

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЛЭП В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

АВТОРЫ:

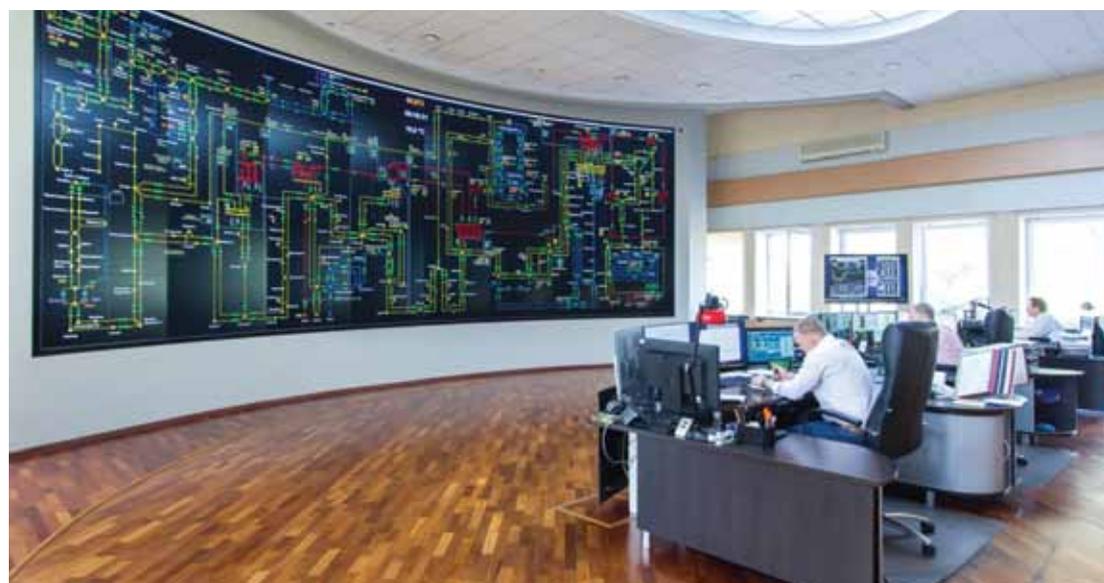
А.Е. МУРОВ,
Д.Э.Н.,
«РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Д.И. ПАНФИЛОВ,
Д.Т.Н.,
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЦЕНТР «РОССЕТИ
ФСК ЕЭС»

Развитие и внедрение современных технологий в области генерации, передачи и потребления электрической энергии оказывает все большее влияние на состояние энергосистемы. Это отражается на режимах работы, качестве электрической энергии, надежности электроснабжения, потерях энергии в электрических сетях. Развитие цифровой энергетики, основанной на мониторинге со-

стояния энергосистемы и методах цифрового управления режимами работы линий электропередачи, создает предпосылки к реализации эффективного управления состоянием энергосистемы с учетом общесистемных факторов. При этом одним из существенных инструментов, способствующих достижению поставленных задач, является разработка и внедрение современных технологий управления режимами работы ЛЭП.

Ключевые слова: цифровая энергетика; линии электропередачи; управление режимами работы; устройства силовой электроники; технико-экономические эффекты; фазоповоротные устройства; источники реактивной мощности; устройства продольной компенсации; регуляторы напряжения.



Современный диспетчерский центр управления электрическими сетями

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЛЭП

Безопасное и эффективное функционирование электроэнергетических систем в условиях активного внедрения в отрасли принципов цифровой экономики подразумевает использование двух технологических базисов: применение цифровых систем мониторинга процессов и широкомасштабное внедрение технологий быстродействующего цифрового управления режимами работы линий электропередачи.

Активное развитие промышленного производства сопровождается ростом электропотребления, высокой динамикой изменения нагрузок и увеличивающейся неоднородностью их характера. Это приводит к ужесточению требований к функционированию энергосистем, а также к необходимости мониторинга и управления процессами в ЛЭП. Современные системы мониторинга, в основе которых лежит использование векторных измерений, позволяют получать в режиме реального времени достоверную информацию об установившихся и переходных процессах в энергосистемах.

