как некоторым алгоритмам при выполнении функций РЗ и ПА требуется на основании получаемых данных осуществлять формирование управляющих воздействий;

б) Обмен информацией должен обеспечиваться достаточной скоростью и надежностью, то есть необходим постепенный отход от использования общедоступных сетей.

Непосредственное использование информации, получаемой от СМПР, для реализации быстродействующих алгоритмов релейной защиты и противоаварийной автоматики требует уменьшения времени доставки информации за время, сопоставимое с длительностью периода промышленной частоты, а также уменьшения шага дискретизации по времени подготовки выдаваемых параметров. Использование информации, получаемой от СМПР, для реализации функций устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики пока невозможно, соответственно, необходимо рассмотреть возможности использования получаемой информации для адаптации этих устройств к текущему режиму, или для реализации дополнительных функций.

1) Дифференциальные и дифференциально-фазные защиты протяжённых объектов (линий) [7]. Для обеспечения необходимого быстродействия этих защит должна быть реализована передача информации о мгновенных значениях контролируемых параметров, следовательно, необходимо использование быстродействующих выделенных каналов связи с достаточно малым временем доставки информации. Технологии СМПР таким требованиям не удовлетворяют.

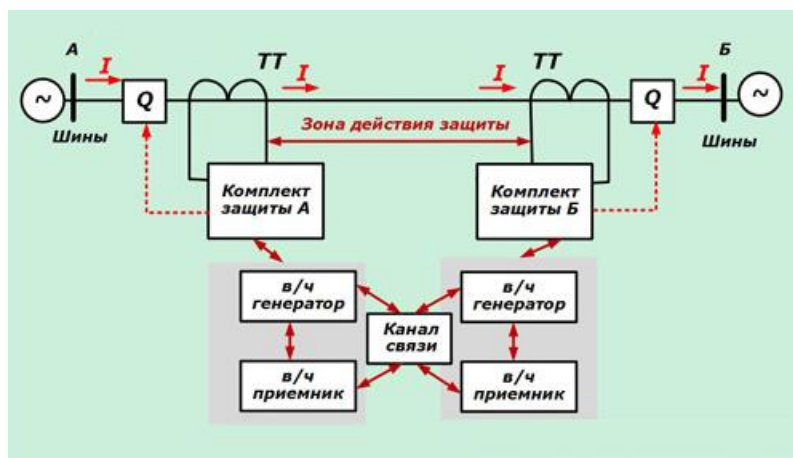


Рисунок 5. Принцип работы схемы дифференциально-фазной защиты

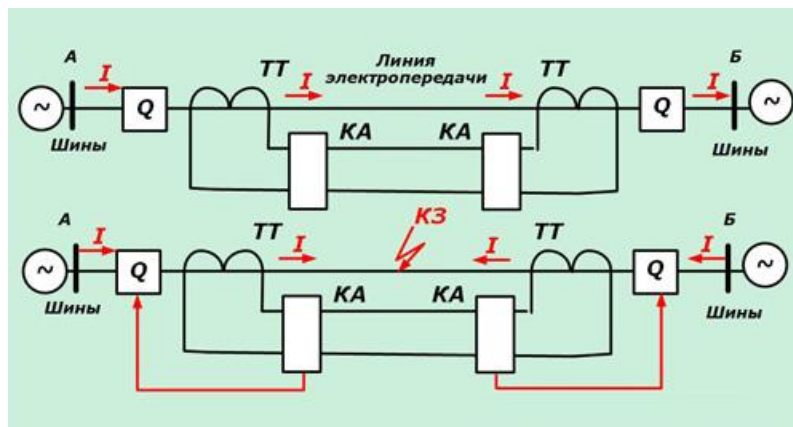


Рисунок 6. Принцип работы схемы продольной дифференциальной защиты

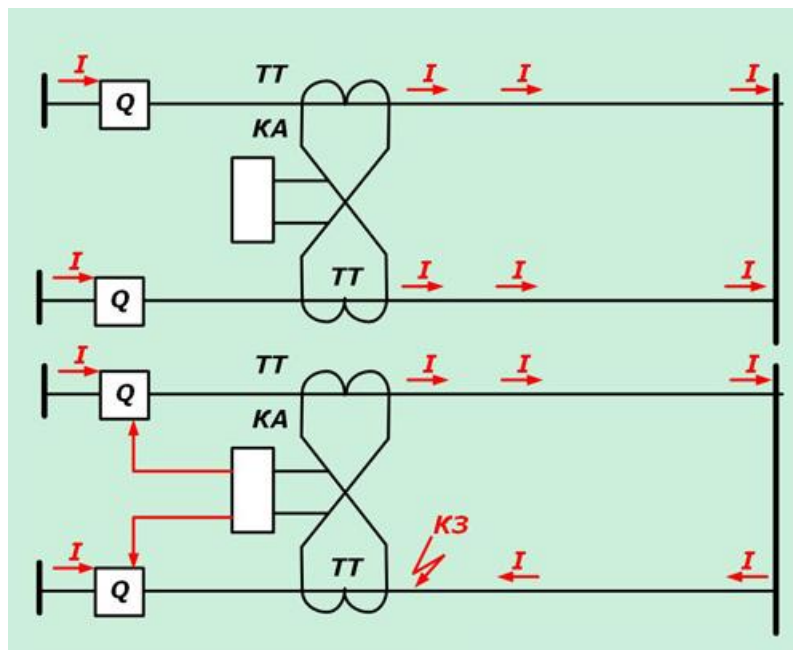


Рисунок 7 – Принцип работы схемы поперечной дифференциальной защиты

На рисунках 5, 6, 7 приведены используемые в настоящее время схемы дифференциальной и дифференциально-фазной защиты. Продольная дифференциальная защита (Рис. 6) использует подключение измерительных токовых реле таким образом, чтобы вектора токов от измерительных трансформаторов на обмотке подавались встречно, что, соответственно,

позволяет при возникновении токов короткого замыкания внутри контролируемой области определять протекание токов через обмотку токового реле и производить отключение. Благодаря такому подключению, когда вектора токов противонаправлены, при номинальном режиме и аварийных ситуациях вне исследуемой зоны происходит компенсация токов и автоматика не отключает не поврежденный контролируемый участок. Дифференциально-фазовая защита (Рис. 5) Основывается на том же принципе, что и дифференциальная продольная, однако связь между концами линий контролируемой зоны для сравнения направлений векторов токов осуществляется посредством каналов связи за счет передачи высокочастотных импульсов, что позволяет более точно определить повреждение в исследуемой области.

