
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов

ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕГЕТИКИ НА ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

В статье раскрываются вопросы реализации плана мероприятий по переходу отечественной электроэнергетической отрасли на цифровые технологии. Представлена общая характеристика направлений перехода к цифровым технологиям. В каждом из направлений выделены проблемы и барьеры, препятствующие развитию и внедрению новых разработок. Обосновывается необходимость поиска компактных, экологических, энергоэффективных решений, соответствующих концепции современных городов. В качестве основы построения цифровой подстанции обозначена релейная защита как наиболее продвинутая в области цифровизации. Рассматривается актуальная задача разработки технических решений для контроллеров присоединения и контроллеров среднего уровня цифровой подстанции на отечественной элементной базе с применением МЭК 61850. Приведено краткое описание перспективных решений в области защиты и управления энергосистем, дана характеристика концепции интегрированной защиты и управления. Отмечена актуальность развития и внедрения в электроэнергетику облачных технологий. Отдельно рассмотрены гибкие системы передачи переменного тока, предназначенные для увеличения устойчивости и пропускной способности систем. В заключение приведено описание идеи твердотельного трансформатора, имеющего ряд преимуществ по сравнению с существующими силовыми трансформаторами.

Ключевые слова: гибкие системы передачи переменного тока, интеллектуальная электрическая сеть, облачные технологии, релейная защита, твердотельный трансформатор, универсальный преобразователь напряжения, цифровые технологии, цифровая подстанция.

1. Введение

В соответствии с представленной в 2011 году «Концепцией интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью» и дальнейшим ее развитием Правительством Российской Федерации, разработан план мероприятий по совершенствованию законодатель-

ства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной инициативы [1]. Выполнение данного плана предполагается поэтапно с 2018 по 2035 гг. и предусматривает развитие в сфере надежных и гибких распределительных сетей, развитие распределенной энергетики, создание новых технологий управления перетоками мощности. Ожидаемыми результатами перехода к цифровым технологиям являются: качественное улучшение услуг в сфере электроснабжения, появление и развитие активных энергетических комплексов (активных потребителей), широкое использование интеллектуальных устройств и систем. Вместе с тем можно говорить об отсутствии правового и технического регулирования, необходимого для внедрения новых устройств и технологий. Необходимо определение юридического статуса функционирования активных энергетических комплексов в составе Единой энергетической системы России, требуется совершенствование существующих или даже создание новых механизмов распределения системного экономического эффекта. Речь идет о пересмотре практики перекрестного субсидирования, определении и статусе технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем.

Создание активно-адаптивных энергетических комплексов потребует создание сетевого резерва, что приведет к снижению доходности сетевых организаций. Средняя загрузка магистрального сетевого комплекса составляет 26 %, а распределительного – 32 %, у генерирующих компаний среднегодовой коэффициент использования установленной мощности составляет около 50%. Особая роль отводится объединениям потребителей с управляемой нагрузкой, с распределенной генерацией и накопителями. Необходимо разрабатывать интеллектуальные мультиагентные системы управления, позволяющие в конечном итоге подойти к полноценным «умным сетям», открывающим возможности более эффективного управления имеющимися мощностями. Такой подход может привести не только к сокращению потребности в новых мощностях, но и к оптимизации сетевой инфраструктуры. Распределительные сети напряжением ниже 110 кВ с активными и пассивными потребителями, с объектами распределенной генерации должны стать активно-адаптивными комплексами – платформами с глобальной информационной средой, в которой интеллектуальные программно-аппаратные средства осуществляют энергообмен без участия человека. Не останутся без внимания и изолированные территории, развитие которых невозможно без гибридных источников и систем управления ими. Очевидно, что существующая система категорирования потребителей по надежности устарела, и требуются новые целевые показатели надежности.

Основные нормы, регулирующие правила использования информационной сети, требуют новых реестров, регламентов и технологий, не использовавшихся ранее в электроэнергетике. Субъекты распределенной энергетики четко не определены ни на оптовом, ни на розничном рынке. Существующее положение в ценообразовании, тарифообразовании и технологическом присоединении к сети общего пользования просто закрывают возможности для развития распределенной энергетики. Для широкого и быстрого внедрения технологий и технических решений потребуются широкий спектр унифицированных (стандартных) технических требований, которые должны стимулироваться как передовые научные исследования. Только в этом случае могут появиться значительные научные заделы, в том числе и глобальные.

Одним из ключевых является вопрос совершенствования систем контроля и учета потребления, алгоритмов управления данными и их восстановления. Результатом должны стать «умные контракты» с подтверждением достоверности данных по объему потребления. В таких условиях потребуются дополнительные определения правил работы субъектов электроэнергетики. Электроэнергетика может стать важным социальным и инвестиционным фактором в целом регионе. Например, в регион с достаточными трудовыми ресурсами, но дефицитной энергетикой трудно привлечь инвестиции для развития технологического производства. Инвесторы, как правило, реализуют вложения в своей собственной сфере технологий. В энергетику и в электроэнергетику направляют инвестиции либо сами энергетики, либо банки, либо государство. Так, бурное развитие электроэнергетики в 1950-1960-е гг. происходило за счет государственного инвестирования. Дефицит электроэнергетики приводит к сдерживанию инвестиций в регион, следствием этого является миграция квалифицированных кадров. Поэтому для формирования распределенной экономики в России необходима бездефицитная, распределенная и надежная электроэнергетика.