На состояние энергосистемы значительное влияние оказывает ряд факторов, среди которых можно выделить: резкие изменения параметров источников электроэнергии (вероятность этого возрастает ввиду активного внедрения объектов распределенной генерации и возобновляемых источников энергии), наличие мощных нелинейных и динамически изменяющихся нагрузок, аварийных процессов различного происхождения, ремонтных режимов, изменений физических параметров ЛЭП, связанных с погодными условиями, режимов

работы силового оборудования подстанций и др.

Быстродействующее управление режимами работы ЛЭП позволяет оперативно решать задачи поддержания заданных параметров передачи и распределения энергии, обеспечивать требуемое качество энергии у потребителей, повышать надежность работы энергосистемы в статических и динамических режимах, повышать пропускную способность ее отдельных сечений и уменьшать потери энергии при ее передаче конечным потребителям.

В большинстве случаев активное управление режимами работы требует формирования физических воздействий, компенсирующих лишь изменения потоков электроэнергии, связанные с воздействием возмущающих факторов. При этом по абсолютной величине установленная мощность устройств управления режимами оказывается существенно меньшей, чем мощность, передаваемая по ЛЭП, что определяет относительно низкие капитальные затраты при их внедрении.

Развитие цифровой энергетики создает основу для разработки и эффективного применения инновационных технологий построения устройств управления режимами работы ЛЭП с возможностью получения значительного технико-экономического эффекта. Однако следует подчеркнуть, что достижение суммарного положительного эффекта занимает достаточно длительный промежуток времени и базируется на решении комплекса научно-технических задач.

«Россети ФСК ЕЭС» активно работает в данном направлении, стимулируя создание отечественных аппаратно-программных платформ управления режимами работы ЛЭП, ориентированных на применение в магистральных и распределитель-

ных сетях. Такие платформы построены на основе управляемых устройств силовой электроники с цифровыми системами управления и способны функционировать как в автономном режиме, так и при реализации централизованного управления.

За последние 10 лет «Россети ФСК ЕЭС» и рядом ведущих научно-исследовательских центров РФ реализован ряд крупных проектов по созданию инновационных технологий построения аппаратно-программных платформ на базе устройств силовой электроники, реализующих эффективное быстродействующее управление режимами работы ЛЭП. Настоящая статья посвящена описанию особенностей данных технологий и эффектов, достигаемых за счет их внедрения на объектах электроэнергетики.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Технологии построения и применения устройств силовой электроники могут существенно различаться в зависимости от областей их применения и решаемых задач. В магистральных сетях управление режимами работы ЛЭП осуществляется за счет управления напряжением на концах линий электропередачи или изменения их физических параметров.

Первая технология подразумевает введение источника напряжения, управляемого по фазе и по модулю. Такие источники напряжения, по существу, являются фазоповоротными

устройствами (ФПУ), управляющими как абсолютной величиной, так и фазовым сдвигом напряжения на выходе относительно напряжения на входе в месте установки в ЛЭП (рис. 1). Управление ФПУ осуществляется с помощью полупроводникового (тиристорного) коммутатора, дискретно изменяющего напряжение на выходе устройства. Высокая дискретность управления регулируемых параметров ФПУ, достигающая значений 16–32–64, обеспечивает возможность плавного непрерывного управления режимами работы ЛЭП. ФПУ могут с успехом применяться для ограничения токовых перегрузок ЛЭП в ремонтных режимах, перераспределения потоков мощности в сечениях энергосистемы, управления потоками мощности в параллельно работающих ЛЭП различных классов напряжений, снижения потерь энергии при ее передаче, а также повышения устойчивости энергосистемы к низкочастотным колебаниям.

Быстродействие является одним из существенных параметров ФПУ. Значительный технико-экономический эффект может быть достигнут за счет организации непрерывного

активно-адаптивного управления режимом работы ЛЭП в темпе процесса. Определение режима работы ФПУ может быть осуществлено исходя из критерия достижения заданного системного эффекта от его применения или из решения локальных задач в конкретном месте установки устройства. В любых случаях программное обеспечение цифровой системы управления ФПУ должно адаптировать управление режимом работы ЛЭП для каждого конкретного места его установки с учетом параметров режима ЛЭП. Такое свойство позволяет обеспечивать максимально эффективное функционирование современных ФПУ для любых мест их установки.

