

Редколлегия и редакция журнала «Электричество» поздравляют Всероссийский электротехнический институт с юбилеем, желают здоровья и творческих успехов его сотрудникам и не сомневаются в том, что дальнейшее плодотворное сотрудничество ВЭИ и старейшего российского издания будет способствовать развитию актуальных направлений отечественной электротехники.

В этом и следующем номерах «Электричества» публикуется ряд статей ученых ВЭИ, в некоторой степени отражающих широту научно-технической тематики института.

* * *

Интеллектуальные электроэнергетические системы

ВАРИВодов В.Н., КОВАЛЕНКО Ю.А.

Проводится анализ современного видения и концепции развития интеллектуальных электроэнергетических систем. Отмечены основные направления развития: повышение управляемости, энергоэффективности, качества и надежности электроснабжения; появление «высокоамперных» линий электропередачи, новых информационных технологий; создание экологичных и безопасных для общества электроэнергетических объектов. Рассматриваются базовые технологии интеллектуальных электроэнергетических систем, таких как системы коммуникации на основе современных цифровых автоматизированных систем, новейшие программно-аппаратные комплексы, устройства FACTS, новое поколение микропроцессоров — IED (интеллектуальные электронные устройства), интеллектуальное оборудование и др. Результаты и выводы работы определяют новые технические требования к электротехническому комплексу электроэнергетических систем.

Ключевые слова: интеллектуальные электроэнергетические системы, концепции развития, базовые технологии, технические требования

Основные требования к интеллектуальным электроэнергетическим системам были представлены в статьях и докладах еще в 90-х годах прошлого века. Через несколько лет за рубежом для описания интеллектуальных электроэнергетических систем стал использоваться термин «smart grid». Необходимо отметить, что этот термин более точен, чем часто применяемое в России определение «интеллектуальные (или умные)» электроэнергетические системы, так как «smart» — это не только интеллект, но и удобство, безопасность, коммуникабельность.

Под «умной» следует понимать энергоэффективную систему, которая адекватно и оптимально реагирует на любые внешние и внутренние технологические возмущения, обеспечивая при этом

The modern view on smart electric power systems and the concept of their development are analyzed. The main lines of their development are pointed out, the list of which includes the following: achieving better controllability and energy efficiency, better quality and higher reliability of power supply, introduction of high-ampacity electric power lines, new information technologies, and construction of electric power facilities friendly for the environment and safe for the society. Basic technologies of smart electric power systems are considered, such as communication systems constructed on the basis of modern digital automated systems, the newest computerized automation systems, flexible AC transmission systems, new-generation microprocessors known as intellectual electronic devices, intellectual equipment, etc. The results of the performed study and the conclusions drawn from them determine new technical requirements for the set of electrical equipment of electric power systems.

Key words: smart electric power systems, development concepts, basic technologies, technical requirements

удобство, экологичность и безопасность для общества.

Таким образом, интеллектуализация электроэнергетики (как внедрение новейших информационных технологий управления, защиты и мониторинга состояния оборудования и систем для повышения управляемости энергосистем) является одной из важнейших, но не единственной тенденцией развития электрических сетей XXI в.

На рис. 1 приведены основные, по мнению авторов статьи, тенденции развития электроэнергетических систем в XXI в. Как видно из диаграммы, основой интеллектуализации систем является повышение автоуправляемости на основе новых информационных технологий, применения новейших



Рис. 1. Основные тенденции развития электрических сетей в XXI в.

системных силовых устройств FACTS, автоматизированных цифровых систем управления, а также систем контроля состояния оборудования в режиме реального времени. Кроме того, особенностями современных энергосистем должны стать: «высоковольтные» линии электропередачи, максимальная компактность энергетических объектов, их экологичность и безопасность, высокое качество и надежность электроснабжения.

Можно выделить три уровня интеллектуализации электроэнергетических систем: верхний – интеллектуализация энергосистемы в целом, как единой мегасистемы; средний – интеллектуализация

комплексов оборудования (например электростанций или подстанций); наконец, интеллектуализация отдельных видов силового оборудования и технологических комплексов потребителей (например «умных» домов, «умных» улиц).

