

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Минцаев Магомед Шамалович

Должность: Ректор

Дата подписания: 23.11.2023 14:58:02

Уникальный программный ключ:

236bcc35c296f119d6aafdc083dd11b7a0cc51901b8b5a02599a404c

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**

ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

М.Г. Баширов, Э.М. Баширова, И.Г. Юсупова

**Интеллектуальные средства и системы управления и защиты
электрических сетей**

Учебное пособие

Уфа

Издательство УГНТУ

2021

УДК 621.311
ББК 31.27
Б33

Рецензенты:

Главный энергетик ООО «Акрил Салават» *А.С. Кузнецов*

Заместитель технического директора по автоматизации и электроснабжению
ООО «Салаватнефтехимпроект» *С.А. Шейн*

Баширов, М.Г.

Б33 Интеллектуальные средства и системы управления и защиты электрических сетей: учеб. пособие / М.Г. Баширов, Э.М. Баширова, И.Г. Юсупова. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. – 64 с.
ISBN

В учебном пособии рассмотрены современное состояние и проблемы электроэнергетики в мире, современное состояние, проблемы и тенденции развития электроэнергетики России, цифровые подстанции и оборудование интеллектуальной электроэнергетической системы, устройства регулирования параметров сети, линии электропередачи нового поколения, интеллектуальные средства и системы контроля, диагностики, управления и защиты электрических сетей.

Учебное пособие предназначено для использования обучающимися по магистерской программе «Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем» направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» при изучении дисциплин «Современные проблемы развития науки, техники и технологии (в электро- и теплоэнергетике)», «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения», «Интеллектуальные системы управления, защиты и автоматики электрических сетей», «Активно-адаптивные электрические сети», «Цифровые технологии в электроэнергетике». Может быть полезно специалистам, проектирующим и эксплуатирующим системы электроснабжения.

УДК 621.311
ББК 31.27

ISBN

© ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет, 2021
© Баширов М.Г., Баширова Э.М.,
Юсупова И.Г., 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Современное состояние и тенденции развития мировой и российской электроэнергетики	5
2. Цифровая трансформация электроэнергетики России	16
3. Интеллектуальная электроэнергетическая система	21
3.1. Интеллектуальная энергосистема как новый этап развития электроэнергетики.....	21
3.2. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью.....	27
3.3. Проблемы управления и безопасности в интеллектуальных электроэнергетических системах.....	30
4. Цифровые подстанции	33
4.1 Понятие цифровой подстанции.....	33
4.2 Функциональная структурная схема цифровой подстанции.....	34
5 Оборудование интеллектуальной электроэнергетической системы	38
5.1 Интеллектуальное силовое электрооборудование.....	38
5.2 Устройства регулирования параметров сети.....	44
5.3 Линии электропередачи нового поколения.....	48
6 Интеллектуальные средства и системы контроля, диагностики, управления и защиты электрических сетей	53
6.1 Мониторинг и диагностика воздушных линий электропередачи.....	53
6.2 Мониторинг и диагностика силовых трансформаторов.....	54
6.3 Мониторинг и диагностика выключателей и КРУЭ.....	55
6.4 Управление режимами ЭЭС.....	56
6.5 Релейная защита и автоматика.....	59
Заключение	63
Список использованных источников	64

Введение

ЕЭС России, созданная более 60 лет назад, является уникальным организационно-техническим объектом. В последние десятилетия приходится констатировать неудовлетворительное состояние технологического потенциала российской электроэнергетики. Для решения существующих проблем необходим переход на новый качественный уровень технического оснащения и управления электроэнергетической системой страны (ЭЭС) по аналогии с бурно развивающейся в передовых странах мира технологией Smart Grid («интеллектуальная сеть»). Концепцией развития электроэнергетической системы России, разработанной в 2010 году ОАО «НТЦ Электроэнергетики» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС», предусматривается создание новой технологической платформы ЕЭС России – интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС).

ИЭС ААС представляет собой ЭЭС нового поколения, которая должна обеспечить доступность использования ресурса, надежное, качественное и эффективное обслуживание потребителей электроэнергии за счет гибкого взаимодействия всех ее субъектов (всех видов генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной иерархической системы управления. Реализация ИЭС ААС без цифровизации электроэнергетики невозможна. Стратегической основой цифровизации энергетики являются следующие документы:

- Концепция «Цифровая трансформация 2030», утверждена Советом директоров ПАО «Россети» 21.12.2018;

- «Положение ПАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе», утверждена Советом директоров ПАО «Россети» 02.04.2021;

- «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», утверждена Правительством Российской Федерации 09.06.2020.

1 Современное состояние и тенденции развития мировой и российской электроэнергетики

Мировая энергетическая система вошла в новый этап фундаментальной трансформации. В целом этот комплекс изменений обычно называют «Энергетическим переходом» (Energy Transition). Под влиянием изменений в энергополитике и развития новых технологий мир вступает в этап 4-го энергетического перехода, к широкому использованию возобновляемых источников энергии и вытеснению ископаемых видов топлива [1].

Термин «энергетический переход» был предложен В. Смилом и используется «для описания изменения структуры первичного энергопотребления и постепенного перехода от существующей схемы энергообеспечения к новому состоянию энергетической системы». Текущий Энергопереход - это очередной, уже четвертый сдвиг в серии аналогичных фундаментальных структурных преобразований мирового энергетического сектора. С количественной точки зрения Энергопереход можно определить, как 10 % сокращение доли рынка определенного энергоресурса за 10 лет. Наиболее известно уже ставшее классическим разделение энергетических переходов, предложенное В. Смилом:

- первый энергетический переход происходил от биомассы к углю, в ходе него доля угля в общем объеме потребления первичной энергии с 1840 по 1900 гг. увеличилась с 5 % до 50 %. Уголь стал основным источником энергии индустриального мира;

- второй энергетический переход связан с распространением нефти – ее доля выросла с 3 % в 1915 г. до 45 % к 1975 г. Наиболее интенсивный период переключения с угля на нефть пришелся на годы после Второй мировой войны. Начался «век моторов» и доминирования нефти, который завершился в конце 1970-х гг. нефтяным кризисом;

- третий энергетический переход привел к широкому использованию природного газа (его доля выросла с 3 % в 1930 г. до 23 % в 2017 г.) за счет

частичного вытеснения как угля, так и нефти;

- в настоящее время мы являемся свидетелями начала четвертого энергетического перехода [1, 2].

В последнее десятилетие были достигнуты важные продвижения в коммерциализации широкого спектра нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) и технологий – ветровые электростанции, солнечные батареи, аккумуляторы электроэнергии и другие. Доля НВИЭ (без учета гидроэнергии) в общем объеме потребления первичной энергии в 2017 г. составила 3 %, но она стремительно растет. На этапе четвертого энергетического перехода основным драйвером становится не столько экономическая привлекательность новых источников энергии, сколько качественно новый фактор – декарбонизация и борьба с глобальным изменением климата.

Правительства всех стран стремятся найти оптимальный ответ сразу на три запроса со стороны общества к ТЭК:

- обеспечить доступность энергии в достаточных объемах и по приемлемым ценам;
- обеспечить надежность и безопасность энергоснабжения;
- обеспечить его экологичность (требование по минимизации антропогенного воздействия энергосистем на окружающую среду).

Научно-технический прогресс всегда был основной движущей силой развития антропогенной энергетики, обеспечивая приход технологических революций (например, изобретение двигателя внутреннего сгорания или освоение электрической энергии) и крупных технологических прорывов (из последних примеров - освоение ресурсов сланцевой нефти и газа). Начавшийся Энергопереход не связан с какой-либо одной технологической революцией – накопившаяся критическая масса из целого комплекса технологических инноваций как на стороне производства, так и на стороне потребления энергии ведет к постепенной глубокой трансформации всего энергетического сектора.

В ближайшей перспективе не ожидается новых технологических революций – таких, как освоение дешевого термоядерного синтеза. Однако при

этом предполагаются новые технологические прорывы на базе тех технологий, которые уже проходят апробацию в настоящее время: дальнейшее удешевление возобновляемых источников энергии (ВИЭ), накопителей электроэнергии, развитие цифровых и интеллектуальных систем в электроэнергетике и др., которые и обеспечат технологическую базу для Энергоперехода. С технологической точки зрения Энергопереход – глобальная трансформация энергосистем, состоящая из четырех элементов – энергоэффективности, декарбонизации, децентрализации и цифровизации. Эти процессы во многом дополняют и ускоряют друг друга. В совокупности эти технологические направления составят основу Энергоперехода, способствуя увеличению доли ВИЭ и вытеснению ископаемых видов топлива.

В последние десятилетия происходит ускоренная структурная перестройка энергопотребления – переход с прямого использования топлива на самый универсальный (или безальтернативный для многих процессов) и эффективный энергоноситель – электроэнергию, идет активная электрификация всех секторов потребления. С 1990 г. до настоящего времени уровень электрификации первичного энергопотребления в мире вырос с 31 % до 36 % и в перспективе этот тренд продолжится. В частности, в последние годы наблюдается активное развитие электромобильного транспорта – все мировые автоконцерны уже имеют электромобили в своих модельных линейках, а некоторые планируют полный переход на электропривод. Электрификация – это долгосрочный тренд во всех странах мира, означающий постепенный переход на более универсальный, удобный и эффективный энергоноситель во всех секторах потребления.

Радикальное удешевление и стремительное распространение технологий производства электроэнергии и тепла на солнечных, ветровых электростанциях, за счет использования биогаза и других нетрадиционных возобновляемых источников энергии – это ключевой элемент Энергоперехода. Современная трансформация энергетических рынков во многом обусловлена именно коммерчески эффективным развитием НВИЭ и повышением их КПД. В период

2000-2018 гг. мощности НВИЭ совокупно выросли в 21 раз с 56 ГВт в 2000 г. до 1179 ГВт в 2018 г. Доля НВИЭ в конечном мировом первичном энергопотреблении выросла более чем в три раза, а в выработке электроэнергии – с 3,4 % в 2006 г. до 10,5 % по итогам 2018 г. При этом на протяжении последних 15 лет реальные объемы вводов НВИЭ регулярно оказывались выше прогнозируемых. В перспективе ожидается дальнейшее снижение полных приведенных затрат на производство электроэнергии на базе различных технологий НВИЭ на 20-50 % в зависимости от типа и сценария (рис. 1.1) [1].



Рис. 1.1. Потребление первичной энергии по видам топлива в 2015 – 2040 гг. по сценариям: 1 – Консервативный; 2 – Инновационный; 3 - Энергопереход

В технологической сфере основные проблемы увеличения доли НВИЭ связаны с растущими сложностями интеграции в энергосистему больших объемов распределенных по сети источников, многие из которых имеют нерегулируемый режим работы (ветровые, солнечные установки). Увеличение на порядки возобновляемой генерации требует интенсивной перестройки магистральной и распределительной сетей, а также наличия значительного резерва тепловых мощностей либо накопителей, которые большую часть времени остаются недозагруженными. Таким образом, в настоящее время конфликт между новыми технологиями и прежней организацией энергосистемы демпфируется исключительно за счет экстенсивных мер — инвестирования в

сети и резервы мощностей. Однако, по мере роста мощностей НВИЭ, это становится все сложнее.

Важнейшим компонентом Энергоперехода, обеспечивающим более глубокую электрификацию и распространение НВИЭ, является развитие технологий накопления энергии и удешевление хранения электроэнергии (промышленные и распределенные накопители энергии, а также аккумуляторные батареи). Хранение является звеном-посредником между различными источниками и способами использования энергии. В настоящее время используются различные способы хранения электроэнергии – их можно разделить на пять групп: механические накопители, тепловые, химические, электрохимические и электрические. Сегодня наиболее распространенным способом промышленного хранения электроэнергии являются механические системы, в первую очередь – гидроаккумулирующие (ГАЭС). Они обеспечивают 99 % мировых мощностей по хранению (160,3 ГВт), однако все более активно начинают применяться альтернативные системы хранения энергии – в 2018 г. в мире было введено почти 2 ГВт ГАЭС и более 3 ГВт систем хранения энергии «альтернативных» технологий.

Водород является необходимым элементом для реализации обязательств государств, отдельных регионов и компаний по декарбонизации. Возобновляемые источники энергии могут снизить выбросы углерода в электроэнергетике, в то время как энергообеспечение зданий, транспортный сектор, промышленность во многом остаются «за бортом» декарбонизации – если не удастся найти новый универсальный энергоноситель. Водород как раз претендует на решение этой проблемы. Его также отличает относительное удобство долгосрочного масштабного хранения и транспортировки на любые расстояния, в том числе с использованием уже имеющейся инфраструктуры, связанной с природным газом. Фактически, водород может быть использован во всех секторах преобразования и потребления энергии.