Современная электроэнергетика трансформируется, происходит миграция населения в города, что требует увеличения и концентрации мощностей с высокой надежностью. Стоимость земли в городах растет, что соизмеримо со стоимостью основного оборудования. Поэтому инженеры, разработчики и проектировщики ищут новые компактные экологические решения, вписывающиеся в жизнь современного города для удовлетворения постоянно растущего спроса и социальной стабильности. Цифровые сети с интеллектуальными системами управления становятся неотъемлемой частью энергетической системы. Появление стандарта МЭК 61850 сопровождалось преждевременными оценками окончательной готовности,

но на самом деле речь идет только о первой стадии управления технологическими и коммерческими процессами.

Международный стандарт МЭК 61850 применяется к системам автоматизации подстанции (SAS). В нем приведены технические определения и описания процессов конфигурации и параметризации функций, требуемых для организации обмена данными между микропроцессорными устройствами на подстанции, а также требования к взаимосвязанным системам. Таким образом, данный стандарт сам по себе не является протоколом, однако используется для настройки параметров конфигурации микропроцессорных устройств с целью обеспечения функциональной совместимости при обмене данными с использованием протокола. Частично стандарт МЭК 61850 базировался на концепции автоматизации подстанции *UCA2.0*, которая была разработана в США под эгидой Электроэнергетического научно-исследовательского института (EPRI). Работа над обоими стандартами была развернута в начале 1990-х гг. В 1997 году *IEEE/EPRI* и международная электротехническая комиссия (МЭК/IEC) пришли к решению объединить оба стандарта для создания глобальной и уникальной системы автоматизации подстанции. Часть 3 «Общие требования» стандарта МЭК 61850 была первой частью, опубликованной в январе 2002 года. После этого были выпущены остальные, посвященные, в частности, моделям данных и коммуникационным услугам, и в целом стандарт был подготовлен к использованию в 2004 году.

В результате процесс внедрения стандарта в промышленность занял около десяти лет, и приблизительно двадцать лет прошло с того момента, как рабочие группы впервые приступили к концептуальной проработке. Совершенно оправданно предполагается, что будет продолжаться дальнейшее развитие стандарта с выпуском новых частей и новых редакций выпущенных ранее версий. Тем не менее, это подтвержденная технология, по которой уже работают свыше 6000 объектов по всему миру, поддерживаемая приблизительно 300 сертифицированными серверными микропроцессорными электронными устройствами и 16 сертифицированными клиентскими системами и микропроцессорными электронными устройствами. Стандарт предусматривает интеграцию всех функций защиты, управления, измерения и мониторинга в системы подстанции (рис. 1). Для обеспечения свободного присвоения функций микропроцессорным электронным устройствам предусмотрена функциональная совместимость между теми операциями, которые подлежат выполнению на подстанции, однако эти функции реализованы в оборудовании (физических устройствах) различных производителей. Функции могут быть физически распределены между компонентами,

выполняемыми в различных микропроцессорных устройствах, которые обмениваются данными друг с другом (распределенная функция). Продолжает ухудшаться состояние российского энергетического машиностроения, электротехнической промышленности, инжиниринга и пр. Доля России на мировом рынке современного энергетического оборудования, в том числе, интеллектуальных устройств и систем управления, составляет уже менее 1%. Динамика годовых темпов роста сегмента энергетического оборудования, согласно прогнозам, должны превысить 10% в год. Наблюдается тенденция прихода на этот рынок сильных компаний в области информационно-коммуникационных технологий и систем управления.

Рассматривая постановление правительства [1], экспертно-аналитический доклад [2] и другие официальные документы, можно сделать вывод о том, что пути перехода к цифровой электроэнергетике основываются на копировании опыта ведущих мировых компаний и ведущих производителей оборудования. С таким подходом трудно не согласиться, но необходимо учитывать также многие «подводные камни»: кибербезопасность, санкции, закрытые коды программного обеспечения. Ряд научных коллективов сегодня работает разрозненно, в инициативном порядке: самостоятельно ставит и выполняет задачи, многие из которых решаются стереотипно, без серьезных технических и технологических инноваций. Данную ситуацию можно исправить, если глубоко сегментировать направления научных исследований и ориентировать их на достижение конкретных результатов с заданными показателями и параметрами, соответствующими лучшим мировым образцам. Необходима новая научная концепция перехода к цифровой электроэнергетике. Подобную миссию может на себя взять только большой научно-исследовательский коллектив квалифицированных электроэнергетиков в области проектирования и эксплуатации.

С чего начать на сегодняшнем уровне развития цифровых технологий в электроэнергетике?

Наиболее продвинутой в области цифровизации является релейная защита как основа построения цифровой подстанции.

Во-первых: стандарт МЭК 61850 привел в соответствие все новые устройства и их архитектуры.

Во-вторых: информация о текущих режимах, собираемая в этих устройствах – самая исчерпывающая, самая точная и при необходимости – самая тиражируемая для других устройств.

В-третьих: модульность функциональных устройств и программного обеспечения, открывает широкие возможности для совершенствования.

В-четвертых: высокая степень интеграции устройств позволяет расширять поле возможностей.

