



ЭФФЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ FACTS И АСМ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Поспелова Т.Г.

Белорусский национальный технический университет

Реферат: *Выполнен анализ технологий и устройств FACTS и АСМ с оценкой эффектов их применения в региональных и национальных энергосистемах и многофункциональными соотношениями расчета энергоэффективности.*

Ключевые слова: *FACTS, АСМ, электроэнергетические системы, эффективность.*

EFFECTS OF APPLICATION OF FACTS AND AFM IN IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF REGIONAL AND NATIONAL ENERGY SYSTEMS

Pospelova T.G.

Belarusian National Technical University

Abstract. *The analysis of technology and FACTS devices and AFM with the assessment of the effects of their use in regional and national energy systems and energy efficiency of multi-function relationships of calculation was done*

Keywords: *FACTS, АСМ, power systems, the efficiency*

EFFECTELE DE APLICARE A FACTS ȘI AFM ÎN CREȘTEREA EFICACITĂȚII SISTEMELOR ELECTROENERGETICE REGIONALE ȘI NAȚIONALE

Pospelova T.G.

Universitatea Tehnică Națională din Bielorusia

Rezumat. *Analiza tehnologiilor și dispozitivelor FACTS și AFM pentru estimarea efectelor folosirii lor în sistemele energetice regionale și naționale și multi-funcționale raporturi de eficiență a calculelor.*

Cuvinte cheie: *FACT, АСМ, sisteme energetice, eficiența.*

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Тенденцией технического оснащения современных энергосистем в индустриально развитых странах становится применение гибких (управляемых) систем электропередач (FACTS - Flexible Alternative Current Transmission Systems) и асинхронизированных синхронных машин (АСМ) - разновидности данной категории технологий и устройств. Эта тенденция является предметом интенсивных научных исследований, так как FACTS и АСМ - перспективные средства обеспечения надежности и повышения эффективности электроэнергетических систем (ЭЭС) [1-7, 11, 12 и др.]. Применение технологий и устройств FACTS, которые в широком понимании [1,4] охватывают все сегменты электроэнергетических инфраструктур: генерация, транспорт, потребление электроэнергии, способствует предотвращению системных аварий, снижению количества аварийных отключений, позволяет оптимизировать системы электроснабжения.

Основные идеи управляемых электропередач и АСМ были предложены и разработаны советскими исследователями [8-10 и др.]. Сегодня эти идеи активно реализуются за рубежом на базе современной преобразовательной техники.

Термин FACTS появился в середине 80-х гг. прошлого столетия в связи с разработками европейских и североамериканских специалистов по использованию в передающих системах переменного тока современной силовой электроники. Однако, еще с середины 70-х гг. термины «управляемые» и «гибкие» электропередачи использовались в СССР для наименования конструкций линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока повышенной пропускной способности и сниженного экологического влияния:

- управляемых самокомпенсирующихся (полуразомкнутых) ЛЭП со сближенными цепями,
- с регулируемым фазовым сдвигом между системами напряжений цепей,

- с регулируемыми устройствами продольной и поперечной компенсации,
- компактных ЛЭП со сближенными фазами, нетрадиционной конструкцией опор и расположением проводов в фазе,
- настроенных на полуолну ЛЭП и др.

Глубокие исследования в этой области проводились в 70-90-ые гг. учеными научных школ Москвы, Ленинграда, Кишинева, Минска, Новосибирска; ими был сделан серьезный вклад в теорию управляемых гибких электропередач, предложены оригинальные конструктивные решения, начат переход к практике проектирования и эксплуатации опытных компактных ЛЭП.