Вторая технология управления потоками мощности в магистральных сетях основывается на изменении физических параметров ЛЭП. Это достигается путем применения устройств продольной компенсации, позволяющих вносить дополнительное реактивное сопротивление. В зависимости от принципа работы и выбранной концепции построения такие устройства могут вводиться в ЛЭП как фиксированное, так и дискретно регулируемое

реактивное сопротивление одного характера (индуктивное или емкостное). Кроме того, они могут управлять одновременно и характером, и величиной вводимого реактивного сопротивления.

Современные мировые тенденции обуславливают создание устройств подобного класса в малогабаритном исполнении для распределенного размещения на ЛЭП. Особенностью таких устройств является небольшая величина вводимого реактивного сопротивления, определяющего формирование дополнительной реактивной мощности. Как правило, мощность одного устройства составляет порядка 5–100 кВАр. Она ограничивается массогабаритными показателями, поэтому такие устройства называются малогабаритными устройствами продольной компенсации (МУПК). Поскольку они размещаются непосредственно на проводах или опорах (рис. 2), при современных материалах и технологиях практически невозможно достичь большей реактивной мощности, вводимой одним МУПК. Поэтому для обеспечения требуемой суммарной величины вносимого реактивного сопротивления при-

МУПК НА ЛЭП 110 КВ



Рис. 2

меняется несколько устройств, распределенных на одной ЛЭП. При постоянных перегрузках технология применения МУПК является экономически обоснованной альтернативой построения дополнительной линии электропередачи. Устройства легко монтируются на проводах или опорах и могут перемещаться с одной ЛЭП на другую. В условиях плотной городской застройки и высокой стоимости землеотвода МУПК также могут являться экономически эффективной альтернативой устройствам продольной компенсации стационарного исполнения.

На сегодняшний день разработаны опытно-промышленные образцы МУПК, построенные на основе трансформатора с изменяемым реактивным элементом на его вторичной обмотке, а также трансформатора с регулируемым коэффициентом трансформации на основе технологии СТАТКОМ. Созданные МУПК могут работать автономно или под воздействием сигнала внешнего управления.

Дополнительным инструментом управления режимами работы электрических сетей является применение управляемых источников реактивной мощности, подключаемых в различных точках ЛЭП. Такой подход используется для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения в месте установки ее источников.

В настоящее время в дополнение к широко распространенной технологии построения управляемых источников реактивной мощности на базе технологий СТК и УШР с подмагничиванием, использующих методы нелинейного управления для регулирования действующего значения реактивного тока, развиваются методы управления реактивным током, основанные на изменении эквивалентной величины реактивного элемента при сохранении постоянной величины синусоидального напряжения на нем (рис. 3). В данном случае дискретное регулирование эквивалентной величины реактивного сопротивления осуществляется за счет управления комбинацией различного включения ограниченного набора реактивных элементов, входящих в состав устройства.

Реализация необходимых комбинаций включения реактивных элементов устройства с целью получения различных значений эквивалентного реактивного сопротивления

осуществляется тиристорным коммутатором. При этом из ограниченного количества реактивных элементов с помощью подбора их величин можно получить большое количество практически равномерно распределенных эквивалентных значений реактивных сопротивлений устройства. Например, на базе четырех реактивных элементов с помощью различных комбинаций их включения можно получить 25 значений эквивалентных реактивных сопротивлений устройства, а использование пяти реактивных элементов позволяет реализовать 64 эквивалентных значения реактивных сопротивлений. Равномерное распределение уровней эквивалентных значений реактивных элементов дает возможность практически плавно регулировать реактивную мощность, генерируемую устройством.