Важное преимущество водорода в условиях Энергоперехода – возможность использования избыточной выработки ВИЭ для его производства

методом электролиза и последующего хранения водорода либо его использования в разнообразных процессах. Системный эффект водорода дополняется тем, что водородные технологии наукоемки, находятся в самом начале «кривой обучения», и у них еще большой потенциал к росту эффективности и снижению стоимости. Так, ожидается, что капитальная стоимость электролизеров сократится к 2030 г. в 1,5-4 раза в зависимости от технологии. Прогнозы международных экспертных организаций показывают потенциал роста доли водорода к 2050 г. до 12-19 % конечного потребления энергии в США, Великобритании и Евросоюзе соответственно. Это означает, что в долгосрочной перспективе роль водорода в мировой энергосистеме может оказаться сопоставима с ролью, которую сейчас играют газ или уголь. Общий объем производства водорода в мире в настоящее время оценивается в 55-65 млн т, причем среднегодовые темпы его роста за последние 20 лет были невысоки - около 1,6 % в год. Более 90 % водорода производят на месте его потребления (как так называемый кэптивный продукт), и менее 10 % поставляют специализированные компании, работающие на рынке промышленных газов. В качестве сырья для производства водорода сегодня доминируют углеводороды. Более 68 % водорода получают сейчас из природного газа, 16 % из нефти, 11 % - из угля и 5 % - из воды с помощью электролиза. Это объясняется сравнительной дешевизной производства водорода из углеводородов. Однако в последние годы набирает обороты производство водорода методом электролиза. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в течение последних семи лет в среднем в мире вводили в эксплуатацию около 10 МВт электролизеров ежегодно. В 2018 г. введено 20 МВт, а в 2020 г. уже 100 МВт. Инвестиции в электролизеры растут – совокупная мощность установок может почти утроиться в ближайшие 2-3 года, достигнув отметки в 150 МВт. В сфере транспорта: годовые продажи водородных электромобилей (FCEV) увеличились с 20 шт./год в 2013 г. до 11000 шт./год в 2018 г. В сфере энергетики - появились первые прототипы газовых турбин, работающих полностью на водороде (в 2018 г.

Kawasaki достигла 100 % доли водорода в топливе для газотурбинной ТЭЦ в Японии) [1, 2].

Цифровизация энергетики – часть глобального тренда, в рамках которого быстро развивающиеся цифровые технологии проникают во все сферы экономики. Для энергетики это создает новые возможности – ведь управлять энергосистемами с большой долей децентрализации или проникновения ВИЭ становится все сложнее. Цифровизация открывает новые возможности управления распределенной генерацией совместно с другими видами распределенных энергоресурсов. Автоматизация оборудования, возможность наблюдать за состоянием оборудования и управлять им посредством интернета вещей, распространение накопителей энергии и новых бизнес-моделей их использования постепенно превращает потребителей в активных полноправных участников энергосистемы. Все эти технологии обеспечивают повышение гибкости и адаптивности энергосистемы, сглаживание пиковой нагрузки, снижение потерь, расширение возможностей распределенной генерации и повышение приемлемой доли ВИЭ в энергобалансе, а главное - переход к новым принципам управления энергосистемами и организации рыночных операций на базе новых информационных технологий. Резкое повышение производительности компьютерных технологий, систем передачи, накопления и обработки информации, интегрированных в глобальную информационную сеть Интернет, «умных счетчиков» и т. д. в сочетании с технологиями искусственного интеллекта позволяет радикально улучшить управляемость всех элементов энергосистемы (вплоть до отдельных бытовых приборов) [3].

Интенсивное развитие распределенных центров генерации и активного потребления потребует изменения структуры и режимов работы распределительной, а с нарастанием объемов «новой энергетики» — и основной электрической сети. Ключевыми требованиями здесь становятся: гибкость и оперативность изменения режимов работы, расширение технических возможностей по адаптивности сети к изменению состава генерирующих источников и потребителей. Именно эти требования закладываются при

разработке национальных стратегий создания «умных сетей» (Smart Grid). Реализация этих стратегий на горизонте 2030–2035 гг. создаст новый тип инфраструктуры энергоснабжения, адекватный появляющейся новой энергетике и запросам активных потребителей (рис. 1.2) [1].



Рис. 2. Интеллектуальная электрическая сеть Smart Grid

Важнейшим драйвером «Энергоперехода» является децентрализация, заключающаяся в развитии распределенной энергетики. Новые решения в области производства и хранения электроэнергии с одновременным развитием умных сетей позволяют подключать к системе всё больше распределенных устройств, отдающих электроэнергию в сеть. Базовое свойство всех этих технологий – близость к потребителю энергии. К технологиям распределенной энергетики (распределенных энергоресурсов, Distributed Energy Resources, DER) в мировой практике традиционно относят:

- распределенную генерацию (Distributed Generation);
- управление спросом (Demand Response);
- управление энергоэффективностью;
- микрогриды (объединенные энергосистемы, состоящие из распределенных энергоресурсов и нескольких электрических нагрузок,

работающая как единый управляемый объект в параллель с существующей электрической сетью или в остров);

- распределенные системы хранения электроэнергии;
- электромобили.

Основное последствие развития распределенной энергетики - изменение структуры самого энергетического сектора: меняется соотношение централизованной и децентрализованной частей энергосистем (рис. 1.3) [1].



Рис. 1.3. Прогноз ввода новых мощностей централизованной и распределенной генерации электроэнергии в мире, ГВт

Благодаря развитию малой распределенной генерации началась «демократизация» электроэнергетики. До этого на протяжении многих десятилетий архитектура энергосистем оставалась в целом неизменной. Централизованные энергосистемы успешно, надежно, по разумной цене обеспечивали потребителей электроэнергией. Но в результате совершенствования технологий потребитель от ситуации детерминированного электроснабжения только от централизованной энергетики пришел к возможности выбора из широкого спектра альтернативных решений, которые позволяют использовать их в оптимальной пропорции, исходя из индивидуальных приоритетов стоимости, надежности и качества энергоснабжения. Появление множества новых небольших генераторов

усложнило процессы их интеграции в единую энергосистему, процессы управления и регулирования. Потребовались новые технологии гибкого построения сетей и интеллектуального управления ими, которые получили общее название Smart Grid [1, 2].

Потребитель электроэнергии начинает играть всё большую роль в энергосистеме, осваивая новые роли – генератора и накопителя электроэнергии. Резко увеличивается свобода потребительского выбора. В то же время открываются широкие возможности для управления спросом, энергоэффективностью как на уровне конкретного домохозяйства, так и на уровне экономики в целом.

Россия, несмотря на то, что производит всего лишь 3 % от мирового ВВП и имеет численность населения 2 % от мирового, является третьим по объему производителем и потребителем энергоресурсов в мире после Китая и США, обеспечивая 10 % мирового производства и 5 % мирового потребления энергоресурсов. Россия стабильно занимает 1-е место в мире по экспорту газа, 2-е место по экспорту нефти и 3-е место по экспорту угля. При объеме производства энергии порядка 1470 млн т н. э. Россия экспортирует более половины произведенной первичной энергии, обеспечивая 16 % мировой межрегиональной торговли энергией, что делает ее абсолютным мировым лидером по экспорту энергоресурсов. Объективные условия России обрекают ее на худшие показатели энергоэффективности по сравнению с другими странами: холодный климат, большие расстояния, а также гипертрофированная сырьевая структура при заметном технологическом отставании обуславливают высокую энергоемкость российского ВВП — в 1,5 раза выше среднемировой и американской и вдвое выше, чем у ведущих стран Европы. При этом анализ международной и российской отчетности показал возможность до двух раз уменьшить с 2015 по 2040 г. величину энергоемкости ВВП при оптимистической оценке возможностей использования в России энергоэффективных технологий и интенсификации мер энергосбережения. Опыт крупных стран (США за 15 лет снизили энергоемкость ВВП в 1,4 раза, а Китай за 10 лет — в 1,5 раза)

свидетельствует о реалистичности такого сценария. Анализ показывает возможность вдвое снизить к 2040 г. энергоемкость российского ВВП. Ключевыми факторами для этого являются удешевление кредитов и повышение цен на газ.

В России, как и во всем мире, идет опережающая электрификация экономики и потребление электроэнергии будет расти. Самые высокие темпы роста выработки покажут НВИЭ. С учетом огромных территорий с низкой плотностью населения при удешевлении заемного капитала в сценарных условиях Энергоперехода сможет активизироваться и развитие децентрализованной энергетики, в первую очередь распределенной когенерации. Это уменьшит требования к развитию распределительных сетей и росту централизованных генерирующих мощностей, обеспечит более полное их использование и сократит существующие диспропорции в стоимости генерации и сетей, замедляя рост стоимости электроэнергии для потребителей. Основной прирост генерирующих мощностей приходится на низкоуглеродную и газовую генерацию. Среди НВИЭ основной потенциал в России имеют солнечные и ветряные электростанции, а также ТЭС на биомассе и отходах. Заметный вклад могут внести и малые ГЭС [4].

2 Цифровая трансформация электроэнергетики России

Тенденции развития энергосистем в мире вынуждают их к «цифровому переходу» — принципиальной смене внутренней архитектуры и управления. В России растущая неэффективность электроэнергетики становится сдерживающим фактором для развития экономики. Цифровизация - актуальная тенденция для повышения эффективности работы отраслей, включая энергетическую. Частью цифровой экономики станет и цифровая электроэнергетика [3]. Цифровизация это новый формат управления работой электроэнергетических систем, обеспечивающий оптимизацию технологических и бизнес-процессов для достижения целевого состояния электроэнергетики. Вся система цифровизации основывается на принципах перехода на «умную» инфраструктуру, в рамках которой целесообразно проводить не только организационно-управленческие мероприятия, но и соответствующую технико-технологическую политику, основные направления которой должны содержать:

- создание и запуск модульных интерфейсов на основе цифровых технологий для организации кибербезопасности системы и сети в электроэнергетике и поддержания ее в устойчивом состоянии;
- разработку интеллектуальных систем, способных аккумулировать и управлять новыми организационно-экономическими и технологическими решениями;
- развитие систем накопления, аккумуляции и хранения электрической энергии в рамках существующих потребностей народного хозяйства;
- создание новых проектных решений в области внедрения силовой электроники;
- внедрение системы «Интернета вещей», которая заключается в цифровой передаче информации, внедрения цифровых датчиков и устройств, создание единой базы аккумуляции и передачи информации;
- развитие цифровых финансовых систем, включающих большие базы данных и ее обработку.

Формирование системы цифровизации электроэнергетического комплекса осуществляется на основе механизмов государственного регулирования и управления. Среди основных мер организационного, экономического, институционального и управленческого характера можно выделить:

- формирование стратегической программы перехода электроэнергетики на цифровую платформу;

- формирование альянса поставщиков технологий, государственных и региональных органов, ответственных за внедрение «цифры» в электроэнергетический комплекс, предприятий электроэнергетики, крупных потребителей электроэнергии;

- создание условий перехода на цифровые технологии в электроэнергетике и формирование условий свободных потоков электрической энергии - ликвидацию перекрестного субсидирования в электроэнергетике и поиск новых механизмов повышения технико-технологической устойчивости, сокращения изношенных и неэффективных мощностей, увеличение введенных мощностей с использованием инновационных технологий и переход на возобновляемые источники энергии;

- стимулирование внедрения инновационных проектов на функционирующих энергетических объектах;

- разработку программы импортозамещения иностранного оборудования отечественными технологиями.

В рамках цифровизации электроэнергетической отрасли главной целью является своевременный обмен данными между потребителями, посредниками и производителями электрической энергии. Следующим условием перехода электроэнергетического комплекса на цифровые технологии является развитие «Интернета энергии», который заключается в формировании системы из конечных устройств потребителей с управляемым энергопотреблением, а также распределенная генерация и системы хранения энергии, находящиеся на стороне потребителей и в распределительных сетях низкого и среднего напряжения в непосредственной близости от потребителей. Активные потребители являются

субъектами нового типа, так как они могут осуществлять потребление, производство и хранение электроэнергии. Объединение управляемых энергообъектов и активных потребителей в системы различного масштаба позволяет оптимальным образом планировать развитие собственных мощностей для обеспечения требуемых характеристик доступности, надежности, качества, а также осуществлять экономически оптимальное их использование в сочетании с потреблением электроэнергии из существующей энергосистемы [4, 5].

Для достижения системного эффекта от цифровизации необходимо объединить усилия всех сторон — государства, компаний, инновационного сообщества, науки. Основанием для разработки ведомственного проекта «Цифровая энергетика» являются документы стратегического планирования:

1 Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»:

- Преобразование приоритетных отраслей экономики, включая энергетическую инфраструктуру, посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений (пп. «б» п. 11);

- Гарантированное обеспечение доступной электроэнергией, в том числе за счет внедрения интеллектуальных систем управления электросетевым хозяйством на базе цифровых технологий (пп. «в» п. 15);

2 Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р;

3 «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации», в редакции Указа Президента Российской Федерации от 15.03.2021 г. № 143.