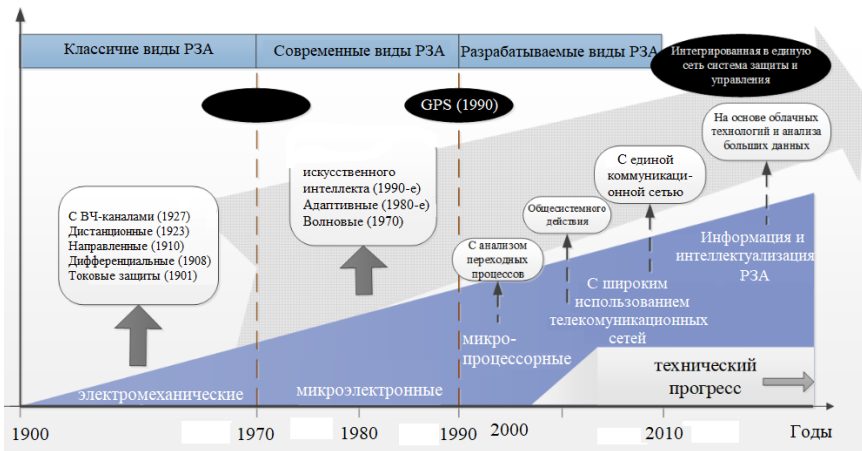


Рис. 1. Развитие технологий, применяемых при строительстве трансформаторных подстанций

II. Релейная защита и управление (Цифровая подстанция)

В соответствии с «Концепцией интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью», разработанной в 2011 году и концепцией «Цифровая подстанция», получившей в 2018 году статус национального проекта, требуется создание технологической, нормативной и производственной базы. Её целью является массовое внедрение в энергетическую отрасль инновационного высокоэффективного продукта – необслуживаемых модульных самодиагностируемых электрических подстанций и станций («цифровых подстанций»), в том числе, с применением централизованных, децентрализованных и гибридных принципов построения систем защиты и автоматики.

В основе проекта «Цифровая подстанция» (ЦПС) лежит управление и информационный обмен между элементами по открытому объектно-ориентированному стандарту МЭК 61850. Архитектура комплекса ЦПС подразумевает наличие устройств, реализующих функции измерения, аналого-цифрового преобразования и формирования потоков SV, обмен сообщениями по МЭК 61850 по шине процесса, учет электроэнергии, релейную защиту и автоматику (РЗА), сигнализацию, регистрацию, управление выключателями. К этим устройствам относятся устройства уровня присоединения (контроллеры присоединения). Функции централизованной РЗА и управления ЦПС, а также связь с контроллерами нижнего и верхнего уровней осуществляется устройствами (контроллерами) среднего уровня.

Российские производители устройств релейной защиты и автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) в настоящее время используют исключительно импортные компоненты, доля которых составляет не менее 56%. С учетом дальнейшего развития цифровых подстанций и интеллектуализации электрических сетей в России, разработка технических решений для контроллеров присоединения и контроллеров среднего уровня цифровой подстанции на отечественной элементной базе с применением МЭК 61850 является актуальной задачей, способствующей повышению информационной безопасности энергетических объектов и снижению затрат на последующее сопровождение программного обеспечения.

III. Перспективные решения в области защиты и управления энергосистем

Централизованная защита участка электрической сети

Стремительное развитие коммуникационных технологий позволяет реализовать широкомасштабный обмен информацией. В связи с этим возникло понятие централизованной защиты участка электрической сети – ЦЗУ, *Wide area protection (WAP)*. Основой такой системы стал вариант защиты на переходных процессах, предложенный в 1996 году [3], в котором синхронизация во времени с помощью *GPS* сыграла главную роль [4]. Централизованная защита участка сети с применением новых алгоритмов реализуется на основе измерений от несколько информационных точек, способна обеспечить быстрое, надежное и точное обнаружение повреждений. ЦЗУ широко обсуждаемая тема исследований с большим числом опубликованных результатов в последние годы.

Интегрированная защита

С развитием цифровых технологий все больше и больше функций реализуется внутри одного терминала защиты (линий, трансформаторов, генераторов и т.д.) для достижения определенной степени интеграции. Например, цифровая релейная защита линий электропередачи (ЛЭП) может иметь дистанционную или дифференциальную токовую защиту в качестве основной, направленную или ступенчатую токовую защиту в качестве резервной. Последние разработки в микропроцессорных элементах и коммуникационных технологиях открыли новые возможности для релейной защиты [3]. В отличие от централизованной защиты участка сети (централизованной защиты цифровой подстанции), интегрированное решение не просто объединяет аппаратную и программную часть защитных реле, но и основывается на разработке новых алгоритмов с учетом множественных измерений (избыточности) и позволяет улучшить характеристики защиты [5].

Управление участками электрической сети

Внедрение цифровых синхронных измерений в различных точках электрической сети значительно расширит зону управления, осуществляемого на цифровых подстанциях. Такие измерения содержат информацию о комплексах токов и напряжений, синхронизированных с высокой точностью с помощью *GPS*. На их основе могут быть построены системы мониторинга электрической сети, а также различные программные приложения для повышения наблюдаемости и надежности, включающие в себя: усовершенствованную оценку состояния [6], динамические модели онлайн оценки режима [7], управление перегрузками, оценку стабильности [5], обнаружения и компенсации межсистемных колебаний [3]. Также проводились исследования в области интегрирования функций защиты и управления [4, 8].

IV. Концепция интегрированной защиты и управления

Исходя из рассмотренных множественных измерений, была предложена концепция интегрированной защиты и управления (ИЗУ). Концепция [4] состоит в интеграции функций защиты и управления, в частности на региональном уровне, направленных на предоставление ряда преимуществ для будущей системы. Она предполагает объединение возможностей трех иерархических уровней для предотвращения каскадного отключения электрической сети на большой территории.