В настоящее время в свете новых подходов к энергобезопасности, актуальности проблемы безаварийного функционирования национальных и региональных ЭЭС, формирования мирового рынка электроэнергии интерес к практическому внедрению управляемых гибких ЛЭП в качестве активных элементов ЭЭС резко возрос. Причем само понятие FACTS, условия и целесообразность применения в электрических сетях и энергоисточниках входящих в эту категорию технологий и устройств стали предметом активных дискуссий. В [1] предлагается расширенная трактовка категории FACTS как совокупности всего спектра технологий и устройств, используемых в ЭЭС для стабилизации напряжения, повышения устойчивости, оптимизации потокораспределения и снижения потерь:

- устройств продольной компенсации традиционного типа и регулируемых посредством тиристорно-реакторных групп,
- статических тиристорных компенсаторов (СТК),
- вставок постоянного тока,
- электромеханических преобразователей частоты на базе асинхронизированных синхронных машин (АС ЭМПЧ),
- управляемых реакторов (УР) и синхронных компенсаторов, фазопоротных трансформаторов и т.д.

В [2] излагается иной взгляд: противопоставляется технология настройки линии электропередачи на передаваемую по ней мощность с помощью управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа (УШРТ) технологиям FACTS.

В таблице 1 представлен ряд технологий и устройств FACTS, указаны их функции в ЭЭС.

Прогресс, достигнутый в разработке мощных преобразовательных устройств нового класса на основе запираемых тиристоров и биполярных транзисторов, позволяет констатировать появление новых перспектив применения FACTS в ЭЭС. Суть этих перспектив - использование современной силовой электроники в ЭЭС для практически безинерционного, в режиме «on line» управления параметрами структур генерации, передачи и потребления приводит к качественно новым свойствам каждой из указанных структур в отдельности и ЭЭС в целом.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ОБЩЕСИСТЕМНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Надёжность и эффективность ЭЭС зависят от одноимённых свойств её подсистем и элементов, прежде всего, электростанций и систем электропередачи, т.е. имеют место общесистемные эффекты состояния отдельных подсистем и элементов ЭЭС. Наблюдаются также синергетические эффекты сложного нелинейного взаимовлияния их параметров и режимов. Следует ожидать, что устанавливаемые в качестве элементов генерирующих источников, или передающих сетей, или крупных потребителей устройства категории FACTS, являясь, как правило, многофункциональными элементами, будут усиливать указанные синергетические и общесистемные эффекты.

Синергетические и общесистемные эффекты использования FACTS в ЭЭС в настоящее время мало изучены. Они находятся в большой зависимости от конкретных схем и параметров ЭЭС и должны стать предметом, как научных исследований, так и глубокой проработки на этапе технико-экономических обоснований конкретных инвестиционных проектов в силу, как правило, отсутствия аналогов и уникальности применения подобных технологий.

Необходимость учёта указанных эффектов потенциально будет увеличиваться в связи с изменением структуры управляющих и хозяйствующих субъектов электроэнергетической отрасли, переходом к рыночным отношениям в области производства и сбыта электроэнергии, появлением в перспективе негосударственных генерирующих предприятий.

FACTS НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

В качестве устройств FACTS на электростанциях могут использоваться управляемые электромашино-вентильные комплексы (каскады) на базе синтеза синхронных, асинхронных машин и вентильных преобразователей. В [4] описаны принципиальные структуры подобных комплексов:

➤ с регулируемым по выходной частоте и напряжению обмотки статора вентильным преобразователем частоты, включенным в цепь трех- или двухфазной системы обмоток возбуждения ротора синхронной или асинхронной электрической машины;

➤ с преобразователями в цепях обмоток статоров.

Первый тип комплекса обладает достоинствами:

- обеспечивает работу в установившемся режиме, как с синхронной частотой, так и с частотой вращения ротора ниже и выше синхронной, позволяя при этом работать в режимах генерации и потребления активной и реактивной мощности, том числе в режиме потребления из сети реактивной мощности.

Достоинства второго типа комплекса:

- возможность использования в нем короткозамкнутых асинхронных машин;

- регулирование частоты вращения в более широком диапазоне по сравнению с комплексом первого типа.

- дает возможность автоматического регулирования ЭДС машины по величине и фазе, чем обеспечивает более высокую устойчивость по сравнению с традиционной синхронной машиной.