Для разработки и развития цифровых сервисов и решений в отраслях ТЭК созданы ниже перечисленные условия.

1. Создание системы координации цифровой трансформации:

- разработана концептуальная основа цифровой трансформации ТЭК России;

- создан Совет по цифровой трансформации ТЭК;
- создан проектный офис по реализации ведомственного проекта;
- созданы центры компетенций по основным направлениям цифровизации.

2. Формирование условий для создания и развития единой информационной среды:

- сформированы требования к разработке платформенных решений в единой информационной среде;

- разработана модель единой информационной среды энергетики;

- создан центр ведения, хранения и развития единых национальных отраслевых стандартов, онтологий, регистров и систем классификации и идентификации;

- подготовлен перечень необходимых изменений в действующее законодательство и новых нормативно-правовых документов, нормативно-технических документов и национальных стандартов.

3. Обеспечение подготовки высококвалифицированных кадров для цифровой энергетики:

- разработаны отраслевые образовательные программы и программы переподготовки кадров для цифровой энергетики;

- создано и функционирует не менее 5 отраслевых образовательных центров на базе высших учебных заведений.

4. Цифровое государственное управление и контрольно-надзорная деятельность:

- предоставление государственных услуг и выполнение контрольно-надзорных функций Минэнерго России производится в соответствии с технологическими и нормативными требованиями законодательства;

- государственные системы по сбору информации о деятельности объектов ТЭК России интегрированы в Национальную систему управления данными.

Министерство энергетики Российской Федерации 28.02.2019 г. приняло решение о создании Ассоциации «Цифровая энергетика» как центра координации компетенций ведомственного проекта «Цифровая энергетика» в

сфере электроэнергетики по следующим направлениям: общая стратегия, кибербезопасность, импортозамещение, производительность и безопасность труда, защита интересов и сопровождение, кадры для цифровой энергетики, популяризация.

Центральной идеей Энергетической стратегия РФ ЭС-2030 является переход от ресурсно-сырьевого к ресурсно-инновационному развитию ТЭК, для этого необходимо решить четыре стратегические задачи развития в рамках цифровой трансформации электроэнергетики РФ:

- повысить эффективность затрат и эффективность текущих активов;
- инвестировать в новые классы активов;
- развивать новые направления услуг;
- наращивать цифровой технологический потенциал.

Целевое состояние электроэнергетики к 2030 году - на заданный период ожидается плавная трансформация электроэнергетического сектора в сторону большей либерализации и диверсификации рынка с одновременным сохранением централизованной системы управления и традиционных источников в энергетическом балансе:

- высококонкурентный рынок сбыта, у потребителей есть большой выбор поставщиков;
- фокус на развитие новых услуг в электроэнергетике;
- большое число различных инновационных бизнес-моделей;
- постепенное снижение уровня тарифного регулирования.

Распоряжением правительства Российской Федерации от 09.06.2020 г. № 1523-р утверждена «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», в которой актуализируется важность цифровизации топливно-энергетического комплекса, необходимость обеспечения ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере, в том числе в рамках плана мероприятий («дорожной карты») Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет».

3 Интеллектуальная электроэнергетическая система

3.1 Интеллектуальная энергосистема как новый этап развития электроэнергетики

В начале XXI века мировая электроэнергетика в целом столкнулась с целым набором новых вызовов, требующих комплексного, системного ответа, который сформировал бы новый вектор ее развития как важнейшей инфраструктуры экономики. Масштабная интеграция новых технологий сопровождается проявлением новых эффектов в электроэнергетических системах (ЭЭС), из которых ключевыми являются изменчивость режимов производства электроэнергии и появление двунаправленных потоков мощности, требующих все большей гибкости при балансировании ЭЭС. С другой стороны, интенсивное реформирование хозяйственной структуры в электроэнергетике, развитие конкурентной среды на оптовом и розничном рынке вместе с растущей дифференциацией потребительских требований по надежности, качеству и стоимости энергоснабжения, появление альтернативных рыночных и технологических возможностей для удовлетворения спроса, делают краткосрочные коммерческие факторы все более значимыми для управления функционированием и развитием ЭЭС, меняют саму идеологию взаимодействия с потребителем, который становится активным участником технологических и коммерческих взаимодействий [1 - 4].

Наконец, бурное технологическое развитие в сфере информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) создало принципиально новые возможности для повышения оперативности анализа и прогноза ситуации в ЭЭС и принятия решений на основе обработки сверхбольших массивов и потоков данных. Вместе с совершенствованием современных методов и моделей управления крупными системами, в том числе построенных на принципах распределенного, мультиагентного управления, с применением нейронных сетей и искусственного интеллекта, позволяет на практике перейти к организации более гибкого управления работой ЭЭС и электроэнергетического рынка.

Активные действия по поиску новых решений этих проблем уже, как минимум десятилетие, отождествляются с термином «интеллектуальная сеть или энергосистема» (Smart Grid). Принципиально важное новое качество ЭЭС нового поколения – синтез, интеграция энергетических и информационных сетей как единой инфраструктуры энергоснабжения потребителей (Рис.3.1) [4 -5].



Рис. 3.1. Интеллектуальная сеть – это интеграция двух структур

В России системный взгляд на перспективы интеллектуализации для ЭЭС России начал формироваться на рубеже 2010-х годов, во многом опираясь на обобщение первого мирового опыта и концепций [3 - 8]. Важным этапом на этом пути стала разработанная по инициативе ФСК ЭЭС стратегического документа «Концепция построения интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС)» [9]. В 2015 г. Минэнерго РФ с привлечением ведущих экспертов была разработана Концепция реализации национального проекта «Интеллектуальная энергетическая система России».

Существующая электроэнергетическая система России должна будет трансформироваться в инфраструктуру нового типа – интеллектуальную

энергосистему (ИЭС). Интеллектуальная энергосистема представляет собой новое поколение систем энергообеспечения потребителей, объединяющих электроэнергетическую и информационную системы и обладающих новыми функциональными возможностями для организации технических и экономических взаимодействий за счет:

- минимальных ограничений для интеграции через общую электрическую сеть и общий электрический режим любых типов объектов производства, накопления и потребления электроэнергии, использования доступных источников энергии на основе сочетания централизованной и распределенной генерации;

- высокой оперативности и гибкости (адаптивности) функционирования и развития в условиях высокой изменчивости режимов, технологической и пространственной структуры производства и потребления электроэнергии, под влиянием технологических и экономических (рыночных) факторов;

- клиентоориентированности, приоритетности индивидуальных требований потребителей по эффективности, надежности и качеству энергоснабжения, их интересов и стратегий поведения при максимальной вовлеченности потребителей в формирование эластичного рыночного спроса на электроэнергию и системные услуги, поддержание резервов и режима работы энергосистемы, механизмы ценообразования для услуг сетевой инфраструктуры.

Исходя из определения ИЭС, изменение ее основных свойств можно рассматривать в виде крупных функционально связанных процессов, которые совместно происходят в каждом из четырех структурных сегментов энергосистемы – контурах экономических, технологических, управленческих, информационных взаимодействий [9].

1 Экономический (рыночный) контур создает новые возможности эффективного экономического взаимодействия между пользователями интеллектуальной энергосистемы: потребителями энергоресурсов, генерирующими компаниями, электросетевыми и другими инфраструктурными организациями, обеспечивая учет дифференцированных интересов и стратегий

их поведения с целью достижения максимальной эластичности рыночного спроса и предложения на энергию и услуги, оптимизации соотношения их стоимости и качества. Основные изменения функциональности в этом сегменте включают в себя:

- множественность форматов рыночных площадок на уровне локальных, региональных и национальной энергосистем, действующих по общим правилам во всем временном диапазоне;

- возможность свободного доступа к торговой системе любым участникам (действующим и потенциальным) на основе конкуренции и единых правил;

- расширение состава предлагаемых на рынке продукции и услуг для учета индивидуальных запросов потребителей по эффективности, надежности и качеству энергоснабжения;

- гибкое участие потребителей в формировании рыночного спроса, в том числе в качестве поставщиков энергии, мощности и услуг;

- эффективное сочетание механизмов централизованных торгов и двухсторонних договорных отношений между поставщиками и получателями энергии и сопутствующих, в том числе системных, услуг;

- включение в конкурентные торговые отношения электросетевых организаций, позволяющее сформировать дифференцированную стоимость услуг по передаче и распределению электроэнергии с учетом условий подключения потребителей по надежности и качеству, а также их удаленности.

2 Технологический контур обеспечивает поддержку функциональных возможностей экономического контура на основе максимально широкого применения современных решений в силовой части ИЭС для достижения оптимальных состояний энергосистемы, отвечающих условиям экономичности, надежности и качества при производстве, передаче, распределении и использовании энергии за счет расширенных возможностей для адаптивного изменения состояния технических объектов, включая:

- оптимизацию вариантов энергоснабжения потребителями в рамках двустороннего обмена мощностью с энергосистемой за счет ситуационного

регулирования активной и реактивной нагрузки, расширения регулировочного диапазона (собственная генерация, электромобили, аккумуляторы), возможностей эффективной работы в параллельном и автономном режимах;

- изменение топологии сети для оптимизации маршрутов передачи энергии с заданным уровнем надежности через воздействия на активно-адаптивные элементы сети, электроустановки генерации и активных потребителей;

- гибкое реагирование генерирующих и аккумулирующих источников на изменение платежеспособного спроса на энергию с поддержанием баланса в различных режимных ситуациях.

3 Контур адаптивного управления энергосистемой строится на комбинации разных типов и методов централизованного и распределенного управления и позволяет использовать для целей управления сочетание возможностей технологических элементов и экономических принципов в любом из режимных состояний, в том числе реакцию на возникновение нештатных (аварийных) ситуаций с послеаварийным восстановлением нормальной работы системы, включая:

- максимальную самодиагностику элементов энергосистемы с использованием ее результатов в алгоритмах функционирования автоматических систем режимного и противоаварийного управления;

- адаптивную реакцию на текущую ситуацию в энергосистеме в режиме реального времени, прогнозирование и оценку рисков, предупреждение возникновения и развития аварийных ситуаций за счет использования автоматических систем управления;

- оказание широкого спектра системных услуг на основе оптимального использования распределенных возможностей генерирующих источников, сетевых объектов, потребителей, используя формат рынков системных услуг;

- повышение автоматизации за счет применения высокопроизводительных вычислительных ресурсов и алгоритмов управления, как для выработки автоматических управляющих воздействий, так и для предоставления

рекомендаций диспетчерскому, оперативно-технологическому и ремонтному персоналу для реализации управления и проведения необходимых работ;

- решение задач, обеспечивающих в реальном масштабе времени согласование на рыночных принципах экономических интересов всех участников рынка, включая достижение согласованных уровней надежности и качества энергоснабжения, а также обеспечение системной надежности функционирования энергосистемы в целом и ее частей в нормальных режимах;

- сохранение живучести энергосистемы при возникновении аварийных ситуаций, в том числе каскадного типа, с возможностью привлечения потребителей к противоаварийному управлению, обеспечение возможности самовосстановления частей и энергосистемы в целом.

4 Информационно-коммуникационный контур обеспечивает новое качество управления, технологического и рыночного взаимодействия в энергосистеме. Главным функциональным признаком информационно-коммуникационного контура является его превращение в «параллельное» энергетическому контуру единое информационное пространство, которое пронизывает все виды взаимодействий в технологическом и экономическом контурах и является основной для реализации новых возможностей адаптивного управления в ИЭС:

- возможность сбора и обработки больших объемов информации о текущем состоянии энергосистемы и ее элементов, информации о внешней среде (освещенность, осадки, гололед, ветровые нагрузки и другие метеофакторы) с ее использованием в современных системах управления реального времени;

- стандартизованный высокотехнологичный доступ к информационно-вычислительным ресурсам ИЭС на основе клиентских порталов для организации участниками системы собственных оценок по рыночным предпочтениям при торговле энергией и услугами, оптимизации условий доступа к сети и рыночным площадкам, выполнении прогнозов и аналитических оценок;

- высокий уровень информационной безопасности за счет встраивания элементов систем безопасности во все технологические системы и операции,

защиты информационного пространства и частной информации всех структур системы, во всех режимах функционирования энергосистемы;

- обеспечение электромагнитной совместимости вторичных систем и их защиты от внешних электромагнитных и других воздействий, включая кибератаки.

Взаимосвязь структурных сегментов интеллектуальной энергосистемы осуществляется следующим образом: технологический контур является основной для физической поддержки функциональности экономического контура взаимодействия субъектов интеллектуальной энергосистемы, а проникающие в них контуры адаптивного управления и информационно-коммуникационного взаимодействия обеспечивают связность и гармонизацию работы ИЭС.