Одним из основных достоинств такой технологии построения управляемых источников реактивной мощности является синусоидальная форма реактивного тока во всем

ФАЗОВОРОТНОЕ УСТРОЙСТВО С ТИРИСТОРНЫМ КОММУТАТОРОМ

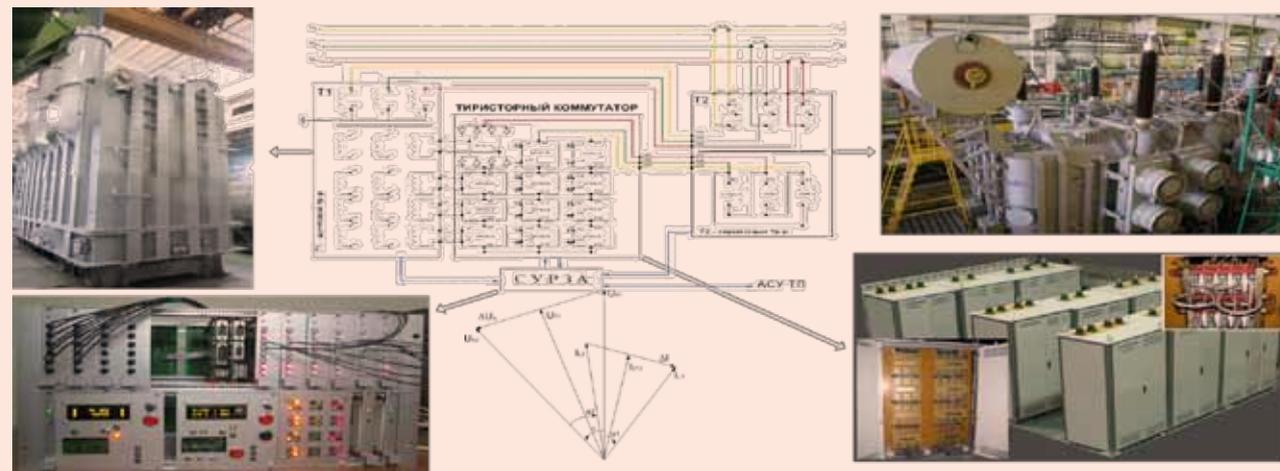
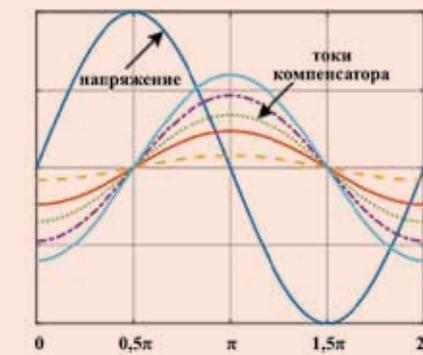


Рис. 1

УПРАВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ИНДУКТИВНОГО ХАРАКТЕРА (А) И ВРЕМЕННЫЕ ДИАГРАММЫ НАПЯЖЕНИЯ И ТОКА ИСТОЧНИКА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ (Б)



а)



б)

Рис. 3

диапазоне регулирования реактивной мощности и предельно высокое быстродействие, сравнимое с периодом сетевого напряжения. Эти устройства не влияют на качество электроэнергии в сетях и не требуют применения в своем составе настроенных фильтров для подавления высших гармоник тока.

При другом инновационном подходе, реализуемом при построении управляемых источников реактивной мощности, используется принцип регулирования синусоидального напряжения, прикладываемого к реактивному элементу. При этом реактивный элемент устройства может иметь как индуктивный, так и емкостной характер. По существу, такие устройства строятся на основе регуляторов переменного синусоидального напряжения, обеспечивающих широкий диапазон изменения синусоидального напряжения на своем выходе. К достоинствам данных устройств, как и в предыдущем случае, можно отнести синусоидальную форму реактивного тока во всем диапазоне его регулирования, высокое быстродействие (соизмеримое с периодом напряжения сети), возможность получения большого количества дискретных уровней регулирования реактивной мощности при высоких общих технико-экономических показателях.