Все три уровня связаны между собой: интеллектуальную электроэнергетическую систему следует рассматривать как единый технологический комплекс, состоящий из электростанций, электрических сетей (магистральных и распределительных), устройств локального электроснабжения потребителей, специальных силовых системных устройств, а также современных систем управления, работаю-

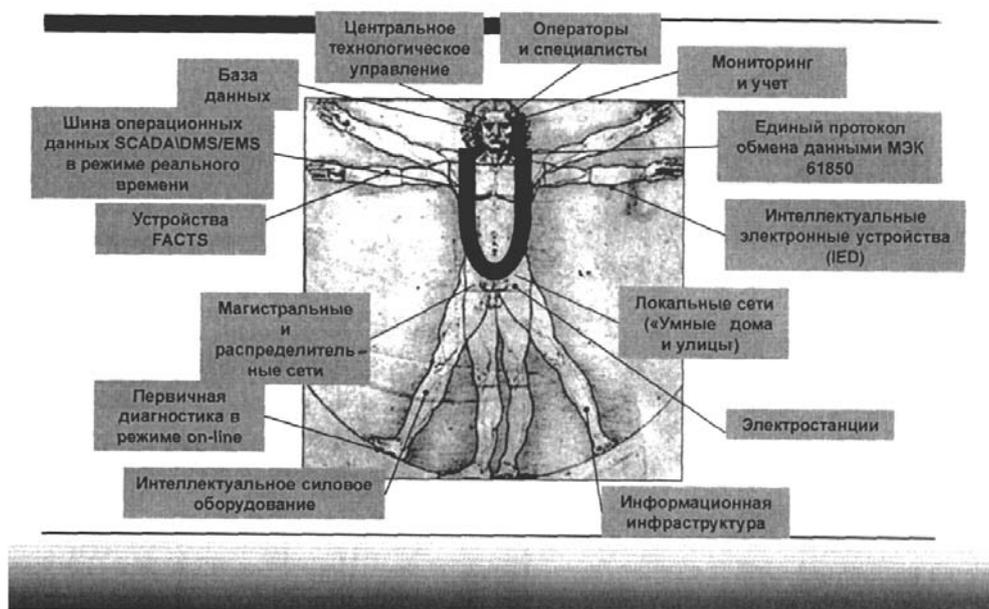


Рис. 2. «Умные» сети как единый технологический комплекс

ших в режиме реального времени и взаимосвязанных.

Иногда «интеллектуальную» или «умную» электроэнергетическую систему связывают только с потребителями (многофункциональные счетчики, «умные» дома и т.д.). Появилась концепция «активно-адаптивных» сетей, в основном применительно к магистральным сетям. С точки зрения авторов, такое разделение – условно, должно использоваться только как инструмент синтеза при решении задачи создания интеллектуальных электроэнергетических систем (такая система – единый технологический комплекс).

Образно «умную» энергосистему как некий единый организм можно представить с помощью иллюстрации, показанной на рис. 2. Она опирается как бы на двойное основание: интеллектуальное силовое оборудование и информационную инфраструктуру. Инструментами адаптивной подстройки к внешним и внутренним технологическим изменениям среды являются две «руки» – силовые устройства подстройки FACTS (устройства управляемых систем электропередачи электроэнергии) и электронные устройства тонкой подстройки – новое поколение микропроцессоров IED (интеллектуальные электронные устройства).

Интеллектуальные электронные устройства многофункциональны и используются, в первую очередь, как процессоры, а также как цифровые датчики информации и средства автоматизации; IED собирают данные, а затем выполняют дополнительные расчеты и реализуют логику принятого алгоритма. Важно, что в дополнение к текущим значениям эти приборы записывают информацию о состоянии, эксплуатационных характеристиках и истории объекта. Это и составляет «интеллект» IED, который они проявляют в процессе эксплуатации оборудования энергосистем. Протоколы и каналы связи, имеющиеся в IED и устройствах связи, позволяют интегрировать информацию.

Управляется энергосистема из центра («мозга»), включающего базу данных, технологические системы управления, операторов и диспетчеров. Язык общения – протокол IEC 61850, нервная система – единая процессорная шина, позволяющая работать в реальном режиме времени [1]. Таким образом, «умная» энергосистема независимо от ее уровня – это единый интеллектуальный технологический комплекс.

Интеллектуальные силовые высоковольтные электротехнические устройства, устанавливаемые на подстанциях, – это прежде всего генераторы, трансформаторное оборудование, комплектно-распределительные устройства и системные силовые устройства, оснащенные «интеллектуальными» системами управления

Такой подход к «интеллектуальным» электроэнергетическим системам соответствует видению «smart grid» в ведущих зарубежных странах. В США понимание «smart grid» определено в принятом в 2007 г. документе «Об энергетической независимости и безопасности» («Energy Independence and Security Act»).