3.2 Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью

Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России была разработана для определения принципиальных подходов к построению инновационной Единой национальной электрической сети (ЕНЭС), соответствующей наиболее современным требованиям развития электроэнергетики, и охватывает иерархию задач управления режимами функционирования Единой электроэнергетической системы (ЕЭС), передающих и распределительных сетей в контексте совершенствования технологий производства, передачи, преобразования, распределения и потребления электрической энергии [9].

В Концепции представлены идеология, базовые технологии и механизмы реализации ИЭС ААС нового поколения. Обобщается и адаптируется к отечественным условиям мировой опыт интеллектуализации сетей, применения новейших информационных технологий для мониторинга, автоматизированного

и автоматического управления элементами энергосистемы, электроустановками потребителей с учётом развития системных услуг.

Особое внимание уделяется:

- вопросам развития принципов и систем управления энергосистемами в стационарных, аварийных и послеаварийных режимах;
- интерфейсу на стыке с потребителем, при этом рассматриваются подходы по структурированию потребителей;
- интерфейсу на стыке основной и распределительной сети;
- обеспечению информационной безопасности;
- распределённой генерации;
- управлению качеством и надёжностью электроснабжения потребителей;
- управлению спросом;
- построению интеллектуальных микросетей.

Даётся укрупнённая оценка эффективности применяемых технологий, а также приведены механизмы реализации Концепции.

Для трансформации ЕНЭС в активно-адаптивную сеть с приданием ЕЭС свойств и качеств интеллектуальной электроэнергетической системы необходимо выполнить:

- создание на принципах векторного измерения в реальном времени токов, напряжений и топологии сети новых средств и систем релейной защиты, режимной и противоаварийной автоматики;
- развитие существующих, разработка и внедрение новых иерархических систем координации и управления перетоками мощности, регулирования частоты и напряжения, автоматизированного управления генерацией;
- разработку (на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), силовой электроники, новых проводниковых, изолирующих, ферромагнитных, конструкционных материалов) новых видов силового оборудования, придающих электрической сети в настоящее время отсутствующие активные свойства (маневренность, глубокое ограничение токов

короткого замыкания, быстродействующее регулирование величин и углов напряжения, пропускной способности электропередач);

- модернизацию путём технического перевооружения морально и физически устаревшего парка традиционного электротехнического оборудования и электрических аппаратов с приданием ему качеств, соответствующих современным мировым критериям аппаратной надёжности, взрывозащищённости, пожарной безопасности, высокой заводской готовности, ремонтпригодности, наблюдаемости, способности эксплуатироваться без постоянного присутствия оперативного персонала;

- разработку систем управления подстанциями и мониторинга электротехнического оборудования нового поколения;

- создание современных систем мониторинга технического состояния воздушных линий (ВЛ) от предельных, в т.ч. внешних, природно-климатических воздействий (молниевые воздействия, гололёдно-ветровые воздействия, пожары, нагревы проводов, габариты при прохождении по лесным массивам);

- создание новых систем и средств учёта энергоресурсов;

- обеспечение мониторинга параметров надёжности и качества предоставляемых услуг по передаче электрической энергии.

Реализация заложенных в Концепцию принципов построения интеллектуальных сетей и её активных элементов планируется через программу НИОКР ОАО «ФСК ЕЭС» путём создания элементной базы (токоограничители, «цифровое КРУЭ», создание цифровой подстанции, ВТСП-технологии, газоизолированные линии, вставки постоянного тока на базе СТАТКОМ), а также единой информационно-технологической сети, управляемой в комплексе с системами связи, измерений, учёта электроэнергии, включающей системы локального и централизованного управления и регулирования – этот фактор и является основным при построении ИЭС.

Должен произойти переход от автономной работы различных автоматизированных программных устройств основного оборудования в сторону полнофункционального программно-аналитического комплекса, управляющего

исполнительными механизмами силового оборудования (выключатели, разъединители, элегазовое комплектное распределительное устройство (КРУЭ)) и установок (статические компенсаторы реактивной мощности (СКРМ), управляемые устройства продольной компенсации (УУПК)), обеспечивающих изменение их параметров в нормальных и аварийных режимах работы сети.

3.3 Проблемы управления и безопасности в интеллектуальных электроэнергетических системах

Понятие «умной» сети охватывает сегодня во всем мире одно из важнейших направлений развития рынка и технологий в сфере передачи и распределения энергии. По сути дела, речь идет о технологиях, которые способны сделать электрическую сеть и ее нагрузку прозрачными и управляемыми:

- зарубежные «Умные сети» – это реализация двусторонних коммуникативных обменов в цифровом формате всех участников производства, распределения, накопления и потребления электроэнергии;

- российские «Умные сети» — это комплексная модернизация и инновационное развитие всех субъектов электроэнергетики на основе передовых технологий и сбалансированных проектных решений глобально на всей территории страны [7 - 9].

При этом формирование в России комплекса «интеллектуальных сетей» в различных отраслях экономики закономерно ведет к созданию нового системно-структурного образования, которое можно назвать межотраслевым грид-кластером, так как оно будет иметь черты и компьютерного кластера и системы распределенных вычислений (grid).

Согласно концепции Smart Grid будущая сеть уже не будет иметь иерархическую структуру и крупные потребители будут в ней перемешаны с большим количеством относительно маломощных источников энергии, а также и единичных мощных станций, регуляторов напряжения, компенсаторов

реактивной мощности и т.д. Это будет весьма сложная, неструктурированная, разветвленная сеть. Перетоки мощности по такой сети не будут строго детерминированными. Очевидно, что такая сложная неструктурированная сеть должна иметь мощную управляющую систему, согласовывающую между собой работу всех этих многочисленных компонентов сети. Для этого все компоненты сети должны «общаться» друг с другом и с управляющим центром по специальным сетям связи, которые предполагается выполнять беспроводными. Разработка мощных полностью управляемых компонентов сети, снабженных системами самодиагностики и мониторинга, а также надежными каналами передачи и приема информации - является одним из направлений концепции технологической платформы интеллектуальных систем (Рис. 3.2) [9]. Резкое усложнение мощных компонентов энергосистемы, с одной стороны, и прогресс в области современных компьютеризированных систем, с другой, обуславливает необходимость дальнейшего интенсивного развития диагностических систем мониторинга электрооборудования, позволяющих заранее предотвратить выход из строя важных компонентов сети.

Интерес к интеллектуальным системам управления обуславливается целым рядом причин. Первая из них состоит в том, что традиционные технологии уже не в состоянии обеспечить требуемого повышения качества управления, поскольку не учитывают всех неопределенностей, воздействующих на систему. Попытка совершенствования известных алгоритмов адаптивного управления не всегда дает желаемый результат. Это объясняется как сложностью самих алгоритмов, так и сложностью их реализации на цифровой технике с учетом условия обеспечения устойчивости дискретной системы управления. Третья причина связана с тем, что уже сейчас назрела целесообразность использования преимуществ интеллектуальных технологий управления. В этой связи можно говорить о реальности применения существующей элементной базы для создания определенных классов интеллектуальных систем управления, относительная простота которых связана с обработкой ограниченного набора знаний в конкретной предметной области.



Рис. 3.2. Информационно-управляющие системы для электроэнергетики

Четвертая причина связана с тем, что дальнейшее развитие интеллектуальных технологий управления как на исполнительном уровне, так и на уровне организации целесообразных действий и поведения позволяет обеспечить практическую реализацию и внедрение принципиально нового поколения машин, обладающих высокими техническими характеристиками и функциональными возможностями.

Вся история развития искусственного интеллекта связана во многом с попытками разработки наиболее совершенных средств и методов управления в условиях неопределенности. Сложность, а в ряде случаев и невозможность формализации задач управления, обуславливают целесообразность и необходимость их решения с привлечением методов и технологий искусственного интеллекта. Концепция построения интеллектуальных систем управления основана на четырех ключевых положениях: теории ситуационного управления, иерархическом принципе построения системы управления, использовании наиболее разработанных интеллектуальных технологий (экспертные системы, нечеткая логика, нейронные сети, ассоциативная память), адекватном соответствии степени интеллектуальности (в малом, в большом и целом) факторам неопределенности, действующим на систему.

4 Цифровые подстанции

4.1 Понятие цифровой подстанции

Под цифровой подстанцией (ЦПС) понимается подстанция с высоким уровнем автоматизации управления, в которой практически все процессы информационного обмена между элементами ПС, обмена с внешними системами, а также управления работой ПС осуществляются в цифровом виде на основе протоколов МЭК. При этом и первичное оборудование ЦПС и компоненты информационно-технологических и управляющих систем (РЗА, ССПИ, АИИС КУЭ, РАС, ОМП и др.) должны быть функционально и конструктивно ориентированы на поддержку цифрового обмена данными [10].

Непосредственными целями создания ЦПС являются:

- совершенствование мониторинга и управления электросетевым оборудованием ПС;
- повышение надежности работы и эффективности эксплуатации оборудования техники «вторичных цепей» подстанции путем развития и унификации основных информационно-технологических и управляющих систем (ИТС) ПС, в том числе автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), релейной защиты и автоматики (РЗА), автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого и технического учета электроэнергии (АИИС КУЭ), связи и др.;
- переход к «необслуживаемым» подстанциям, т.е. к подстанциям, управляемым из удаленных центров управления.

Основными направлениями достижения указанных целей являются:

- 1) функционально-структурное развитие ИТС современных подстанций – повышение уровня автоматизации технологического процесса ПС;
- 2) развитие информационных технологий, используемых в программно-аппаратных комплексах (ПАК) подстанций;
- 3) «интеллектуализация» силового электрооборудования подстанций.

По первому направлению одним из фундаментальных принципов является представление о ЦПС, как об элементе в многоуровневой иерархии управления энергосистемой. Одним из основных путей повышения уровня автоматизации ПС должно стать решение задач автоматической координации информационно-технологических и управляющих систем подстанции на основе создания в рамках интегрированной АСУ ТП соответствующей функциональной координирующей подсистемы. Такая подсистема, базируясь на актуализируемой ею в реальном времени детализированной модели технологического процесса подстанции, должна участвовать в реализации функций управления оборудованием ПС, а также играть роль «представителя» ПС в центрах управления (ДЦ, ЦУС).

Второе направление (ИТ-развития ПАК ЦПС) заключается в:

а) создании технологии обеспечения единства точек измерения для всех информационно-технологических и управляющих систем подстанции;

б) рациональной организации информационных потоков между компонентами ПАК ЦПС, а также с внешними системами (центров управления и соседних ПС) с использованием протоколов МЭК.

В отношении третьего направления, следует отметить, что в условиях ЦПС появление у основного (силового) электрооборудования новых свойств, связанных с наличием специальных средств, обеспечивающих необходимый интерфейс с цифровыми устройствами программно-аппаратного комплекса ЦПС, является тем фундаментом, на основе которого формируется новая информационная модель подстанции.

4.2 Функциональная структурная схема цифровой подстанции

Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций 110 - 220 кВ и узловых цифровых подстанций 35 кВ устанавливаются стандартом СТО 34.01-21-004-2019 ПАО «РОССЕТИ» [10]. Согласно данному стандарту

структурную схему программно-технического комплекса (ПТК) цифровой подстанции должны входить следующие функциональные подсистемы:

- АСУ ТП - ключевая объединяющая система;
- система релейной защиты и автоматики;
- система специализированного АСУ ТП;
- система мониторинга параметров качества электроэнергии;
- система регистрации аварийных событий и процессов;
- система коммерческого и технического учета электроэнергии;
- система мониторинга и технического диагностирования состояния электрооборудования;
- система мониторинга технологического оборудования и управления инженерными системами;
- система синхронизированных векторных измерений;
- система нормативно-технической документации и информационного обеспечения обслуживающего персонала;
- система информационной безопасности;
- система общей безопасности.

Данный стандарт предусматривает трехуровневую систему комплекса программно-технических средств ЦПС - уровень процесса, уровень присоединения и уровень подстанции. Структурные уровни объединяются посредством сегментов локальной вычислительной сети (ЛВС) Ethernet. Сегменты локальной вычислительной сети образуют шину процесса, объединяющую уровень процесса и уровень присоединения, и шину подстанции, объединяющую уровень присоединения и уровень подстанции. На всех структурных уровнях функционируют подсистемы общего назначения - электропитания, единого точного времени, обеспечения информационной безопасности, мониторинга и управления информационно-технологической инфраструктурой ЦПС.

Укрупненная функциональная структурная схема программно-аппаратного комплекса ЦПС приведена на рис. 4.1 [9].