Для реализации системы управления разработана специальная синхронизированная быстродействующая система коммуникаций. Ключевым элементом в системе интегрированной защиты и управления является информационная платформа, которая получает синхронизированные данные в реальном масштабе времени от сети связи. Информационная платформа также поддерживает приложения специально разработанной облачной вычислительной системы для реализации ряда дополнительных функций на уровне цифровых подстанций и сетей электроснабжения. Предлагаемая в [9] региональная система защиты и управления представлена на рис. 2. Быстрые и глубокие изменения в системах передачи и распределения электрической энергии, появление нового оборудования, например, управляемых линий электропередачи переменного тока, систем хранения электроэнергии, возобновляемых источников и др. привели к существенному изменению характеристик и усложнению алгоритмов управления системами электроснабжения. Следовательно, существующие системы защиты и управления не могут эффективно реализовать заданные им функции.

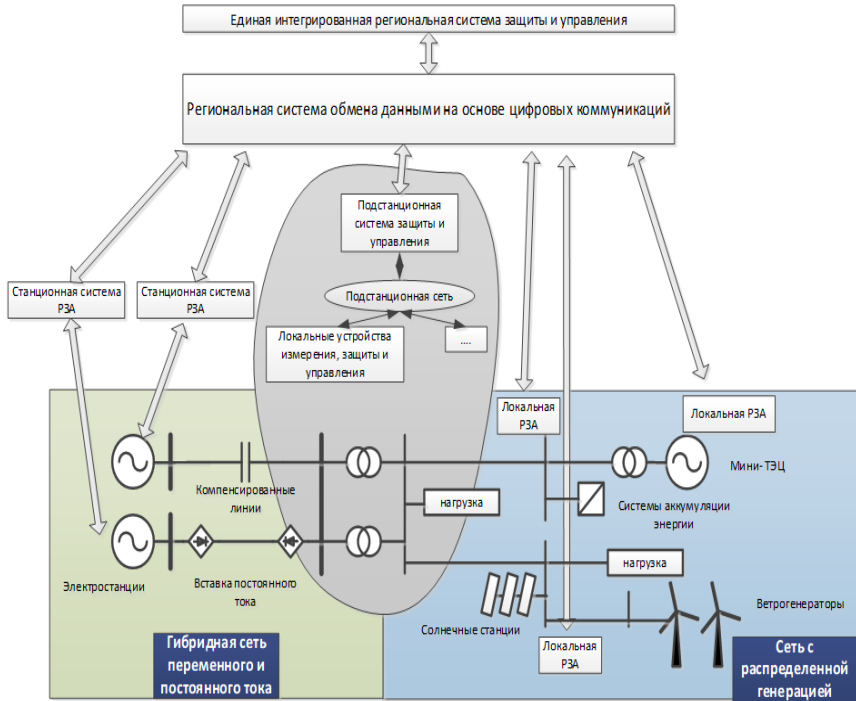


Рис. 2. Архитектура интегрированной системы защиты и управления

Как показано на рис. 2, система ИЗУ состоит из различного оборудования и разделена на группы. Основными частями системы являются высокоскоростная сеть коммуникаций, а также информационная система синхронизации в реальном масштабе времени. В перспективе функции ИЗУ расширяются для достижения интеграции диспетчерско-технологического управления с релейной защитой и SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) – системами на региональном уровне. На локальном уровне предполагается интеграция функций различных устройств. Это относится к следующему оборудованию цифровых подстанций: устройства сопряжения, интеллектуальные терминалы, устройства метрологических измерений, устройства синхронных векторных измерений (СВИ) и релейная защита присоединения. Оборудование отвечает за выборки токов, напряжений и других данных в режиме реального времени и отправку информации на уровень шины подстанции в систему защиты и управления ИЗУ. Такое оборудование позволит интегрировать цепи первичного силового оборудования и

добиться высокой интеграции на уровне присоединения. На уровне цифровой подстанции интегрируются функции защиты линий, шин, трансформаторов (автотрансформаторов), автоматики управления выключателем, реклоузеров, автоматических оперативных переключений, определения места повреждения, автоматики регулирования напряжения и других функций управления подстанции. Используется информация и специальное программное обеспечение для резервирования, автоматического управления доступом на подстанцию и др.

На верхнем уровне ИЗУ интеграция функций релейной защиты и управления приводит к повышению быстродействия защиты. Кроме того, интегрируются функции определения места повреждения, автоматики регулирования напряжения, контроля напряжения и частоты, обнаружения качаний в энергосистеме и др. В отличие от обычной защиты и управления, разделенных как при проектировании, так и эксплуатации, ИЗУ представляет собой оптимальную комбинированную систему, которая реализует функции на региональном уровне.

V. Применение облачных технологий

Основываясь на рассмотренной ранее информационной платформе, распределенная система с применением облачных технологий предназначена для реализации на региональном уровне таких функций цифровой подстанции, как определение места повреждения, определение поврежденного участка ЛЭП, контроль качества электрической энергии, согласование уставок защит и др. Расширенные функции также включают: контроль состояния первичного оборудования, управление техническим обслуживанием и ремонтом и другие эксплуатационные задачи (рис. 3).

В настоящее время множество вторичного оборудования различных производителей устанавливается на каждой подстанции. Применение облачных технологий значительно сократит инвестиции в оборудование общей телекоммуникационной системы. Облако на подстанционном уровне получает данные с уровня процесса, а региональное облако получает данные из информационной платформы.