Поперечная дифференциальная защита (Рис. 7) по принципу действия аналогична продольной дифференциальной защите, однако предназначается для объектов одной подстанции.

2) Автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР). Непосредственное использование получаемых по каналам передачи СМПР векторных значений контролируемых параметров для реализации ступеней АЛАР, имеющих высокое быстродействие, затруднительно из-за непредсказуемости времён обмена информацией [8, с.5].

Возможно использование каналов передачи данных СМПР для получения предаварийной информации, что может быть использовано для автоматической коррекции настроек АЛАР.

Используя возможности СМПР, можно осуществлять сбор информации о взаимных углах напряжений нескольких точек, в том числе и удалённых, что предоставляет возможность прямого контроля взаимных углов на линиях электропередачи, а также между различными узлами электроэнергетической системы. Следовательно, повышается эффективность формируемых управляющих воздействий. При использовании СВИ появляется возможность использования информации о фазе напряжения в удалённых точках системы,

что даёт возможность распознавания асинхронных режимов с очень малыми частотами скольжения.

3) Автоматика ограничения повышения напряжения (АОПН). В настоящее время при выполнении АОПН часто используется информация о состоянии коммутационных аппаратов на удалённом конце контролируемой линии. В этом случае необходима передача только дискретной информации, что обычно реализуется средствами телемеханики. При построении более гибких алгоритмов АОПН может потребоваться дополнительная информация с противоположного конца контролируемой линии. Такими параметрами могут быть напряжения на противоположном конце линии и в точках промежуточных отборов, а также мощности в отборах и на противоположном конце линии. Учитывая, что АОПН имеет ступени со значительными выдержками времени, некоторое запаздывание получаемой информации может оказаться допустимым. Поэтому в перспективе возможно использование средств СМПР при реализации АОПН.

4) Автоматика ограничения перегрузки оборудования (АОПО). В настоящее время устройства АОПО используют аналоговую информации, получаемую в месте установки. Этот вид автоматики требует достаточно жёстких требований к алгоритмам и количеству задаваемых уставок. Все ступени АОПО работают со значительными выдержками времени, и поэтому задержки получения информации с удалённых точек контролируемого объекта не являются критичными. Поэтому при возникновении необходимости использования такой информации при построении АОПО вполне оправдано применение СМПР.

5) Автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН). В этом виде автоматики для формирования управляющих воздействий может привлекаться информация о напряжениях во многих местах энергосистемы. Ступени АОСН, чаще всего, работают со значительными выдержками времени, соответственно, получение дополнительной информации о напряжениях в удалённых узлах энергосистемы не требует высокого

быстродействия. Поэтому при возникновении необходимости использования значений напряжения в удалённых узлах энергосистемы могут использоваться средства СМПР.

Результаты изучения и анализа материала показывают, что использование синхронизированных векторных измерений на данный момент требуют технических доработок, как со стороны оборудования, так и документирующих к нему требований. В целом, существующие стандарты и технические решения могут быть применены для оперативного и, в перспективе, автоматического управления режимами энергосистем, однако для мониторинга переходных режимов не подходят. В настоящий момент новизна и автономность систем мониторинга и управления, их высокая средняя стоимость, а также высокие требования к пропускной способности каналов связи затрудняют применение рассматриваемых технологий.

Таким образом, требуется рассмотреть возможности объединения проверенных свойств традиционной противоаварийной автоматики с инновационными возможностями технологии СВИ.

Литература:

1. Максимов Б.К., Климова Т.Г., Жуков А.В., Дубинин Д.М. Синхронные векторные измерители параметров режима электроэнергетических систем в различных условиях работы. – Электричество, 2018, №6
2. СТО 59012820.29.020.011-2016. Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования. М., 2016. – 37 с.
3. Цифровая подстанция. Перспективы применения синхронизированных векторных измерений. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/05/07/perspektivy-primeneniya-sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij/> (дата обращения: 12.08.2022)
4. Дубинин Д. М., Жуков А. В. Развитие технологии синхронизированных векторных измерений в ЕЭС России. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/03/22/razvitie-tehnologii->

sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij-v-nbsp-ees-rossii/ (дата обращения: 14.08.2022)

5. Приложение к распоряжению АО «СО ЕЭС» от 05.04.2016 № 44р. Концепция развития и применения технологии синхронизированных векторных измерений для повышения качества и надежности управления электроэнергетическим режимом ЕЭС России на период до 2020 года. – 47 с.
6. СТО 59012820.29.020.003-2018. Релейная защита и автоматика. Концентраторы синхронизированных векторных данных. Нормы и требования. М., 2018. – 37 с.
7. Школа для электрика: электротехника и электроника. Дифференциальная защита. URL: <http://electricalschool.info/relay/1731-differencialnaja-zashhita.html> (дата обращения: 23.09.2022)
8. Гоник Я. Автоматика ликвидации асинхронного режима. — Энергоатомиздат, 1988. — 110 с.

Literature:

1. Maksimov B.K., Klimova T.G., Zhukov A.V., Dubinin D.M. Synchronous vector meters of parameters of the electric power systems mode in various operating conditions. – Electricity, 2018, No. 6
2. STO 59012820.29.020.011-2016. Relay protection and automation. Devices of synchronized vector measurements. Norms and requirements. М., 2016. – 37 p.
3. Digital substation. Prospects for the application of synchronized vector measurements. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/05/07/perspektivy-primeneniya-sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij/> (accessed: 12.08.2022)
4. Dubinin D. M., Zhukov A.V. Development of synchronized vector measurement technology in the UES of Russia. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/03/22/razvitie-tehnologii->

sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij-v-nbsp-ees-rossii / (accessed: 08/14/2022)

5. Appendix to the order of JSC "SO UES" dated 05.04.2016 No. 44p. Concept of development and application of synchronized vector measurement technology to improve the quality and reliability of the management of the electric power regime of the UES of Russia for the period up to 2020. – 47 p .
6. STO 59012820.29.020.003-2018. Relay protection and automation. Hubs of synchronized vector data. Norms and requirements. M., 2018. – 37 p.
7. School for electrician: electrical engineering and electronics. Differential protection. URL: <http://electricalschool.info/relay/1731-differencialnaja-zashhita.html> (date of application: 09/23/2022)
8. Gonik Ya. Automatic elimination of asynchronous mode. — Energoatomizdat, 1988. — 110 p.

© Пашковская Е.Е., Груздов А.Г., Сивеев Т.М., Котов А.С. Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 9/2022.

Для цитирования: Пашковская Е.Е., Груздов А.Г., Сивеев Т.М., Котов А.С. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 9/2022.