Цифровые системы управления вышеописанных источников реактивной мощности могут работать в автономном режиме или по сигналам внешнего управления, обеспечивая компенсацию реактивной мощности или управление напряжением в месте подключения устройства в ЛЭП. Программное обеспечение должно также осуществлять автоматическую адаптацию управления устройством к изменениям параметров режима линии электропередачи.

Построение и применение надежных и быстродействующих устройств

регулирования напряжения ЛЭП является еще одной важной научно-технической задачей. В магистральных сетях она решается с помощью применения электромеханических регуляторов напряжения под нагрузкой в составе высоковольтных трансформаторов (РПН). В распределительных сетях 35/20/10/6/0,4 кВ перспективной технологией управления напряжением на стороне высокого напряжения трансформаторов, имеющих промежуточные отпайки обмотки высокого напряжения, является технология быстрого действия полупроводниковых управляемых регуляторов напряжения трансформаторов под нагрузкой. Технология использует переключение промежуточных отпаек высоковольтной обмотки трансформатора под нагрузкой без прерывания тока нагрузки с помощью полупроводниковых управляемых ключей.

Отличительной особенностью такой технологии является высокое быстродействие и надежность работы регулятора, определяемые параметрами современных быстродействующих высоконадежных полупроводниковых ключей (тиристоров) и цифровыми системами управления, позволяющими обеспечивать надежный процесс переключения полупроводниковых ключей при различном характере нагрузок. Регулирование выходного напряжения трансформаторов дает возможность обеспечивать требуемое качество электроэнергии у потребителей и управлять передаваемой по ЛЭП мощностью путем получения дополнительного экономического эффекта за счет поддержания напряжения в узлах подключения электроприемников в нормируемых пределах и снижения транспортных потерь электроэнергии. Несомненно, уже в обозримом будущем непрерывное совершенствование характеристик современных высоковольтных полупроводниковых ключей позволит распространить данную технологию

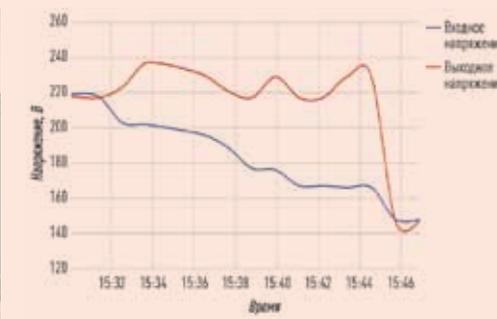
и на устройства управления напряжением для сетей 110 кВ и выше.

Одной из актуальных проблем распределительных сетей является обеспечение нормируемых показателей качества электроэнергии у потребителей с односторонним питанием, находящихся на значительном удалении от трансформаторных подстанций. Как правило, в узлах подключения таких потребителей установившееся отклонение напряжения выходит за рамки нормируемого диапазона. Данный параметр зависит от передаваемой по ЛЭП мощности, а потому существенно колеблется в течение суток. Обеспечить необходимое качество электроэнергии у таких потребителей можно за счет реконструкции ЛЭП, что требует значительных затрат. Альтернативой является использование регуляторов напряжения на основе вольтодобавки — бустеров (рис. 4), питающихся от распределительной сети и формирующих регулируемое напряжение на своем выходе, вводимое последовательно в ЛЭП. Таким образом, выходное напряжение бустера позволяет повысить напряжение на нагрузке в часы повышенного потребления мощности и сохранять его в рамках нормируемого диапазона. Во многих случаях применение бустеров является экономически более эффективным инструментом решения вышеописанной проблемы по сравнению с затратами на реконструкцию линии электропередачи. Современные бустеры строятся на основе полупроводниковых преобразователей электроэнергии, обладающих высоким быстродействием и надежностью работы в широком диапазоне изменения нагрузок. Выходное напряжение таких бустеров имеет синусоидальную форму, поэтому данный класс устройств не оказывает негативного влияния на гармонический состав напряжений в узлах подключения потребителей. Высокое быстродействие бустеров

БУСТЕР 50 КВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4 КВ (А) И ФРАГМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 0,4 КВ НА ОБЪЕКТЕ УСТАНОВКИ (Б)



а)



б)

Рис. 4

позволяет оперативно реагировать на изменение передаваемой по ЛЭП мощности и соответствующим образом изменять напряжение вольтодобавки. Такие устройства, как правило, работают в автономном режиме и реализуют однонаправленную передачу данных о своем текущем состоянии для оперативной оценки диспетчером их работоспособности. Однако цифровые системы уже сегодня предусматривают возможность полноценной интеграции бустеров в информационную структуру автоматизированных систем технологического управления распределительных сетей.