Создание «smart grid» – это модернизация всего комплекса генерации и доставки электроэнергии на основе усовершенствования управления, защиты, оптимизации технологических элементов электроэнергетической системы в их взаимосвязи – от централизованной и распределенной генерации, передачи электроэнергии при высоком напряжении, ее распределении, систем автоматизации, устройств хранения до конечных потребителей.

«Smart grid» будет характеризоваться двусторонним потоком как электроэнергии, так и информации. Она предусматривает переход к системе распределенных вычислений и коммуникаций для обеспечения доставки информации в режиме реального времени, а также расчет мгновенного баланса спроса и предложения электроэнергии в любой точке.

Основные параметры «smart grid» основаны на результатах работы американского научно-исследовательского центра EPRI в программе «IntelliGrid» [2], а также отражены в проектах «Modern Grid Initiative» (MGI) [3] и «Grid Wise Architectural Council» (GWAC) [4]. В этих работах сформулированы видение, архитектурные принципы, ограничения, преимущества, необходимые технологии, техническая политика применительно к «smart grid».

Концептуальная модель «smart grid», принятая в США, включает семь основных доменов: генерацию электроэнергии, ее передачу, распределение, потребителей, рынок, управление и сервисное обслуживание, связанных потоками передачи электроэнергии и информации. Определены и стандартизированы требования ко всем доменам модели «smart grid» и сформирована «дорожная карта» реализации модели. Отмечаются пять основных преимуществ «smart grid»: надежность и качество электроснабжения, прежде всего за счет повышения управляемости; безопасность; энергосбережение; высокий уровень экологии; экономичность.

Ключевые технологические инструменты для формирования «smart grid», по мнению американских разработчиков, следующие: интеллектуальное силовое оборудование; коммуникации на основе современных автоматизированных систем; база данных; автоматизированная система предотвращения несанкционированного доступа к управлению; программно-аппаратные комплексы.

Сопоставляя предложенное выше видение «интеллектуальной энергосистемы» с концепцией «smart grid», можно отметить их малое отличие, хотя степень реализации моделей различается.

Рассмотрим на примере блока (домена) передачи электроэнергии в электроэнергетической системе основные направления создания «интеллектуальных» магистральных сетей в России.

Основными силовыми устройствами магистральных сетей являются подстанционное оборудование (трансформаторы, распределительные устройства и системные силовые устройства), линии электропередачи и накопители энергии. Внутри магистральных сетей реализуется дополнительная инфраструктура, обеспечивающая в основном: управление высоковольтными аппаратами; измерение основных параметров сети; защиту от внешних и внутренних технологических воздействий; формирование базы данных о состоянии сети; системное (в данном случае – сетевое) технологическое управление с помощью устройств компенсации реактивной мощности и FACTS; мониторинг состояния элементов сети в режиме реального времени.

Сеть имеет активно-адаптивный характер: она снабжена активными элементами (в том числе устройствами FACTS), которые при любых технологических возмущениях обеспечивают адаптацию сети к этим возмущениям, обеспечивая ее устойчивость и стабильность. Внешними по отношению к магистральным сетям являются домены генерации, распределительных сетей, управления электроэнергетической системой и рынка электроэнергии.

К системным силовым устройствам прежде всего относятся FACTS – статические тиристорные компенсаторы (СТК), управляемые продольные компенсаторы, СТАТКОМы, фазоповоротные трансформаторы, управляемые электрические реакторы, вставки постоянного тока и т.д. Эти устройства способны обеспечивать векторное регулирование параметров сети и качество электроснабжения.

В чем же должен состоять «интеллект» силового электротехнического оборудования? В соответствии с приведенным выше определением «интеллектуальной» электроэнергетической системы это должно быть энергоэффективное оборудование с качественно новым уровнем управления, экологически чистое, безопасное, надежное и удобное в эксплуатации. Новый уровень управления означает применение микропроцессоров, контроллеров, терминалов удаленного доступа (RTUs), интеллектуальных электронных приборов (IED).

Сегодня «интеллектуальным» следует называть оборудование, обеспечивающее максимально возможный контроль состояния всех его систем, само-

диагностику и выдачу рекомендаций по дальнейшим действиям в случае появления развивающегося повреждения или ненормированного воздействия. Принципиально важно, что при этом устройство должно обеспечивать автоматический режим управления своими регулируемым подсистемами, в том числе из удаленных центров управления, с полным контролем правильности исполнения команд.