Таблица 1

Технологии FACTS и их функции в ЭЭС

Наименование	Функции	Область применения
АСТГ (асинхронизированный турбогенератор)	Повышение надёжности энергоблоков электростанции (АСТГ и параллельно работающих СТГ). Нормализация уровней напряжения на отходящих ЛЭП при сокращении затрат. Надежность поддержания уровня напряжения в рабочих и аварийных режимах расширением диапазона его регулирования на шинах станции. Продление срока службы параллельно работающих СТГ посредством перевода их в режимы с выдачей реактивной мощности.	Крупные ГЭС
АСГГ, АСГД (асинхронизированные гидрогенератор и генератор-двигатель)	Повышение КПД за счёт регулирования частоты вращения в зависимости от напора воды. Улучшение регулирования частоты в ЭЭС посредством изменения потребляемой мощности в насосном режиме ГАЭС.	ГЭС, ГАЭС
СТК (статический тиристорный компенсатор), СТАТКОН (статический конденсатор), УШРТ (управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа), АСК (асинхронизированный статический компенсатор)	Повышение пропускной способности ЛЭП стабилизацией напряжения в узлах электрической сети. Оптимизация потокораспределения. Снижение потерь. Повышение устойчивости.	Электропередачи переменного тока, вставки постоянного тока, электрические сети, электропередачи повышенной натуральной мощности (ПНМ)
ТУПК (тиристорное устройство продольной компенсации)	Управление пропускной способностью ЛЭП регулированием коэффициента компенсации индуктивного сопротивления линии. Компенсация избыточной зарядной мощности в режимах малых нагрузок.	Электропередачи в ЭЭС
ОРПМ (объединенный регулятор потока мощности)	Управление потоками реактивной и активной мощности регулированием величины и фазы вектора напряжения в точке включения ОРПМ. Стабилизация напряжения в узлах сети ЭЭС. Увеличение передаваемой мощности при углах меньших 90°. Большой предел по динамической устойчивости. Оптимизация потоков мощности их принудительным распределением в сложной неоднородной замкнутой сети ЭЭС.	Электрические сети, ЭЭС
РУС (регулятор угла сдвига)	Функции передачи постоянного тока (ППТ) в ЭЭС.	Электропередача в ЭЭС
ЭВПТ (электромеханическая вставка переменного тока) на базе АС ЭМПЧ, (асинхронизированный электромеханический преобразователь частоты), ВПТЗ (вставка постоянного тока с запираемыми тиристорами)	Гибкая связь для объединения ЭЭС с различными стандартами по частоте и качеству электроэнергии для совместной работы. Обмен мощностями между ЭЭС при независимом регулировании частоты в каждой ЭЭС. Накопитель энергии для управляемых воздействий на переходные режимы. Стабилизация напряжения у потребителей, подключенных к гибкой связи.	Межсистемные и межгосударственные связи в ЭЭС

Данный тип комплекса находит применение в частотно-регулируемом электроприводе и в генерирующих установках нетрадиционного типа небольшой мощности (малые ГЭС, ВЭУ) в режимах их параллельной работы с ЭЭС.

Исследования по созданию АСМ ведутся отечественными и зарубежными специалистами более 40 лет. С опережением по отношению к мировому уровню, в 60–90-х гг. в СССР созданы и прошли опытную эксплуатацию два АСГГ мощностью 50

МВ•А (Иювская ГЭС, 25 лет эксплуатации). Впервые в мировой практике разработаны и введены в эксплуатацию самые крупные АСТГ мощностью 200 МВт каждый (Бурштынская ГРЭС, Украина, 1985 г., 1991 г.). Созданы серии АСТГ мощностью 120, 220, 320 МВт с водяным и 110, 160 МВт – с воздушным охлаждением; разрабатывается АСТГ 800 МВт. Рекомендована установка АСТГ мощностью 110 – 800 МВт на 20 ТЭС Российской Федерации. Успешный опыт эксплуатации АСТГ и АСГД (мощностью от 85 до 340 МВ•А) накоплен в Японии и в Европе [4].

При использовании АСМ в генераторном режиме векторное регулирование напряжения (изменение величины и фазы) на зажимах генератора обеспечивает улучшенные технические и эксплуатационные характеристики: надёжность, живучесть при более высоких показателях по устойчивости, управляемость, глубокое потребление реактивной мощности. Это определяет целесообразность применения АСТГ на крупных тепловых и атомных станциях.