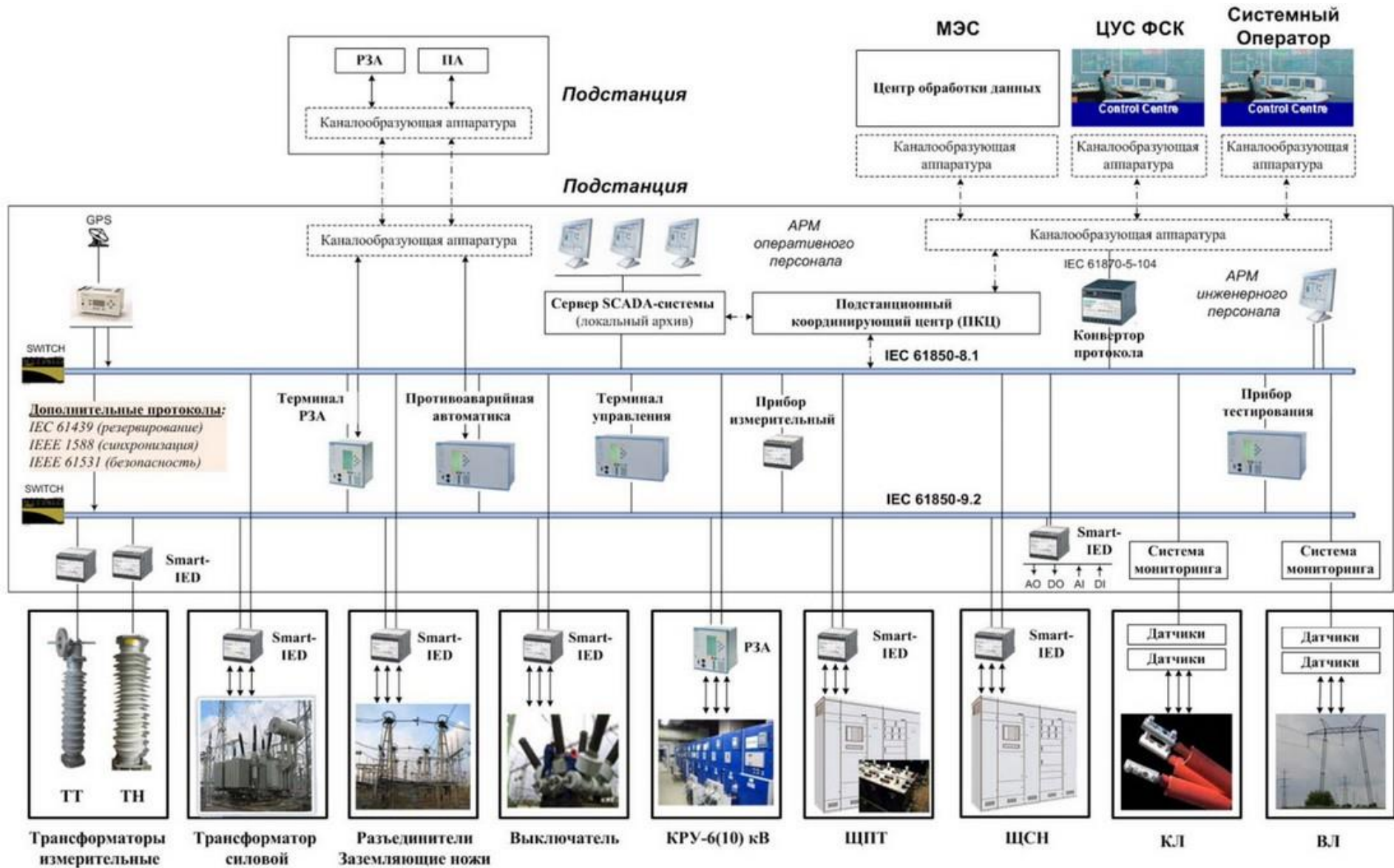


Рис. 4.1 Укрупненная функциональная структурная схема программно-аппаратного комплекса ЦПС

Ввод в ПАК текущей информации о режиме и состоянии схемы и оборудования подстанции осуществляется непосредственно в цифровой форме от цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также от специальных «интеллектуальных» устройств (Smart IED), выполняющих функции модулей связи, создаваемых для всех видов основного электрооборудования подстанции: трансформаторного и реакторного оборудования, коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей, заземляющих ножей), КРУ 6 (10) кВ, оборудования щитов постоянного тока – ЩПТ и собственных нужд ЩСН. Передача команд управления электрооборудованием от терминалов РЗиА выполняется через цифровые интерфейсы на устройства Smart IED на основе протоколов МЭК 61850.

Цифровой информационный обмен между компонентами интегрированной АСУ ТП осуществляется с помощью двух шин на основе протоколов МЭК 61850:

- шина процесса - активное и пассивное сетевое оборудование, работающее по протоколам МЭК 61850-8.1 и МЭК 61850-9.2;

- подстанционная шина - активное и пассивное сетевое оборудование, работающее по протоколу МЭК 61850-8.1.

Интеллектуальные устройства (IED) обеспечивают выполнение основных технологических функций – РЗиА, измерения (для выполнения всех функций: управления режимом, ТМ, АИИС КУЭ, ОМП, ККЭ, СМПР), организации каналов передачи телеинформации в удаленные центры управления, автоматического управления выключателями и коммутационными аппаратами (включая оперативные и технологические блокировки) и др.

Функциональная координирующая подсистема ПАК ЦПС осуществляют автоматическую координацию информационно-технологических и управляющих систем подстанции, процессы обработки информации, принятия и реализации решений по управлению оборудованием ПС на базе модели технологического процесса подстанции.

5 Оборудование интеллектуальной электроэнергетической системы

5.1 Интеллектуальное силовое электрооборудование

Можно выделить три уровня интеллектуализации ИЭС ААС: верхний - интеллектуализация сетей и системы в целом – как единой мегасистемы, средний - интеллектуализация комплексов оборудования (прежде всего, подстанций) и интеллектуализация отдельных видов силового оборудования и потребителей. В то же время все три уровня интеллектуализации связаны между собой – электроэнергетическую систему с активно-адаптивными электрическими сетями следует рассматривать как единый технологический комплекс.

Интеллектуальные силовые устройства – это, прежде всего, трансформаторное оборудование, коммутационные комплектно-распределительные устройства и системные силовые устройства, обеспечивающие оптимальную работу электрической сети как системы [9 - 11].

Трансформаторное оборудование. «Интеллектуальным» является трансформатор, обеспечивающий максимально возможный контроль состояния всех систем трансформаторного оборудования (активной части, масла, вводов, системы охлаждения, РПН, технологических защит и др.), самодиагностику и выдачу рекомендаций по дальнейшим действиям в случае появления развивающегося повреждения или ненормированного воздействия на трансформатор. Принципиально важно, что при этом трансформатор должен обеспечивать все режимы управления своими регулируемыми устройствами (РПН, система охлаждения) - автоматический, ручной местный и ручной дистанционный, в том числе из удаленных центров управления, с полным контролем правильности исполнения команд. С точки зрения развития трансформаторов в направлении повышения надежности, экологичности, энергоэффективности и безопасности важнейшим направлением является создание пожаро- и взрывобезопасных трансформаторов со сниженными потерями (негорючие изоляционные жидкости, аморфные стали, склеенные транспонированные провода, упрочненная медь и т.д.). Дальнейшее повышение

компактности подстанций при одновременном исключении пожароопасности достигается путем применения силовых элегазовых трансформаторов, мощность которых достигла 300-400 МВт, а номинальное напряжение 330 кВ. В ряде стран в мегаполисах уже реализован ряд проектов полностью герметизированных и автоматизированных компактных подстанций без обслуживания с элегазовой изоляцией. Поскольку эти подстанции являются пожаробезопасными и располагаются под землей, то экономический эффект связан не только со значительным сокращением используемой земли, но и возможностью возведения над подстанциями многоэтажных зданий.

Интеллектуальное КРУЭ. В современной электроэнергетике наблюдается тенденция к созданию компактных устройств как за счет применения новых видов изоляции и оптимизации изоляционных промежутков, так и путем комбинации отдельных высоковольтных устройств в одном корпусе, примером являются КРУЭ (комплектные распределительные устройства элегазовые).

В плане создания оборудования для интеллектуальных электрических сетей КРУЭ следует рассматривать как элементарную базовую ячейку, оборудование которой должно позволять встраивать КРУЭ в общую интеллектуальную систему подстанции и сети в целом. Для эффективного функционирования подстанций необходимо наличие надёжных средств, обеспечивающих управление и контроль, защиту и автоматизацию всей системы в комплексе на уровне ячеек КРУЭ. Решение этой задачи складывается из двух составляющих.

Первая – разработка шкафа управления и мониторинга ячейки КРУЭ, в котором собирается информация от первичных датчиков, установленных на оборудовании КРУЭ, осуществляется мониторинг состояния элементов ячейки, оцениваются механический и коммутационный ресурсы аппаратов и готовность оперативных цепей, производится управление коммутационными аппаратами. Анализ входной информации и выполнение операций аппаратами осуществляется по алгоритмам, учитывающим процессы в оборудовании и

внешние влияния. Предусмотрено ведение журнала с сохранением в памяти процессов, связанных с операциями коммутационных аппаратов, и их осциллографирование. Для контроля за состоянием функциональных систем предусмотрены устройства самодиагностики. Отображение информации осуществляется на лицевой панели шкафа. Обеспечивается возможность ручного и дистанционного изменения параметров управления. Предусмотрены связи для обмена информацией с остальными подстанционными системами.

Вторая - оснащение КРУЭ современными датчиками. Для контроля состояния элегаза, коммутационных операций аппаратов, целостности цепей управления используются малогабаритные экономичные датчики. Измерение значений токовой нагрузки и напряжения для оценки коммутационного ресурса аппаратов, для использования в системе аварийной защиты осуществляется с использованием оптоволоконных датчиков тока и напряжения.

Интеллектуальные системные силовые устройства. К интеллектуальным системным силовым устройствам относятся устройства FACTS – статические тиристорные компенсаторы (СТК), управляемые продольные компенсаторы, СТАТКОМы, фазоповоротные трансформаторы, управляемые электрические реакторы, вставки постоянного тока и т.д. В настоящее время на основе IED осуществляется интеллектуализация этих устройств – совершенствуются системы управления, защиты, автоматики.

Активно-адаптивная сеть – это совокупность подключенных к генерирующим источникам и потребителям линий электропередачи, устройств по преобразованию электроэнергии, коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, современных информационно-технологических и управляющих систем, источников генерации, в том числе использующих возобновляемую энергию. Этот комплекс выдает информацию о текущем состоянии оборудования, организует адаптивную реакцию системы в реальном режиме времени на различные возмущения, обеспечивая тем самым надежное энергоснабжение потребителей, энергоэффективность и устойчивость функционирования электроэнергетических систем в целом.

Технические средства активно-адаптивных сетей играют решающую роль в реализации этой технологии на практике, их можно разделить на следующие основные группы.

1. Устройства регулирования (компенсации) реактивной мощности и напряжения, подключаемые к сетям параллельно.

2. Устройства регулирования параметров сети (сопротивление сети), подключаемые в сети последовательно.

3. Устройства, сочетающие функции первых двух групп – устройства продольно-поперечного включения.

4. Устройства ограничения токов короткого замыкания.

5. Накопители электрической энергии.

6. Преобразователи рода тока (переменный ток в постоянный и постоянный ток в переменный).

7. Кабельные ЛЭП постоянного и переменного тока на базе высокотемпературных сверхпроводников.

8 Компактные ЛЭП, газоизолированные линии (ГИЛ).

Первые три группы устройств относят к технологии управляемых систем электропередачи переменного тока – Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS). FACTS является одной из наиболее перспективных электросетевых технологий, суть которой состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей.

Благодаря этому удается «в темпе процесса» управлять значением пропускной способности линии электропередачи, перераспределять между параллельными линиями электропередачи потоки активной мощности, оптимизируя их в установившихся режимах и перенаправлять их по сохранившимся после аварий линиям электропередачи, не опасаясь нарушения устойчивости, тем самым обеспечивая повышение надежности электроснабжения потребителей.

К устройствам FACTS первого поколения (FACTS -1) относят устройства, обеспечивающие регулирование напряжения (реактивной мощности) и обеспечивающие требуемую степень компенсации реактивной мощности в электрических сетях (статический компенсатор реактивной мощности (СТК), реактор с тиристорным управлением, стационарный последовательный конденсатор с тиристорным управлением, фазосдвигающий трансформатор и др.). К новейшим FACTS второго поколения (FACTS-2) относят устройства, обеспечивающие регулирование режимных параметров на базе полностью управляемых приборов силовой электроники (IGBT транзисторы, IGCT - тиристоры и др.). FACTS-2 обладают новым качеством регулирования - векторным, когда регулируется не только величина, но и фаза вектора напряжения электрической сети (синхронный статический компенсатор (СТАТКОМ), объединённый регулятор потоков мощности (ОРПМ) и др.).

Основные устройства управляемых систем передачи переменного тока в электрических сетях. Это устройства регулирования напряжения на базе современной силовой электроники, принципиально нового типа асинхронизированные турбогенераторы и компенсаторы реактивной мощности, кабельные линии на основе высокотемпературной сверхпроводимости, устройства ограничения токов короткого замыкания коммутационного типа.