Кроме того, «интеллектуальное оборудование» следует рассматривать как некую элементарную базовую ячейку «интеллектуальной» энергосистемы. И конечно, для «интеллектуальных» электроэнергетических систем необходимо наличие надежных системных средств, обеспечивающих управление и контроль, защиту и автоматизацию всей энергосистемы в целом, объединение отдельных комплексов и оборудования (прежде всего – АСУ системного уровня).

Наконец, важным новым свойством «интеллектуального оборудования» является возможность работы его систем управления, защиты, мониторинга не только «по вертикали» (через АСУ верхнего уровня), но и «по горизонтали» (через связь с другим оборудованием). Этому способствует использование протокола обмена по МЭК 61850 [5].

Существует два основных направления в создании «интеллектуального» оборудования повышенной управляемости.

Первое – разработка системы управления оборудованием, при которой воспринимается информация от первичных датчиков, осуществляется мониторинг состояния оборудования и управление подсистемами по определенному алгоритму, оценивается ресурс работы и готовность оперативных цепей. Анализ входной информации и выполнения оборудованием необходимых операций осуществляется по алгоритмам, учитывающим процессы,



Рис. 3. Компактное КРУЭ 110 кВ для «интеллектуальных» электроэнергетических систем (ВЭИ)



Рис. 4. Двухцепная линия с газовой изоляцией на напряжение 550 кВ («Сименс»)

происходящие в оборудовании, и внешние влияния. Алгоритмы разрабатываются с учетом принципиальных особенностей и конструкции оборудования.

В функциях управления оборудованием должна обеспечиваться возможность ручного и дистанционного изменения параметров управления. В соответствии с протоколом МЭК 61850 в шкафу управления оборудованием и его мониторинга должны быть предусмотрены связи для передачи взаимной информации соответствующим системам смежных устройств и системам верхнего уровня.

Второе направление создания интеллектуального оборудования — оснащение его современными датчиками повышенной функциональности и точности с возможностью передачи цифровых сигналов (например магнитно-чувствительные кабели), электромагнитные датчики без сердечника, оптические датчики, использующие эффект Поккельса и т.д.).

Применяемые методы измерения параметров должны оцениваться по критериям, учитывающим стоимость устройств, линейность передачи и частотный диапазон измерений, устойчивость к внешним воздействиям и соответствие требованиям релейной защиты. Защита от внешних и внутренних технологических воздействий, в том числе релейная защита, для «интеллектуальных» электроэнергетических систем также должна быть усовершенствована в части измерительных устройств, применяемых приборов, алгоритмов защиты, протоколов передачи сигналов.

Мониторинг состояния объектов энергосистемы приобретает первоочередное значение. Например, мониторинг режима проводов ЛЭП (температура, провис и др.) и корректировка режима электропередачи могут дать увеличение пропускной способности до 20%.

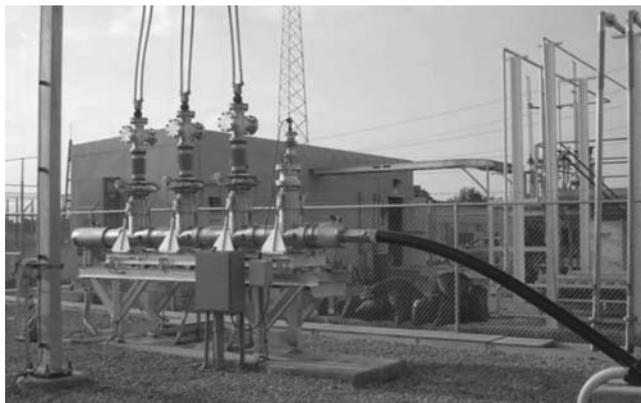


Рис. 5. ВТСП кабель (NKT-cable) на напряжение 20 кВ в опытно-промышленной эксплуатации



Рис. 6. Статический тиристорный компенсатор 220 кВ («Ансальдо-ВЭИ») в промышленной эксплуатации

Важнейшим направлением в развитии трансформаторов с точки зрения повышения их надежности, экологичности, энергоэффективности и безопасности является создание пожаро- и взрывобезопасных трансформаторов со сниженными потерями (применение негорючих изоляционных жидкостей, аморфных сталей, склеенных транспонированных проводов, упрочненной меди и т.д.).