Особенность АСТГ - размещение в пазах массивного ротора двух взаимно перпендикулярных обмоток возбуждения. В нормальных режимах АСТГ работают с синхронной частотой и могут переходить в асинхронные режимы при аварийных возмущениях или неполадках в системе возбуждения. Способны длительно работать синхронно с несколько пониженной активной мощностью при возбуждении только по одной из осей ротора или в асинхронном режиме без возбуждения с замкнутыми накоротко обмотками возбуждения [3,4]. Позволяют осуществлять регулирование режимов на концах линии электропередачи. Стоимость АСТГ в сравнении с традиционными СТГ на 15–25% выше. Целесообразна их совместная установка для улучшения показателей электростанции, улучшения устойчивости ее параллельной работы, оптимизации режимов по напряжению ЭЭС.

Регулируемые электроприводы переменного тока на базе обоих типов машинно-вентильных комплексов находят применение для механизмов собственных нужд (с.н.) ТЭС. Позволяют повысить надежность станции, снизить расход электроэнергии и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Разработки этих приводов были начаты во ВНИИЭ в начале 80-х гг. Первый бесконтактный АСМ-электропривод мощностью 1000 кВт был введен на дутьевом вентиляторе Минской ТЭЦ-4. В настоящее время энергосберегающий частотно-регулируемый электропривод широко используется в системах с.н. энергоблоков ТЭС и в тепловых сетях стран ближнего и дальнего зарубежья.

Оптимальная генерирующая инфраструктура региональной ЭЭС предполагает определенное соотношение мощностей различных типов электростанций. Возрастают требования к объемам маневренных экономичных мощностей в ЭЭС и необходимость в гибких управляемых генерирующих системах, работающих как в составе ЭЭС, так и автономно. ГЭС и ГАЭС способствуют:

- покрытию пиков нагрузки ЭЭС;
- повышению устойчивости работы ЭЭС;

- обеспечению возможности использовать АЭС и ТЭС в оптимальных для них режимах работы.

Установка АСГГ на ГЭС, обеспечивая глубокое потребление реактивной мощности, в большей мере повышают устойчивость ЭЭС. На ГАЭС АСГД улучшают регулирование частоты в ЭЭС изменением потребляемой мощности в насосном режиме. АСГГ и АСГД повышают экономичность работы ГЭС и ГАЭС за счет регулирования частоты вращения в зависимости от напора воды.

В ЭЭС стран постсоветского пространства осуществляются и планируются работы по обновлению и развитию основных производственных фондов, повышению их энергоэффективности, в том числе:

- модернизации и/или вводу системообразующих электростанций;
- вводу новых малых и мини-ТЭЦ, превращению действующих котельных в мини-ТЭЦ;
- развитию нетрадиционных возобновляемых энергоисточников, включая малые ГЭС и ВЭУ (ветроэнергетические установки).

Отсюда следует целесообразность технико-экономического анализа применения:

- АСТГ как многофункционального инструмента по оптимизации режимов ЭЭС;
- энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода на базе управляемых вентильных преобразователей частоты в системах с.н. энергоблоков ТЭС;
- АСГГ для малой гидроэнергетики республики;
- АСМ для ВЭУ.

Модернизация и строительство генерирующих мощностей на крупных электростанциях требует параллельного развития сетей высокого, сверхвысокого напряжения. В этой связи представляет интерес технико-экономическая оценка использования АСТГ и вращающихся (АСК) или статических (СТК) компенсаторов реактивной мощности в сопряжении и сравнении с традиционными средствами обеспечения устойчивости и регулирования режимов напряжения и мощности в региональных ЭЭС.

Малые ГЭС - важное направление развития возобновляемой электроэнергетики. Так в Беларуси, потенциальная мощность водотоков составляет 850 МВт, в том числе технически доступная – 529 МВт, экономически целесообразная – 250 МВт. К 2015 г. планируемая выработка электроэнергии на ГЭС составит до 0,6 млрд. кВт·ч. Единичная мощность гидрогенераторов (ГГ) реконструируемых, восстанавливаемых и планируемых к сооружению ГЭС лежит в диапазоне от 50 кВт до 5 МВт. Предполагается использовать быстроремонтируемые ГГ капсульного типа или при мощностях 50–150 кВт — асинхронные генераторы. Ввиду относительно равнинного характера белорусских рек, имеет смысл выполнять предпроектное сравнение этих конструкций ГГ с вариантом АСГГ.