Для решения качественно новых задач ИЭС ААС – управление в темпе процесса в условиях неполной информации о параметрах энергосистемы и возмущающих воздействий, необходимо использование единых принципов управления и качественно новых средств и систем:

- управления и регулирования активной и реактивной мощности с применением силовой электроники;
- ограничения токов короткого замыкания;
- накопления электроэнергии;
- прогнозирования и интеллектуального анализа аварийных ситуаций;
- поддержки оперативных решений, выдачи рекомендаций и управляющих воздействий по локализации и ликвидации аварий;

- контроля и анализа технического состояния и остаточного ресурса технологического оборудования;
- высокоскоростной, полностью интегрированной, двухсторонней технологии связи и коммутаций между субъектами ИЭС для интерактивного обмена информацией между ними в режиме реального времени;
- интеллектуального учета электроэнергии и управления электропотреблением.

Устройства регулирования (компенсации) реактивной мощности.

Предназначены для выполнения задачи обеспечения качества электрической энергии по напряжению путем поддержания заданных уровней напряжения в контрольных точках сети. В определенных случаях, особенно для межсистемных и системообразующих связей, при дальнем транспорте электроэнергии к этим устройствам предъявляются также требования в отношении обеспечения заданных пределов статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем, устойчивости нагрузки. Данные устройства по принципу действия делятся на статические и электромашинные.

К статическим устройствам относятся простейшие батареи статических компенсаторов (БСК) и шунтирующие реакторы (ШР), обеспечивающие ступенчатое регулирование реактивной мощности, реакторные группы, коммутируемые вакуумными выключателями (ВРГ), управляемые шунтирующие реакторы (УШР), статические тиристорные компенсаторы (СТК), статические компенсаторы реактивной мощности, выполненные на базе современной силовой электроники (мощные IGBT транзисторы) – СТАТКОМ.

СТАТКОМ является преобразователем напряжения, выполнен на силовых транзисторах, обеспечивающих 100%-ную генерацию и потребление реактивной мощности без дополнительных силовых реакторов и конденсаторов. Отличается высоким быстродействием и малыми габаритами. Принципиально способен регулировать не только величину, но и фазу напряжения в электрической сети к которой он подключен. При наличии в звене постоянного тока накопительного

устройства (аккумулятор и др.) способен также обеспечить регулирование активной мощности.

К электромашинным устройствам относятся синхронные компенсаторы (СК) и асинхронизированные компенсаторы (АСК). СК является хорошо известным на практике устройством. Асинхронизированный компенсатор содержит на роторе две обмотки и специальную (векторную) систему регулирования возбуждения. АСК является базовым устройством электромашинных устройств FACTS, является электромашинным аналогом СТАТКОМа. Обеспечивает возможность регулирования реактивной мощности в пределах $\pm 100\%$. Обладает способностью регулирования не только величины, но и фазы вектора напряжения. Обладает высокой перегрузочной способностью (двух-трехкратная перегрузка в течение 300 с). Возможна работка с переменной частотой вращения и маховиком на валу с целью улучшения динамических свойств системы.

5.2 Устройства регулирования параметров сети

Устройства регулирования параметров сети предназначены для изменения сопротивления элементов сети (управление топологией сети), изменения пропускной способности сети, в том числе увеличения вплоть до ограничения по нагреву без нарушения условий устойчивости, перераспределения потоков мощности по параллельным линиям при изменении режимной ситуации.

К устройствам регулирования параметров сети относятся:

- неуправляемые устройства продольной компенсации (УПК);
- управляемые устройства продольной компенсации (УУПК);
- фазоповоротные устройства (ФПУ);
- асинхронизированные компенсаторы (АСК).

УУПК включает в себя реакторы и тиристорные ключи, соединяемые с секциями батареи конденсаторов, включенных в линию электропередачи последовательно. Такая комбинация позволяет обеспечить изменение

емкостного сопротивления и, тем самым, реактивного сопротивления линии. В качестве УУПК возможно использовать последовательное включение в линию (через трансформатор) СТАТКОМ или АСК.

ФПУ представляет собой устройство, переключающее посредством выключателей или тиристорных ключей отпайки трансформатора, обеспечивая тем самым регулирование фазы в заданных пределах. В варианте с тиристорным ключом ФПУ обладает необходимым быстродействием, способным влиять на динамические свойства системы.

Устройства продольно-поперечного включения. Устройства продольно-поперечного включения обеспечивают заданное регулирование величины и фазы вектора напряжения в местах их подключения (векторное регулирование) изменяя (оптимизируя) за счет этого управление потоками мощности как в статических, так и в динамических режимах. Эти устройства создаются либо на базе двух СТАТКОМов, либо двух АСК, соединенных параллельно-последовательно.

Преобразователи вида тока. Преобразователи вида тока (переменный ток в постоянный и постоянный в переменный) предназначены для согласованной работы электрических сетей переменного и постоянного тока в случаях их совместного использования, когда применение фрагмента постоянного тока в конкретном сечении (линии) электропередачи являются экономически и технически целесообразным и для согласования работы сетей с различной частотой электрического тока, в том числе при возникновении аварийных ситуаций и восстановления электроснабжения после ликвидации нарушений.

Технические устройства для решения этих задач выполняются на основе традиционных вставок постоянного тока (вставки на тиристорах), вставок на базе СТАТКОМов, вставок на базе асинхронизированных машин. Вставка на базе двух СТАТКОМов, объединенных общим звеном постоянного тока и включаемых в рассечку линий электропередачи, связывающих две электрические системы, обеспечивает регулирование как активной, так и реактивной мощности в широких пределах. Обеспечивается возможность

работы в автономном режиме. Применяется в любых сетях. АС ЭМПЧ является электромашинным аналогом вставки на СТАТКОМах. АС ЭМПЧ – это две асинхронизированные машины с жестко связанными валами, работающие в общем случае при различных частотах энергосистемы. Обладают высокой перегрузочной способностью при питании нагрузок чувствительных к посадкам напряжения и потребителей с импульсной нагрузкой.

Устройства ограничения токов короткого замыкания. Устройства предназначены для ограничения уровней токов короткого замыкания и сохранения живучести электроэнергетической системы. В схемах электроснабжения мегаполисов эти проблемы особо актуальны, так как в связи с высокой плотностью нагрузки значения токов короткого замыкания превышают коммутационную способность существующих выключателей.

Устройства ограничения токов короткого замыкания можно разделить на две группы:

- стационарные устройства, вводящие в сеть постоянные дополнительные индуктивные сопротивления;

- автоматические устройства, включающие дополнительные сопротивления в сеть (в идеале) только на время существования короткого замыкания.

К первой группе устройств относятся стандартные токоограничивающие реакторы, включаемые в электрическую сеть последовательно, они допускают сравнительно небольшую степень токоограничения, но обладают сравнительно низкой стоимостью и нашли в настоящее время широкое практическое применение в сетях НН и СН.

Токоограничивающие устройства второй группы являются управляемыми, обладают в нормальных режимах малым (в идеале нулевым) сопротивлением, а при коротком замыкании – требуемым (при необходимости – очень большим), имеют высокое быстродействие, особенно при переходе в активный режим, т.к. в их задачу входит ограничение ударного тока короткого замыкания.

К устройствам второй группы относятся устройства глубокого токоограничения на базе силовой электроники, на базе быстродействующих коммутационных элементов взрывного действия, на базе использования высокотемпературных сверхпроводников. Устройство на базе силовой электроники состоит из последовательно включённых индуктивности и ёмкости равной величины. В нормальном режиме ключ разомкнут. Падение напряжения равно нулю. При коротком замыкании тиристорный ключ замыкает ёмкость и индуктивность ограничивает ток короткого замыкания.

Применение быстродействующих токоограничивающих устройств на основе взрывных коммутаторов позволяет обеспечить ограничение, как установившегося тока, так и ударного тока короткого замыкания, что является актуальной задачей для сетей высокого напряжения.

Способностью ограничения токов обладают также и вставки постоянного тока, однако их предназначение значительно шире и их использование только для целей токоограничения экономически не оправдано.

Накопители электрической энергии. Накопители электрической энергии являются важнейшим элементом активно-адаптивных сетей. Накопители энергии выполняют ряд функций: выравнивание графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной энергии и выдачу в сеть в периоды дефицита), повышение устойчивости нагрузки, обеспечение бесперебойного питания особо важных объектов, собственных нужд электростанций и подстанций, демпфирование колебаний мощности, стабилизацию работы малоинерционных децентрализованных источников электрической энергии. Накопители энергии делятся на электростатические и электромеханические.

К электростатическим накопителям энергии относятся:

- аккумуляторные батареи большой энергоёмкости (АББЭ);
- накопители энергии на основе молекулярных конденсаторов;
- накопители энергии на основе низкотемпературных (охлаждение жидким гелием) сверхпроводников.

Все типы электростатических накопителей связываются с сетью через устройства силовой электроники – преобразователи тока или напряжения. Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИНЭ) - это одно из применений сверхпроводимости.

К электромашинным накопителям энергии относятся два вида комплексов:

- синхронные машины с преобразователями частоты в первичной цепи и маховиками на валу;
- асинхронизированные машины с маховиками на валу.

5.3 Линии электропередачи нового поколения

5.3.1 Воздушные линии электропередачи напряжением 220 и 500 кВ.

Создание ВЛ нового поколения должно обеспечить экономичную и надежную передачу электрической энергии заданной мощности как между системами, так и внутри энергосистем. Линии электропередачи нового поколения способствуют выполнению требований Федерального Закона РФ от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 26 июля 2019 года). ВЛ нового поколения (компактные ВЛ и управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ)) в сочетании с устройствами FACTS по сравнению с ВЛ традиционной конструкции позволяют:

- увеличить пропускную способность;
- снизить суммарные затраты на 10–20 % в расчете на единицу передаваемой мощности;
- осуществлять принудительное перераспределение потоков активной и реактивной мощности;
- повысить эффективность использования устройств регулирования реактивной мощности;
- уменьшить суммарную мощность и стоимость устройств регулирования мощности и напряжения;

- снизить суммарные потери электроэнергии в энергосистеме;
- повысить механическую устойчивость ВЛ при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов;
- сократить в 1,5-2 раза площади земельных угодий, отчуждаемых под воздушные линии при передаче одинаковой мощности;
- обеспечить управление величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях.

ВЛ нового поколения предусматривают:

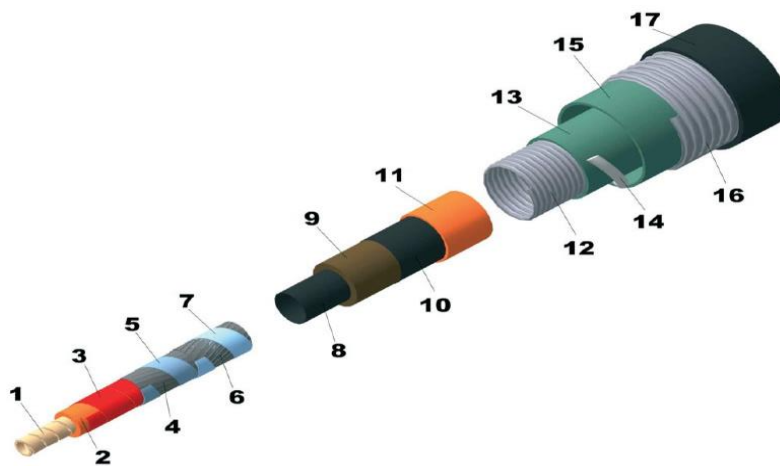
- создание компактных ВЛ с минимально допустимыми расстояниями между фазами;
- выбор оптимальной конструкции расщепленной фазы и линейной изоляции (в том числе междуфазной);
- применение опор новых типов.

Выбор расположения и конструкции фаз одноцепных и многоцепных ВЛ нового поколения обусловлен необходимостью улучшения электрических параметров линий за счет изменения параметров электромагнитного поля в междуфазном и окружающем линию пространстве. Усиление электромагнитного поля внутри линии за счет сближения фаз позволяет увеличить пропускную способность и улучшить электрические и технические параметры ВЛ. Ослабление электромагнитного поля во внешнем пространстве приводит к улучшению экологических показателей ВЛ. Управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ), кроме того, позволяют в процессе изменения величины передаваемой по линии мощности осуществлять регулирование параметров электрического и магнитного поля фаз и цепей, благодаря чему обеспечивается управление эквивалентными параметрами ВЛ. Регулирование параметров ВЛ целесообразно осуществлять для обеспечения заданных режимов как линии, так и энергосистемы в целом.

Применение ФПУ (ФРТ) на УСВЛ совместно с другими устройствами FACTS обеспечивает заданные параметры ВЛ, высокую управляемость электрических сетей и позволяет достичь существенной экономии капитальных

и эксплуатационных затрат по энергосистеме в целом, по сравнению с вариантами традиционных решений. ВЛ нового поколения являются одним из ключевых элементов при создании активно-адаптивных сетей.