На верхнем уровне реализуются статические и динамические измерения, оценка состояния выключателей, извлечение информации для специальных алгоритмов вычислительных средств и др. Применение облачных технологий позволяет уменьшить нагрузку на каналы связи, обеспечить компактность хранения данных, применить стандартное общедоступное программное обеспечение и получить другие преимущества.

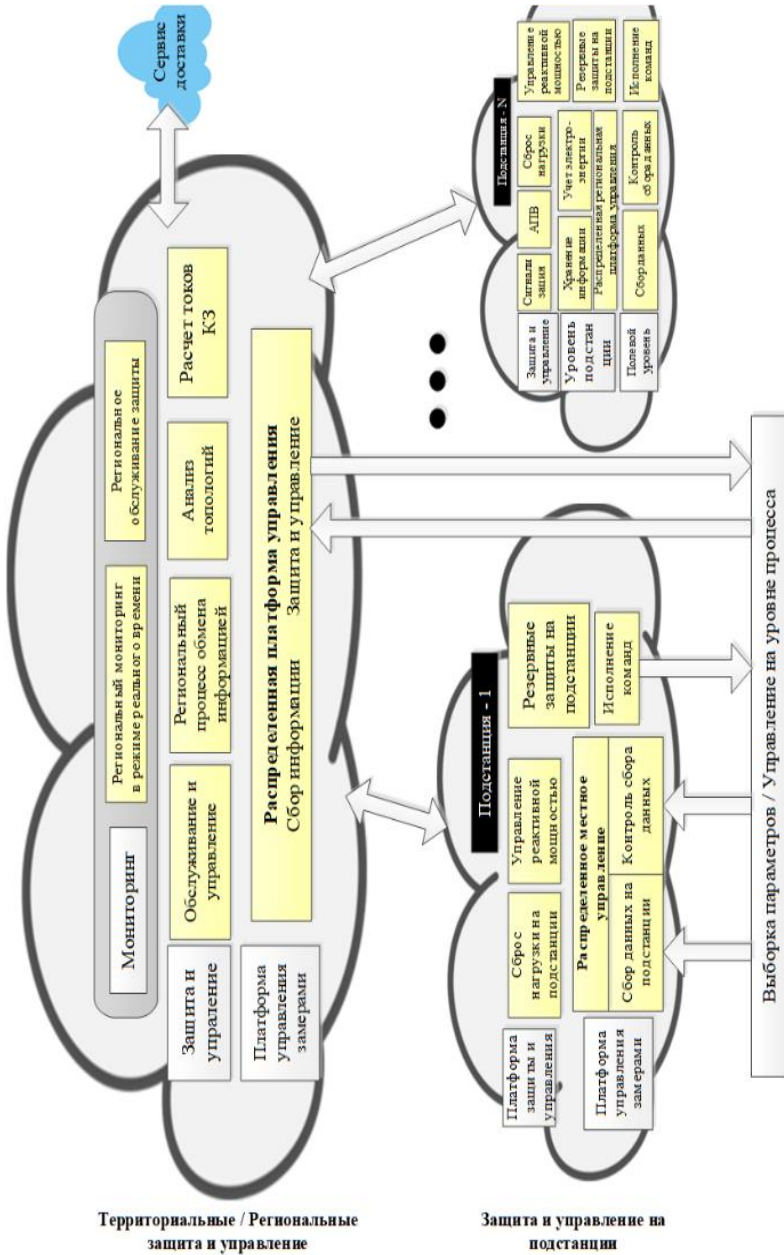


Рис. 3. Принципы применения облачных технологий

Создание базового комплекта программно-аппаратного комплекса цифровой подстанции (ПАК ЦПС) в составе устройств уровня присоединения и среднего уровня, аппаратная и программная части которого выполнены на отечественной базе и масштабируются под конкретный энергетический объект, объединяя в единую интегрированную архитектуру подстанции цифровые устройства автоматики, защиты и управления, учета и АСУ ТП, представлено на рис. 4.