Регуляторы синусоидального напряжения, использующие современные технологии построения и элементную базу силовой электроники, будут находить все более широкое применение в электрических сетях. Это следует из их высоких технико-экономических характеристик, быстродействия, способности работать в широком диапазоне изменения

нагрузок автономно или в структуре автоматизированных систем технологического управления цифровых электрических сетей. К достоинствам таких устройств можно отнести и развитое программное обеспечение систем их управления, способных автоматически адаптировать регулировочные характеристики к параметрам режима ЛЭП в местах установки.

В ряде случаев с помощью одного устройства можно одновременно решать несколько задач, связанных с повышением качества электроэнергии в сетях. В качестве примера можно указать на возможность применения регуляторов напряжения с широким диапазоном регулирования выходного синусоидального напряжения для построения устройств подключения мощных динамически изменяющихся нагрузок. Известно, что при прямом пуске асинхронных двигателей от сети происходит бросок пускового тока. Для ограничения этого применяются

различные пусковые устройства, осуществляющие подачу на статорные обмотки пониженного напряжения, что обеспечивает снижение токов в сети при пуске таких двигателей. Однако при работе в установившемся режиме асинхронный двигатель потребляет реактивную мощность, сравнимую по абсолютной величине с его активной мощностью. Компенсация реактивной мощности является второй важной задачей, которую необходимо решать при работе двигателя в установившемся режиме.

В настоящее время существуют инновационные разработки, позволяющие решить эти две задачи с помощью одного устройства — регулятора переменного напряжения. На интервале пуска двигателя он используется для регулирования уровня напряжения, подводимого к статорным обмоткам двигателя. После выхода в установившийся режим регулятор, дополнительно содержащий в своем составе конденсаторную батарею, переводится в режим компенсации реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем от сети. Во втором режиме асинхронный двигатель вместе с регулятором переменного напряжения будет представлять для питающей сети чисто активную нагрузку. Основные эффекты применения данного решения связаны с повышением качества электроэнергии у потребителей, уменьшением потерь в ЛЭП за счет разгрузки электросетевого оборудования от реактивного тока, потребляемого двигателем.

Таким образом, существующий уровень развития элементной базы и технологий построения устройств силовой электроники дает в руки энергетиков широкий спектр устройств, позволяющих решать задачи управления режимами работы ЛЭП различных классов напряжения (от 500 кВ до 0,4 кВ) и в различных режимах (нормальных, динамических, ремонтных и аварийных). Диа-

пазон мощностей таких устройств достаточно широк — от десятков киловатт до сотен мегаватт. Актуальной задачей, стоящей перед энергетиками, является эффективное использование данных устройств в энергосистемах с целью получения существенного технико-экономического эффекта от их применения.

ДОСТИЖЕНИЕ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ЛЭП В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Создаваемые сегодня отечественные устройства силовой электроники, предназначенные для управления режимами работы ЛЭП, по технико-экономическим показателям не уступают лучшим мировым аналогам. При этом инновационные подходы к их построению и управлению строятся на отечественной элементной базе и имеют отечественное программное обеспечение, что дополнительно гарантирует безопасность их функционирования.