5.3.2 Кабельные линии электропередачи постоянного и переменного тока на базе высокотемпературных сверхпроводников. Концепция применения ВТСП-кабелей в электрических сетях исходит из того, что выполненные на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов кабели (ВТСП-кабели) доказали свою техническую осуществимость на примерах их прототипов, опробованных в разных странах. Конструкция одной фазы ВТСП кабеля переменного тока приведена на рис. 5.1 [9].



1, 2, 3 – центральный несущий элемент – формер; 4, 5, 6, 7 – сверхпроводящий токонесущий слой; 8, 9, 10 – изоляция; 11 – экран; 12, 13, 14, 15, 16 – криостат: внутренняя гофрированная труба, тепловая изоляция, внешняя гофрированная труба; 17 – защитная оболочка

Рис. 5.1. Конструкция сверхпроводящего силового кабеля

Перспективным направлением является использование сверхпроводящих кабелей для передачи энергии на постоянном токе. В этом случае расход сверхпроводника уменьшается практически в полтора-два раза, отсутствуют электрические потери в жиле и снижаются требования к криогенной системе.

5.3.3 Применение постоянного тока в электрических сетях. В традиционной электроэнергетике производство и распределение электрической

энергии осуществляется на переменном электрическом токе. В первую очередь это связано со способностью переменного тока к трансформации, а также с тем, что значительная часть электроэнергии потребляется в различного рода электроприводах, в которых используются в основном асинхронные электродвигатели переменного тока, которые по своей конструкции значительно проще и надежнее электродвигателей постоянного тока. Кроме этого, протяженность основных линий электропередачи, связывающих крупные электростанции и узловые подстанции, составляет 300 – 400 км, а именно при такой длине применение переменного тока является достаточно эффективным.

Постоянный ток находит применение на электрифицированном железнодорожном и городском транспорте, процессах электролиза в металлургической и химической промышленности. Последние достижения в области силовой электроники и разработка на этой основе устройств преобразования переменного тока в постоянный и обратно, а также многие положительные свойства постоянного тока создают условия для расширения сферы его использования, в частности при передаче электрической энергии. Приведем основные из них:

- более простые конструкции линий: меньшее количество проводов, что позволяет упростить конструкции опор, обуславливает снижение потребности в стали, железобетоне, изоляционных материалах, снижает площади для полосы отчуждений земли под строительство ЛЭП. В итоге - более низкая стоимость сооружения ЛЭП постоянного тока в сравнении с ЛЭП переменного тока;

- при применении кабелей постоянного тока электрическая прочность кабельной изоляции в три-четыре раза превышает электрическую прочность изоляции при приложении напряжения промышленной частоты. В результате удельная стоимость кабеля постоянного тока примерно в три раза ниже, чем кабеля переменного тока при их одинаковой пропускной способности. Кроме того, при постоянном напряжении отпадает ограничение по длине кабельной передачи, связанное с большим емкостным током в кабеле на переменном токе;

- быстродействующее регулирование преобразователей передачи постоянного тока (ППТ) позволяет, с одной стороны, практически безинерционно управлять мощностью ППТ, а с другой – резко ограничить величину протекающих через них аварийных токов;

- режим загрузки ППТ не зависит от отклонений частоты в объединяемых энергосистемах, что обеспечивает возможность объединения энергосистем с разными частотами и условиями регулирования частоты, а с другой стороны дает возможность управления режимом ППТ в интересах повышения устойчивости и надежности энергосистемы;

- способность ППТ работать как в биполярном, так и в униполярном режимах обеспечивает возможность сохранить не менее половины передаваемой мощности в наиболее характерных аварийных ситуациях;

- ППТ обладают более благоприятными по сравнению с ВЛ переменного тока экологическими характеристиками.

Наряду с ППТ для реализации перечисленных выше системных задач возможно использование вставок постоянного тока (ВПТ).

Помимо ППТ и ВПТ к числу сетевых объектов постоянного тока относятся многоподстанционные передачи постоянного тока (МППТ). Сооружение этих объектов базируется на применении тех же видов оборудования, которые используются на двухподстанционных ППТ. Дополнительной особенностью их системы регулирования является наличие центрального регулятора, осуществляющего координацию уставок регуляторов тока всех преобразовательных подстанций.

6 Интеллектуальные средства и системы контроля, диагностики, управления и защиты

6.1 Мониторинг и диагностика воздушных линий электропередачи

Анализ опыта эксплуатации показывает, что в результате несвоевременного выявления дефектов на ВЛ увеличивается вероятность развития повреждений, возрастает объем проводимых ремонтных работ, сокращается срок службы оборудования. Для повышения надежности, безопасности и бесперебойности функционирования ВЛ используются системы их диагностики и мониторинга. Система мониторинга и диагностики ВЛ осуществляют автоматизированный сбор данных, передачу их по каналам связи (беспроводным, оптическим), обработку, анализ и выдачу информации о состоянии контролируемых параметров ВЛ [8, 9, 12].

В настоящее время для мониторинга и диагностики воздушных линий электропередачи (ВЛ) используются следующие технологии:

- воздушное лазерное сканирование, которое позволяет дистанционно получить пространственно-геометрическую информацию о реальных габаритах ВЛ с учетом рельефа местности, растительности и сооружениях, расположенных по трассе ВЛ;

- наземное лазерное сканирование, позволяющее дистанционно получить наиболее полную пространственно-геометрическую информацию на отдельно взятом участке ВЛ (пролета ВЛ);

- мониторинг температуры нагрева проводов ВЛ с помощью установленных на проводах ВЛ датчиков температуры с последующей обработкой информации и получением габарита ВЛ в месте установки датчика;

- мониторинг токовой нагрузки, скорости ветра, температуры, габарита ВЛ в точке установки, передача информации с фиксацией координат (GPS) - с помощью multifunctional устройств «Умная сфера» установленных на проводах ВЛ;

- мониторинг гололедной обстановки на ВЛ с помощью «Автоматизированной информационной системы контроля гололедной нагрузки» позволяющей получать информацию о температуре окружающего воздуха, направлении и скорости ветра, влажности, толщине льда на проводах и грозозащитных тросах и передавать информацию на диспетчерские пункты;
- мониторинг грозовой активности вдоль трассы ВЛ с помощью многопунктовых систем грозопеленгации;
- обследование ВЛ, выполняемое путем обхода трассы ВЛ и состоящее из обследования опор, их фундаментов и изоляционных конструкций (гирлянд изоляторов, изоляционных распорок и т.п.).

6.2 Мониторинг и диагностика силовых трансформаторов

За последние годы в России и за рубежом отмечается тенденция развития системы непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов, которая направлена на повышение их эксплуатационной надежности. Основной целью непрерывного контроля состояния трансформаторов считается повышение эффективности системы диагностики для выявления дефектов на ранней стадии их развития. Особенно актуальным является использование непрерывного контроля для индикации процессов, характеризующих предельное состояние трансформаторов, когда их дальнейшая эксплуатация недопустима. В системе мониторинга силовых трансформаторов предусматривается измерение следующих параметров:

- суммарную активную и реактивную мощности по фазам на всех сторонах трансформатора;
- амплитуду напряжений на всех сторонах;
- токи фаз на всех сторонах трансформатора и в общей обмотке автотрансформатора;
- значение концентраций газов в масле (водород, ацетилен, этилен, этан, метан, оксид и диоксид углерода);

- содержание влаги в масле;
- положение отпаек РПН;
- температуру верхних слоев масла;
- температуру масла на входе и выходе системы охлаждения;
- токи по фазам двигателя привода РПН;
- количество включенных вентиляторов;
- сопротивление короткого замыкания;
- небаланс токов изоляции вводов под рабочим напряжением.

6.3 Мониторинг и диагностика выключателей и КРУЭ

Одним из основных элементов цифровых подстанций являются КРУЭ, обеспечивающие интеграцию системы мониторинга и диагностики состояния оборудования с цифровой системой управления подстанций. Система мониторинга и диагностика КРУЭ должна обеспечивать непрерывный контроль плотности элегаза во всех заполненных элегазом объемах, формировать предупредительные и аварийные сигналы при достижении пороговых значений диагностических параметров. Контроль и учет коммутационных операций, выполненных без тока и с током короткого замыкания:

- количество операций;
- измерение и анализ времени срабатывания при включении и отключении коммутационных аппаратов;
- измерение скоростей перемещения контактов коммутационных аппаратов при включении и отключении;
- подсчет израсходованного и остаточного коммутационного ресурса выключателя.

Система мониторинга и диагностики должна контролировать готовность приводов аппаратов:

- время завода пружин;
- количество запусков двигателя завода пружин;

- ток двигателя завода пружин;
- целостность цепей катушек управления;
- наличие оперативного тока;
- наличие напряжения собственных нужд;
- температуру окружающего воздуха и в шкафу привода.

Система мониторинга и диагностики должна обеспечивать самоконтроль состояния ее отдельных узлов.

6.4 Управление режимами ЭЭС

Функции оперативно-диспетчерского управления, выполняемые системным оператором охватывают контроль (мониторинг) и управление режимом ЭЭС в реальном времени, а также выполняемые off-line планирование режимов, разработку электрических режимов и обеспечение эффективного противоаварийного управления, организацию выполнения ремонтных работ, расследование технологических нарушений с разработкой конкретных противоаварийных мероприятий, вопросы организации параллельной работы с энергосистемами соседних государств, техническое обеспечение оперативно-диспетчерского управления. Функции разработки, согласования, утверждения планов, программ, технических решений распределены по уровням оперативно-диспетчерского управления (СО-ОДУ-РДУ).

Функции по управлению режимом (состоянием), планированию ремонтов для части объектов (класса напряжения 220 кВ и ниже – по утвержденному списку), не влияющих существенно на режим энергосистем, выполняет в рамках оперативно-технологического управления персонал ФСК, МРСК, ГК, в т.ч. по команде диспетчера.

Поддержка действий диспетчера осуществляется техническими и программными средствами АСДУ, прежде всего обеспечивающими снабжение необходимой первичной информацией в виде информационной модели объекта управления (ОИК), с автоматическим анализом ситуации и разработкой

рекомендаций по ведению режима - на основе оцениваемой расчетной модели реального времени объекта управления. Часть функций по управлению режимом в той или иной степени автоматизирована. Управляющие воздействия от диспетчера (коммутация выключателей, изменение нагрузки генераторов электростанций и потребителей, изменение уставок регуляторов, защиты и автоматики) могут выдаваться непосредственно на объекты по телеуправлению или в виде команды персоналу объекта. Кроме того, имеются автоматические контуры управления режимом, включающие режимную автоматику (подсистемы регулирования частоты и активной мощности, регулирования напряжения и реактивной мощности), а также релейную защиту, отключающую поврежденный (при коротком замыкании) или перегруженный элемент и противоаварийную автоматику.

Диспетчер управляет настройкой этих систем и имеет возможность, при необходимости, использовать подведенные под автоматику управляющие воздействия на объекты. Одной из важных групп задач, выполняемых оперативно-диспетчерским и оперативно-технологическим персоналом всех уровней является мониторинг надежности режима, который осуществляется с помощью средств автоматизированного технологического управления (мониторинг частоты ЭЭС и качества ее регулирования, топологии схемы, допустимости текущего режима по контролируемым параметрам (напряжению в узлах, токовой загрузки ЛЭП и оборудования, перетокам мощности в (контролируемых) сечениях электрической сети, надежности режима с учетом нормативных возмущений, резервов активной и реактивной мощности, оперативных заявок, и др.

Мониторинг текущей топологии электрической схемы объекта управления (состояния коммутационных аппаратов) включает выявление и отображение для диспетчерского персонала событий в ЭЭС: отключения (включения) линий, трансформаторов, генераторов, реакторов, разделение схем подстанций, отделение энергообъектов и районов сети от системы, в результате плановых действий и аварийных возмущений. Анализ допустимости состояния объекта

управления выполняется путем контроля выполнения ограничений по надежности (максимально и аварийно допустимые перетоки мощности, минимальные и максимальные уровни напряжения на шинах, максимальные по термической устойчивости значения токов в оборудовании, ограничивающие режим уставки РЗА или ПА и др.). В полной постановке должно предусматриваться автоматическое уточнение текущих ограничений и фиксация нарушений в реальном времени.

Применение средств искусственного интеллекта расширяет потенциальные возможности систем управления, позволяя реализовать управление объектами с неизвестной математической моделью, повысить их эффективность за счет включения в них процедур распознавания образов, планирования действий и накопления знаний.

Системы управления, основанные на знаниях, которые обладают способностью рассуждать и выводить заключения на основе некоторых общих закономерностей, сведений о цели управления и текущем состоянии объекта управления (экспертные системы), применяются в ряде задач управления, когда математическая модель объекта настолько сложна, что не допускает аналитического представления.