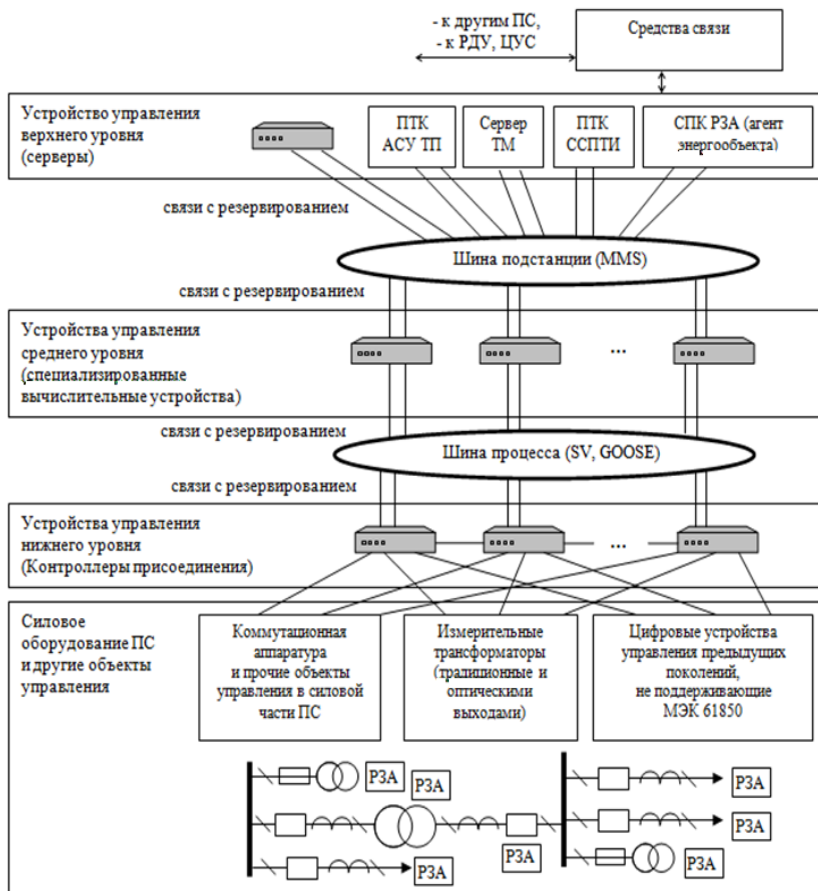


Рис. 4. Структура программно-технического комплекса цифровой подстанции с применением МЭК 61850

*Функционал устройств уровня присоединения
(контроллеров присоединения)*

1. Обеспечение анализа, диагностики, преобразования сигналов от оборудования цифровой подстанции (трансформаторы тока и напряжения, средства релейной защиты, измерительные приборы, приборы учета электрической энергии) для передачи в системы управления верхнего уровня и диспетчерские центры.

2. Интегрирование в одном устройстве функций измерения, защиты и управления уровня присоединения.

3. Подключение к шине процесса, согласно стандарту МЭК 61850.4. Использование отечественной элементной базы, в том числе в части центрального процессора (ЦП), и отечественного прикладного программного обеспечения, включая средства параметрирования.

5. Поддержка программного обеспечения контроллеров присоединения АСУ ТП цифровой подстанции стандарта МЭК 61850 (реализация полной поддержки протоколов *MMS, GOOSE, SV*).

6. Резервируемость, промышленного исполнения. Дублированные модули цифрового обмена (*Industrial Ethernet*) в соответствии с требованиями стандарта *ISO Ethernet IEEE 802/3*, с поддержкой *RSTP* и технологии резервирования *PRP*. Наличие двух источников питания.

Контроллеры присоединений должны иметь собственные средства диагностики с записью сигналов диагностики и событий во внутренний буфер событий и передачей их для обработки на верхний уровень АСУ ТП. Контроллеры должны иметь синхронизацию и выполнять передачу сигналов по цифровым каналам связи с использованием протоколов, обеспечивающих передачу данных с метками времени.

Модули аналоговых входов контроллера присоединения должны осуществлять измерения с присвоением метки времени, оценку достоверности и обработку аналоговых сигналов. В ходе первичной обработки информации они должны выполнять (в общем случае):

- масштабирование (вычисление реальных значений физических величин в именованных единицах с учётом коэффициентов трансформации трансформаторов тока и напряжения и т. д.);
- вычисление расчётных величин (линейные напряжения по фазным, $3U_0$ и $3I_0$, вычисление активной и реактивной мощности, $\cos\phi$ и т. д.).

Помимо самодиагностики микропроцессорных устройств, при первичной обработке информации в общем случае должна производиться проверка достоверности входных аналоговых сигналов. С этой целью могут использоваться различные алгоритмы проверки и обеспечения достоверности: проверка нахождения сигнала в допустимом диапазоне, общая проверка (по дублирующему сигналу, программная проверка математиче-

ски связанных параметров – при наличии такой возможности). Для исключения из обработки малозначительных изменений аналоговых сигналов необходимо осуществлять:

- контроль выхода параметра за заданные пределы (апертуру), устанавливаемые вокруг последнего зафиксированного значения сигнала;
- поочередную обработку значений сигналов, нарушивших апертуру.

Функционал устройств (контроллеров) среднего уровня

Для подстанций (ПС) 220-750 кВ с обслуживающим персоналом контроллер среднего уровня выполняет функции резервирования РЗА, противоаварийной автоматики (резервирование контроллеров присоединения), хранения (архивирование) данных по режиму работы и аварийных событий (осциллографирование). Для ПС 6-110 кВ без обслуживающего персонала с небольшим количеством присоединений контроллер среднего уровня выполняет функции передачи информации по телемеханике, по учету электрической энергии, реализовывает функцию дистанционного оперативного управления. Является масштабированным решением для удаленного автоматизированного рабочего места (АРМ). Концепция и принцип построения ПАК ЦПС таковы, что используют модульный принцип изготовления на микропроцессорной элементной базе.

Состав устройств нижнего и среднего уровней имеет стандартные заменяемые компоненты, выполненные с высокой заводской готовностью и изготовленные с соблюдением необходимых ГОСТов и нормативов. Модульная архитектура из стандартных сертифицированных промышленно производимых компонентов АСУ ТП дает независимость от элементной базы. Это позволяет минимизировать затраты на производство, исключив изготовление отдельных компонентов и организовав только сборочное производство. Таким образом, производство не потребует в большом количестве привлечения квалифицированной, дорогостоящей рабочей силы и энергозатрат. Функционал и алгоритмы устройств нижнего уровня и устройств среднего уровня реализуются программным способом в средствах вычислительной техники в соответствии с МЭК 61850.