Эффективное применение таких устройств в условиях цифровой энергетики должно базироваться на получении суммарного положительного экономического эффекта в течение всего срока эксплуатации оборудования. К положительным эффектам от управления режимами работы ЛЭП посредством аппаратно-программных платформ, базирующихся на технологиях

силовой электроники и цифровых принципах управления, можно отнести: снижение потерь при передаче и распределении электроэнергии; повышение пропускной способности ЛЭП; направленное перераспределение потоков электроэнергии между отдельными сечениями энергосистемы; рост качества электроэнергии у потребителей; повышение надежности электроснабжения; устранение перегрузок отдельно взятых ЛЭП в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах работы; экономия на капитальном строительстве; увеличение срока службы оборудования подстанций; повышение безопасности функционирования электроэнергетических систем в целом и др.

Применение отдельно взятых технологий управления режимами работы ЛЭП на конкретных объектах требует предварительного детального анализа ожидаемых технико-экономических эффектов. Как правило, интегральный положительный эффект использования данных технологий может представлять собой совокупность комплекса эффектов, достигаемых посредством активно-адаптивного управления режимами работы ЛЭП в течение всего срока эксплуатации оборудования. Комплексный расчет интегрального эффекта, так же как и расчет режимов работы ЛЭП и управляющих воздействий на исполнительные органы, представляет собой сложную научно-техническую задачу. Ее невозможно решить без разработки моделей устройств управления, программ анализа статических и динамических режимов работы энергосистемы. Это позволит создавать цифровые двойники энергосистем, на основе которых можно анализировать влияние процессов регулирования режимов работы ЛЭП на достижение интегрального технико-экономического эффекта применения тех или иных технологий управления, а также определять необходимые управляющие воздей-

ствия на исполнительные органы устройств управления с целью его дальнейшей практической реализации.

С этой точки зрения цифровая энергетика как комплекс, оснащенный современными инновационными средствами мониторинга и управления режимами работы ЛЭП, может представлять собой единый эффективно функционирующий механизм, отвечающий современным критериям надежности, безопасности и технико-экономической эффективности. Описанные технологии управления режимами работы ЛЭП являются основой практической реализации положений концепции цифровой трансформации энергетики и перехода к новому этапу развития отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция «Цифровая трансформация 2030» ПАО «Россети». URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf.
2. Асташев М.Г., Панфилов Д.И. Фазоповоротное устройство с тиристорным коммутатором для активно-адаптивных электрических сетей / Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС»: Сб. ст. под общ. ред. А.Е. Мурова. М.: Издательство АО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2016, с. 144–154.
3. Панфилов Д.И., Шакарян Ю.Г., Асташев М.Г., Рашитов П.А., Антонов А.В. Малогабаритные устройства продольной компенсации для воздушных линий электропередачи // Электротехника. 2017. № 7. С. 78–82.
4. Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Петров М.И. Регуляторы напряжения — совместная разработка МЭИ, ЭНИН и компании «Изолятор» // Корпоративное издание компании «Изолятор». 2018. № 4. С. 20–30.
5. Архипов И.Л., Холкин Д.В., Новицкий Д.В., Сорочкин Д.В. Мультиагентная система управления напряжением и реактивной мощностью в электрических сетях — интеллектуальная система управления нового поколения // Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС»: Сб. ст. под общ. ред. А.Е. Мурова. М.: Издательство АО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2016. С. 288–304.



19 Всероссийская специализированная выставка

Электро-2020. Энергосбережение

• ЭЛЕКТРО

- Электротехническое оборудование
- Генераторы, трансформаторы, электроприводы
- Кабель, провод
- Светотехника
- Высокосовольтное и низковольтное оборудование
- КИП, автоматика
- Электроинструмент

• ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКА

- Электро-, гидро-, теплоэнергетика
- Нетрадиционная и возобновляемая энергетика
- СИП и ЛЭП
- Энергоэффективные, ресурсосберегающие технологии и оборудование
- Приборы и системы учета
- Тепло-, электро-, газоснабжение
- АСУТП, системы контроля

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ • ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- Тепловые, электрические сети
- Оборудование для магистральных и разводящих сетей
- Энергоменеджмент, энергоаудит



(8442) 93-43-02
www.volgogradexpo.ru

Генеральный
интернет-партнер
Официальный
партнер
Информационный
партнер



18-20
МАРТА

ВОЛГОГРАД
ЭКСПОЦЕНТР
пр. Ленина 65А