Потенциальная область анализа применения АСГД — ГАЭС, строительство которых весьма благоприятно для прохождения пиков нагрузки

региональных ЭЭС, особенно в случае строительства АЭС.

FACTS В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ

Традиционно ЛЭП являлись «пассивными» элементами ЭЭС. Применяемые в них средства регулирования (устройства продольной и поперечной компенсации, настройки на режим полуволны) имели целью увеличить предел передаваемой мощности, поддержать напряжение вдоль линии в соответствии с допустимыми значениями. Благодаря устройствам FACTS электропередачи могут использоваться как активные элементы ЭЭС. ЛЭП приобретают свойство оперативно, практически безинерционно, изменять свои параметры (удельные сопротивления, проводимости, пропускную способность и др.) по определенным законам, т.е. «гибкие» электропередачи становятся реально управляемыми и могут быть использованы для управления ЭЭС в нормальных и аварийных режимах. Это открывает новые возможности решения проблем устойчивости и управления ЭЭС, повышения надежности электроснабжения потребителей. Гибкая линия определяется как линия переменного тока, оснащенная устройствами, позволяющими изменять ее параметры и регулировать передаваемую по ней мощность. Поэтому насыщение ЭЭС устройствами FACTS можно рассматривать в качестве альтернативы сооружению новых электропередач.

В зависимости от принципа регулирования устройства управления мощностью и пропускной способностью ЛЭП переменного тока в [5, 7] классифицируются на следующие типы:

➤ Статические управляемые источники реактивной мощности (ИРМ), реализующие регулирование стабилизацией напряжения по концам линии или узлам электрической сети (аналогично синхронным компенсаторам), различают двух видов:

- статические тиристорные компенсаторы (СТК), использующие управляемые реакторы или/и конденсаторные батареи; регулирование мощности реактора производится плавно управляемым тиристорным ключом или подмагничиванием участка сердечника реактора, а регулирование мощности конденсаторной батареи – ступенчато переключением ее секций тиристорным ключом;
- статические конденсаторы (СТАТКОН) - новое поколение статических управляемых ИРМ, являются безинерционными источниками реактивной мощности благодаря выполнению на базе автономного инвертора напряжения на запираемых тиристорах, шунтированных встречно включенными диодами; СТАТКОН представляет собой инверторный мост, включенный через трансформатор параллельно к шинам ЛЭП (СТАТКОН поэтому называют также параллельным регулятором мощности), на полюсы которого включен конденсатор.

➤ Устройства нового поколения, регулирующие передаваемую мощность по ЛЭП изменением суммарного реактивного сопротивления линии

(аналогично установкам продольной компенсации (УПК)), получили название последовательных регуляторов потоков мощности (ПРПМ); этот тип устройств реализуется включением регулируемого ИРМ к линии через трансформатор, первичная обмотка которого включена в линию последовательно. Техническое решение данного типа устройств – тиристорное устройство продольной компенсации (ТУПК) выполняется на базе инверторного моста. Физическая суть такого технического решения заключается во введении последовательно в линию в месте включения ТУПК регулируемого дополнительного напряжения, имеющего сдвиг на $\pm 90^\circ$ относительно тока линии, что эквивалентно последовательному включению в нее емкости или индуктивности.

➤ Устройства комбинированного действия или объединенные (универсальные) регуляторы потоков мощности (ОРПМ) позволяют одновременно регулировать фазный угол между напряжениями по концам ЛЭП и ее сопротивление. Конструктивно ОРПМ состоит из параллельного и последовательного инверторов напряжения, полюса которых соединены связью постоянного тока с общим конденсатором [7]. ОРПМ универсален, так как сочетает в себе возможности статического компенсатора реактивной мощности, установки продольной компенсации и фазоворотного трансформатора, что позволяет регулировать потоки как реактивной, так и активной мощности.