VI. Гибкие системы передачи переменного тока

Гибкие системы передачи переменного тока (*Flexible AC Transmission Systems – FACTS*) включают элементы силовой электроники и предназначены для увеличения устойчивости и пропускной способности систем электропередачи [10]. Конструктивную основу *FACTS* составляют четыре типа контроллеров (регуляторов):

- последовательные контроллеры (регуляторы): осуществляют регулирование уровнями напряжения или реактивной мощностью ЛЭП; например, последовательный статический синхронный компенсатор;

- шунтирующие контроллеры (регуляторы): осуществляют регулирование в точке присоединения; например, статический синхронный компенсатор и статический регулируемый компенсатор;
- смешанные последовательно-параллельные контроллеры (регуляторы): используются в системах передачи с множеством ЛЭП, реализуют независимую компенсацию реактивной мощности для каждой линии, а также передачу активной между линиями; например, межлинейный регулятор потока мощности;
- смешанные последовательно-шунтирующие контроллеры (регуляторы): представляют собой комбинацию последовательных и шунтирующих регуляторов; например, унифицированный регулятор потока мощности.

С момента разработки устройств FACTS на протяжении более двух десятилетий проходила их успешная эксплуатация на нескольких подстанциях по всему миру. Несмотря на относительно высокую стоимость, такие устройства обеспечивают важные преимущества для энергосистем:

- регулирование потоков мощности для обеспечения оптимальной нагрузки энергосистем;
- увеличение нагрузочной способности ЛЭП вплоть до их тепловых пределов;
- увеличение системной устойчивости и надежности, ограничение токов короткого замыкания, управление каскадными отключениями и устранение низкочастотных колебаний в энергосистеме;
- увеличение пропускной способности ЛЭП с одновременным уменьшением реактивной мощности.

FACTS-технологии увеличивают передаваемую мощность и пропускную способность линий электропередачи за счет управления параметрами линий. Совершенствование силовой полупроводниковой базы и снижение стоимости *FACTS*-контроллеров открывает возможность широкомасштабного их применения. Предполагается, что эти технологии будут широко использоваться в будущем.

В НГТУ разработан экспериментальный образец универсального преобразователя напряжения для подключения разнородных источников электроэнергии (работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 гг.» по теме «Разработка технических решений для создания энергоэффективной системы электроснабжения автономного потребителя на основе комбинированного использования возобновляемых источников энергии и устройств оптимального управления») (ГК №14.516.11.0006 от 15.03.2013).

Универсальный преобразователь параметров напряжения (УПН) обеспечивает подключение к входным цепям как источников переменного, так и источников постоянного напряжения, формируя при этом на выходе трехфазное напряжение 380 В частотой 50 Гц, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 32144-2013.

В качестве основного базового элемента универсального преобразователя выбран модифицированный трехфазный инвертор напряжения, обеспечивающий работу в режимах активного выпрямителя и инвертора напряжения (AC/DC ; DC/AC). Общая структура преобразователя строится по принципу двойного преобразования с промежуточным звеном постоянного тока (емкостной накопитель). Схема модифицированного инвертора обеспечивает заряд емкостного накопителя в режимах активного выпрямителя переменного напряжения или конвертера постоянного напряжения в зависимости от типов основного и резервного источников энергии. Базовая схема инвертора работает в штатном режиме, обеспечивая гарантированное питание потребителей стабилизированным напряжением ($ACDC/DC/AC$).

VII. Твердотельный трансформатор

Твердотельный трансформатор (*Solid State Transformer – SST*) выполняет такую же функцию повышения или понижения уровней напряжения, как и обычный трансформатор с железным сердечником. Однако, новый образец имеет ряд преимуществ и устраняет некоторые проблемы существующих аналогов. Высокочастотный преобразователь и трансформатор (рис. 5) составляют сердце твердотельного трансформатора, который выполняется с применением материалов на основе карбида кремния (*Silicon Carbide – SiC*). Главные преимущества твердотельного трансформатора – меньшие размеры и вес.

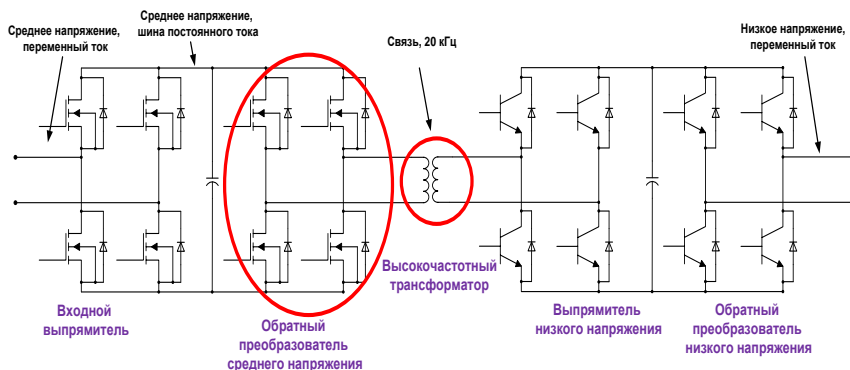


Рис. 5. Схемное решение модуля твердотельного трансформатора

На рис. 6 показаны схемы для обычного и твердотельного трансформаторов в приложении к ЦПС. Поскольку в твердотельном трансформаторе используются полупроводниковые ключевые элементы, при их закрывании переменный ток не будет протекать через высокочастотный трансформатор.

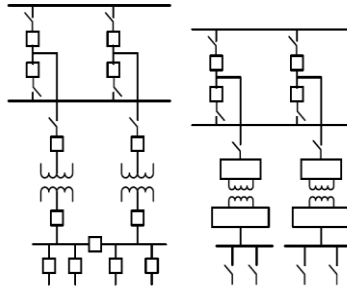


Рис. 6. Структурные схемы для обычного и твердотельного трансформаторов

Таким образом, высокочастотные преобразователь и трансформатор могут функционировать как автоматический выключатель. Площадь подстанции существенно уменьшается благодаря меньшему размеру твердотельного трансформатора (до 75%) и отсутствию автоматических выключателей. Важнейшим фактором, ограничивающим применение твердотельных трансформаторов, является высокая стоимость, в 20 раз превышающая обычный уровень.