Совершенствование распределительных устройств для «интеллектуальных» электроэнергетических систем — это прежде всего применение КРУЭ 110–220 кВ с расположением фаз в одной оболочке и оптоэлектронными измерительными устройствами (рис. 3), использованием вместо элегаза экологически чистых альтернативных газов и смесей, применением дугогасительных устройств с вакуумными камерами на напряжение 110–220 кВ, газоизолированных токопроводов и линий электропередачи, а в перспективе — высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) линий электропередачи.

Необходимо отметить, что применение традиционных кабелей в «интеллектуальных» электрических сетях связано с рядом проблем: существующие кабели рассчитаны на критические мощности примерно до 1700 МВт и плохо приспособлены для передачи энергии на расстояния свыше нескольких

десятков километров; диэлектрические потери в них также весьма велики; кабели не являются экологически чистыми, как правило, пожароопасны, а электромагнитные поля в них недостаточно локализованы; существуют технологические проблемы при вертикальной прокладке кабелей; переход от воздушных линий электропередачи к кабелям требует изменения систем автоматики и релейной защиты; при применении длинных кабелей традиционного исполнения требуются устройства компенсации реактивной мощности.

Линии с газовой изоляцией (рис. 4) лишены этих недостатков: они имеют высокую пропускную способность, практически не ограничены по длине, полностью пожаробезопасны, потери в них минимальны, для них не существует технологических проблем при вертикальной прокладке и нет необходимости в перестройке систем РЗА и применении устройств компенсации реактивной мощности.

Кардинальным решением по увеличению рабочих токов передающих электроэнергию линий, повышению их безопасности и экологичности является применение высокотемпературных сверхпроводящих кабелей, рабочий ток в которых при тех же радиальных габаритах токоведущей жилы может быть увеличен в 7–10 раз. Создание в 2002–2003 гг. высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения резко активизировало в мировой энергетике работы по их практическому применению (рис. 5). Наиболее существенным препятствием для широкого использования ВТСП кабелей является технологическая отработка производства лент сверхпроводников, их соединений, обеспечение стабильности свойств. Поэтому реального широкого применения ВТСП кабелей с учетом имеющегося опыта внедрения принципиально новых технологий в электроэнергетике не следует ожидать в ближайшие годы. Однако применение ВТСП кабелей как элемента «интеллектуальных» электроэнергетических систем (как и ВТСП трансформаторов, генераторов) в перспективе не вызывает сомнения.

Среди системных силовых устройств в последние годы в России наибольшее распространение получили статические тиристорные компенсаторы (рис. 6) и управляемые шунтирующие реакторы. Дальнейшее развитие таких устройств связано прежде всего с применением многофункциональных преобразовательных устройств, использующих управляемые полупроводниковые приборы (на основе технологий IGBT, IGCT и др. Важнейшее значение имеют также разработка и внедрение новых экономичных и эффективных токоограничителей (сверхпроводниковых, полупроводниковых и др.) взамен устаревших токоограничивающих реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hossenlopp L., Chatrefou D., Tholomier D., Bui D.P.** Process bus: Experience and impact on future system architectures. — CIGRE 42d session, Paris, 2008, Paper B5-104 (Frohlich K. Strategic directions 2010–2020).
2. **EPRI's IntelliGridSM initiative** : <http://intelligrid.epri.com>
3. **The Modern Grid Initiative Version 2.0**, Conducted by the National Energy Technology Reliability, January 2007 : <http://www.netl.doe.gov/moderngrid/resources.html>
4. **GridWise Architecture Council** : <http://www.gridwiseac.org>
5. **Adamiak M., Kasztenny B., Mazereeuw J. et al.** Considerations for IEC 61850 Process Bus Deployment in Real-world Protection and Control Systems: a business analysis. — CIGRE 42d session, Paris, 2008, Paper B5-102.

Авторы: Вариводов Владимир Николаевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1971 г. В 2000 г. в ВЭИ защитил докторскую диссертацию «Внутренняя изоляция газонаполненных устройств сверхвысокого напряжения». Первый заместитель генерального директора по науке и инновациям ФГУП ВЭИ.

Коваленко Юрий Алексеевич окончил факультет общеприкладной физики Московского физико-технического института в 1972 г. В 1995 г. в ВЭИ присуждена ученая степень доктора физико-математических наук за работу «Физические принципы построения и методы расчета газонаполненных ускоряющих систем с плазменными эмиттерами заряженных частиц». Генеральный директор ФГУП ВЭИ.