Можно выделить следующие основные направления работ по развитию автоматической системы управления режимом:

- создание информационных комплексов на базе современных технологий, охватывающих весь возможный диапазон процессов в энергосистеме, осуществляющих высокоточное определение и сбор синхронизованных режимных параметров в узлах сети в режиме реального времени;
- создание систем верификации моделей энергосистем с использованием данных СМНР;
- создание цифровых сетевых моделирующих платформ реального времени;

- использование единой информационной модели как стандарта для разработки программных комплексов, предназначенных для использования в автоматическом управлении;

- развитие методов прогнозирования потребления и прогнозного потокораспределения, расчета допустимых перетоков мощности в реальном времени;

- создание систем распределенного расчета режимов энергосистем с использованием многоуровневых моделей на основе сетевых технологий (GRID –технологий).

В задаче управления активами одним из основных направлений развития является разработка алгоритмов диагностики электротехнического оборудования на основе методов оценивания состояний и параметрической идентификации.

6.5 Релейная защита и автоматика

Релейная защита и автоматика ЭЭС интегрирована в общую структуру ПТК цифровых ПС и является локальной автономной подсистемой автоматического действия и функционирования на уровне ПТК присоединения и уровне ПТК подстанции. Структурная схема подсистемы РЗа цифровых ПС представлена на рисунке 6.1 [10, 13]. Основными элементами подсистемы РЗа являются интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), выполняющие анализ и обработку информации с целью выявления аварийного режима, а также принятия решения об автоматическом отключении присоединения электрической сети от остальной ее части, или действия на сигнал. Для выполнения этих функций ИЭУ РЗа должны:

- получать и передавать данные от устройств уровня процесса. Обмен дискретной информацией осуществляется по ЛВС шины процесса по протоколу МЭК 61850-8-1 (GOOSE). Обмен аналоговой информацией осуществляется по протоколу МЭК 61850-9-2 (SV);

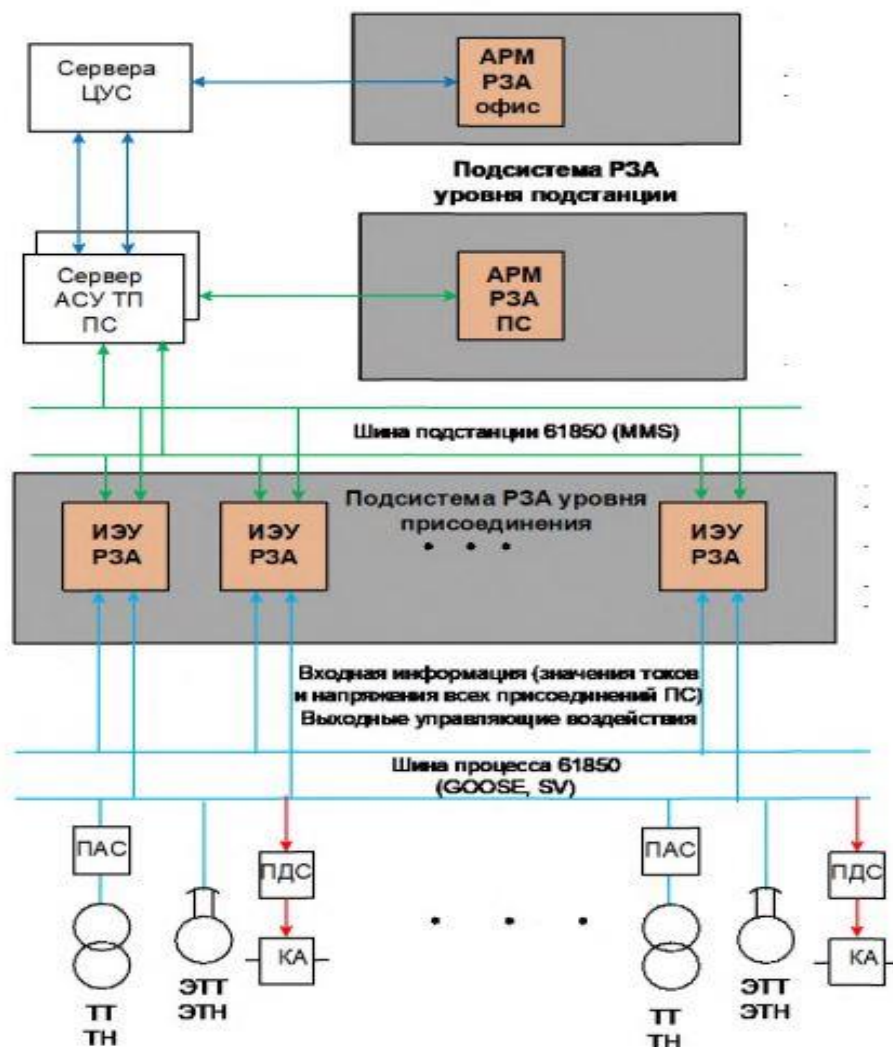


Рис. 6.1. Структурная схема подсистемы РЗА цифровой подстанции

- получать и передавать данные и обмениваться сигналами с другими устройствами уровня присоединения цифровой ПС. Предусмотрены прием и передача логических сигналов для взаимодействия с ИЭУ РЗиА уровня присоединения своей ПС, а также обмен данными и сигналами с ИЭУ РЗиА смежных ПС;

- взаимодействовать с подсистемами АСТУ для обеспечения передачи данных на подстанционный уровень цифровой ПС для использования в подсистеме РЗиА уровня подстанции, а также принимать данные и управляющие воздействия от устройств подстанционного уровня цифровой ПС;

- выдавать управляющие сигналы на отключение защищаемого присоединения через ПДС, формировать дискретные сигналы (о срабатывании

защит, о блокировках, пусках, неисправностях входных цепей тока или напряжения, неисправностях, обнаруженных системой диагностики, изменении конфигурации и оперативном состоянии ИЭУ РЗиА, оперативных физических и логических ключей, накладок, переключателей и т.п.) и передавать на уровень подстанции.

Применение современных информационных технологий для реализации функций РЗиА создает условия и вызывает необходимость разработки новых принципов создания систем РЗиА для обеспечения их эффективного использования на всех этапах жизненного цикла, повышения уровня их технического совершенства и надежности функционирования. При разработке устройств РЗиА с применением стандарта МЭК 61850 появляется возможность внедрения специализированных промышленных компьютеров (СПК). Важным отличием СПК от традиционных МП терминалов РЗиА является возможность свободной конфигурации и оптимизация состава выполняемых ими функций РЗиА. В отличие от обычных промышленных компьютеров, СПК имеют операционную систему, обеспечивающую возможность ведения информационной модели защищаемого объекта и выполнение информационного обмена между функциями РЗиА как в рамках одного СПК, так и в разных СПК. При этом настройка коммуникационных интерфейсов для передачи данных между СПК выполняется операционной системой автоматически [14].

Создание интеллектуальных систем РЗиА на основе СПК обеспечивает повышение уровня их технического совершенства, прежде всего, за счет решения задачи автоматической адаптации функционала системы РЗиА к изменению условий ее работы в энергосистеме и автоматической оптимизации архитектуры функционального взаимодействия при изменениях в топографии сети и составе технических средств, возможных во время эксплуатации. Интеллектуальная система РЗиА обладает гибкой функциональной структурой и свойствами автоматической самонастройки и самоорганизации. При этом под самонастройкой понимается автоматический расчет настроечных параметров

функционирования устройств РЗА при изменении условий чувствительности и селективности РЗА в защищаемой сети. Под самоорганизацией понимается автоматический выбор из базы знаний требуемого состава функций РЗА для всех элементов первичного оборудования энергообъекта, а также последующее их автоматическое распределение по СПК и организация информационного обмена между СПК. Самонастройка и самоорганизация системы РЗА выполняется в координации с данными мониторинга состояния первичного оборудования и состояния информационнокоммуникационной инфраструктуры. Это позволяет обеспечить автоматическую реконфигурацию функциональной структуры и поддержание требуемого уровня надежности функционирования системы РЗА во время эксплуатации при изменении топологии электрической сети и состава защищаемого оборудования или отказах отдельных элементов системы РЗА. Для реализации интеллектуальной системы РЗА применяются специализированные оптимизационные методы. Работа оптимизационных методов основывается на применении генетических алгоритмов и распределенного мультиагентного взаимодействия.

Заключение

Научно-технологический прогресс создает принципиально новые условия для функционирования энергетики, существенно расширяя вариативность выбора способов энергоснабжения для потребителей. Энергетические компании получают новые возможности производства, транспортировки, переработки и реализации энергии. Государственные органы с одной стороны сталкиваются с дополнительными вызовами и возможностями при формировании энергетической политики, а с другой стороны через инструменты стимулирования сами оказывают влияние на ход НТП.

Происходит переход в эпоху активной конкуренции технологий, которые способны предложить большое количество вариантов энергообеспечения с использованием различных источников энергии. Параллельно изменятся и сами механизмы функционирования энергосистем. Этому способствует внедрение комплекса автоматизированных, цифровых и интеллектуальных решений, включая технологии предиктивной аналитики, роботизации, разноуровневой телеметрии, смарт-гридов, активно-адаптивных сетей и микрогридов, систем сбора, обработки и анализа больших массивов сложных данных (Big data), систем хранения и передачи больших массивов зашифрованных данных (блокчейн-платформы), «цифровых двойников», «интернета вещей» и др. Всё это открывает новые возможности для функционирования систем аккумулирования энергии и развития распределенной генерации.

От прогресса в области накопления электроэнергии во многом будет зависеть будущая конфигурация энергосистем и роль ископаемых топлив в балансировании неравномерности производства и потребления. Эта проблема для многих стран обострилась с вводом мощностей ВИЭ – фактически к традиционной неравномерности на стороне потребления добавилась значительная неравномерность на стороне производства.

Список использованных источников

- 1 Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина // М.: ИНЭИ РАН, 2019. – 210 с.
- 2 Перспективы развития мировой энергетики с учетом влияния технологического прогресса / под ред. В.А. Кулагина // М.: ИНЭИ РАН, 2020. – 320 с.
- 3 Кузьменкова, В.Д. Цифровизация электроэнергетической промышленности / В.Д. Кузьменкова // Естественно-гуманитарные исследования. №26(4), 2019. – С. 115 -119.
- 4 Иванов, Т. В. Интеллектуальная электроэнергетика: стратегический тренд международной конкурентоспособности России в XXI веке / Т. В. Иванов, С. Н. Иванов, Е. Л. Логинов, Э. Б. Наумов – М.: Спутник+, 2012. – 304 с.
- 5 Веселов, Ф. В. Интеллектуальная энергосистема России как новый этап развития электроэнергетики в условиях цифровой экономики / Ф. В. Веселов, В. В. Дорофеев // Энергетическая политика. № 5, 2018. С. 43 -52.
- 6 Баширова, Э.М. Интеллектуальные системы управления и обеспечения безопасности в электроэнергетических комплексах: учеб. пособие / Э.М. Баширова, И.Г. Хуснутдинова. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. – 48 с.
- 7 Материалы Открытого семинара «Экономические проблемы энергетического комплекса» (Семинар А.С. Некрасова). Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью: структура, методические принципы, система управления // Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Иркутск, 2013.
- 8 Материалы Открытого семинара «Экономические проблемы энергетического комплекса» (Семинар А. С. Некрасова). Интегрированные интеллектуальные энергетические системы – энергетика будущего // Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. Иркутск, 2016.

9 Фортов, Е. В. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / под ред. Е. В. Фортова, А. А. Макарова. – М.: ФСК ЕЭС. 2012. – 235 с.

10 Стандарт организации ПАО «РОССЕТИ» СТО 34.01-21-005-2019.

11 Вариводов, В.Н. Интеллектуальное высоковольтное оборудование для распределительных электрических сетей. Основные направления создания комплекса оборудования для интеллектуальных электрических сетей / В.Н. Вариводов, А.Г. Мордкович, Е.И. Остапенко, А.Н. Панибратец, Г.М. Цфасман, В.С. Чемерис, Р.Н. Шульга // <https://www.elec.ru/articles/osnovnye-napravleniya-sozdaniya-kompleksa-oborudov/>.

12 Глущенко, П. В. Интеллектуальный алгоритм мультиагента поддержки принятия решения по данным диагностирования в сетевой электроэнергетике / П. В. Глущенко // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Экономика. – 2014. – Вып. 1.

13 Баширов М.Г. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. пособие / М.Г. Баширов, Н.А. Деревянко, И.Г. Хуснутдинова. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. – 50 с.

14 Волошин А.А. Интеллектуальная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем <https://www.facebook.com/EnergyInsight/> .

Учебное издание

Баширов Мусса Гумерович
Баширова Эльмира Муссаевна,
Юсупова Ильвина Гамировна

Интеллектуальные средства и системы управления и защиты
электрических сетей

Редактор

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. . Тираж экз. Заказ .

Издательство
Уфимского государственного нефтяного
технического университета

Адрес издательства:

450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1