© Лоскутов А.Б., 2018

Библиографический список

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2018 г. № 830-р, Москва. – 17 с.
- [2] Княгинина В.Н., Холкина Д.В. Цифровой переход в электроэнергетике России. Экспертно-аналитический доклад. М.: Центр стратегических разработок, 2017. – 47 с.
- [3] Bo Z.Q., Zhang B.H., Dong X.Z., Zhang B.H., He J.H. The development of protection intellection and smart relay network // Power System Protection and Control. 2013. № 41 (2). С. 1-12.
- [4] Guo Y., Wu W.C., Zhang B.M. A distributed state estimation method for power systems incorporated with linear and nonlinear models // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. № 64. С. 608-616.

- [5] Bo Z.Q., Wang L., Zhou F., Luo K., Han M., Yin W., Liu J.Y. Substation cloud computing for secondary auxiliary equipment // 2014 International Conference on Power System Technology. Октябрь 20-22, 2014, Чэнду, Китай.
- [6] Bo Z.Q., He J.H., Dong X.Z. Integrated protection of power network // Relay. 2005. № 33. С. 33-41.
- [7] Gao H.L., Liu Y.Q., Su J.J. New type of substation – area backup protection for intelligent substation // China Smart Grid Seminar, 2012.
- [8] Chen R.Z., Wu W.C., Sun H.B., Zhang B.M. A two-level online parameter identification approach // IEEE Power & Energy Society General Meeting. Июль 21-25, 2013, Ванкувер, Канада.
- [9] Bo Z.Q., Wang Q.P., Wang L., Zhou F.Q., Ge S.M., Zhang B.M. Architecture design for integrated wide area protection and control systems // 7th Asia – Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2015). Апрель 12-14, 2015, Пекин, Китай.
- [10] Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А., Кечкин А.Ю. Исследование статической устойчивости электротехнических комплексов виртуальных электростанций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. №2 (54). С. 121-129.

A.B. Loskutov

**SOLVING PROBLEMS IN TRANSITION
OF ELECTRICAL INDUSTRY
TO DIGITAL TECHNOLOGIES**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. The article is devoted to the implementation of the measures plan for the transition of the domestic electric power industry to digital technologies. General characteristic of the transition directions to digital technologies are given. In each of the directions identified problems and barriers that impede the development and implementation of new technologies. The need to search for compact, ecological, energy efficient solutions, corresponding to the concept of modern cities, was noted. As a basis for development a digital substation, relay protection is identified as the most advanced in the field of digitalization. The current task is the development of technical solutions for connection controllers and medium-level controllers of the digital substation on the domestic element base with the use of IEC 61850. A short description of the perspective solutions in the field of protection and control of power systems is given and the concept of integrated protection and control is given. The relevance of the development and implementation of cloud technologies in the power industry is noted. Flexible AC transmission systems, designed to increase the stability and throughput of systems, are considered. In conclusion, the description of the idea of a solid state transformer, which has advantages in comparison with existing power transformers, is given.

Keywords: cloud technologies, digital technologies, digital substation, flexible AC transmission systems, intelligent electric network, relay protection, solid state transformer, universal voltage converter.

References

- [1] Ordinance of the Russian Federation Government of 28 April 2018 no. 830–p, Moscow.
- [2] V.N. Knyaginina and D.V. Kholkina. Digital transition in the power industry of Russia. Center for Strategic Research, Moscow, Expert-analytical report, 2017.
- [3] Z.Q. Bo, B.H. Zhang, X.Z. Dong, B.H. Zhang and J.H. He. The development of protection intellectualization and smart relay network // *Power System Protection and Control*, no. 41 (2), pp. 1-12, 2013.
- [4] Y. Guo, W.C. Wu and B.M. Zhang. A distributed state estimation method for power systems incorporated with linear and nonlinear models // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 608-616, Jan. 2015.
- [5] Z.Q. Bo, L. Wang, F. Zhou, K. Luo, M. Han, W. Yin and J.Y. Liu. Substation cloud computing for secondary auxiliary equipment // In proc. 2014 International Conference on Power System Technology, Oct. 20-22, 2014, Chengdu, China.
- [6] Z.Q. Bo, J.H. He and X.Z. Dong. Integrated protection of power network. *Relay*, no. 33, pp. 33-41, 2005.
- [7] H.L. Gao, Y.Q. Liu and J.J. Su. New type of substation – area backup protection for intelligent substation. in proc. China Smart Grid Seminar, 2012.
- [8] R.Z. Chen, W.C. Wu, H.B. Sun and B.M. Zhang. A two-level online parameter identification approach // in proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, Canada.
- [9] Z.Q. Bo, Q.P. Wang, L. Wang, F.Q. Zhou, S.M. Ge and B.M. Zhang. Architecture design for integrated wide area protection and control systems // in proc. 7th Asia – Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2015), Apr. 12-14, 2015, Beijing, China.
- [10] E. Sosnina, A. Shalukho, I. Lipuzhin and A. Kechkin. Static stability investigation of virtual power plants electrotechnical complexes // *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, vol. 2, pp. 121-129, 2017.