➤ Регуляторы угла сдвига (РУС) обеспечивают передачу только активной мощности по линии без сдвига фаз между напряжениями по ее концам, т.е. ЛЭП переменного тока с РУС в ЭЭС по свойствам эквивалентна линии передачи постоянного тока (ППТ). РУС состоит из включенных параллельно на шины линии выпрямителя и последовательно в линию инвертора (СТАТКОН) и общего конденсатора на стороне постоянного тока [5].

Конкурентными вариантами перечисленным устройствам повышения пропускной способности и управления мощностью передачи ЛЭП переменного тока являются быстродействующие управляемые шунтирующие реакторы (УШР). В результате активной работы по созданию УШР, проводившихся с 50-х гг. прошлого века, сегодня в России созданы весьма совершенные многофункциональные УШР, в том числе трансформаторного типа (УШРТ), возможности применения которых рассмотрены в [2, 11]. В частности, доказывается [2] эффективность создания гибких ЛЭП посредством установки УШРТ в воздушных линиях повышенной натуральной мощности (ВЛ ПНМ).

В управляемых гибких электропередачах могут использоваться АСК. Уступая СТАТКОН и ТУПК в быстродействии, АСК обладают определенными преимуществами [4] в отношении влияния на режим ЛЭП благодаря механической инерции вращения ротора.

Технологии FACTS в отличие от традиционных многофункциональны и способны одновременно решать комплекс задач:

- повышать пропускную способность ЛЭП, вплоть до предела по нагреву проводов;
- обеспечивать устойчивую работу энергосистемы при различных возмущениях;
- распределять мощности в сложной неоднородной электрической сети в соответствии с требованиями диспетчера;
- стабилизировать и регулировать напряжение.

В [1-7 и др.] приводятся примеры целого ряда конкретных проектов внедрения FACTS в ЭЭС различных стран. Эксплуатируются установки СТАТКОН на параметры 80 МВА, 154 кВ на переключательном пункте электропередачи в Японии, на параметры 100 МВА, 161 кВ на подстанции ЭЭС в США. ОРПМ различной единичной мощности до 250 МВ•А внедрены в ЭЭС США, Канады, Бразилии, Южной Кореи, КНР и др. В России разработана программа замены вращающихся компенсаторов общей мощностью около 2000 Мвар на быстродействующие статические компенсаторы на узловых подстанциях электрических сетей; изготовлено более 30 опытно-промышленных трехфазных управляемых реакторов разных типов на напряжение от 0,4 до 330 кВ мощностью до 180 МВА. В 2001 г. в Индии введен в эксплуатацию разработанный в России УШРТ на параметры 50 Мвар, 400 кВ. Построены и эксплуатируются в России, Бразилии и Китае несколько компактных линий электропередачи повышенной натуральной мощности напряжением 220, 330, 500 кВ. Геополитическое положение Беларуси делает возможным транзит и экспорт электроэнергии в Западную Европу, поэтому представлял бы интерес технико-экономический анализ применения технологий FACTS в вариантах развития системообразующих сетей страны.

УЧАСТИЕ В МИРОВОМ РЫНКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Для совместной работы энергосистем с различными стандартами по частоте предназначен асинхронизированный электромеханический преобразователь частоты (АС ЭМПЧ), также входящий в категорию устройств FACTS. Исследования АС ЭМПЧ активно проводились советскими учеными в 80-е гг. Пример практического использования АС ЭМПЧ — связь ЭЭС США и Канады, эксплуатируемая с 2003 г. В России в эксплуатации находится АС ЭМПЧ мощностью 1000 кВт.

АС ЭМПЧ — агрегат, состоящий из двух электрических машин, валы которых механически соединены между собой. Машины подключаются к разным электрическим системам: одна машина работает генератором, другая — двигателем; в силу обратимости электрических машин при изменении потока мощности, первая переходит в двигательный режим, а вторая — в генераторный. Агрегат может состоять как из синхронной и асинхронизированной машин, так и из двух асинхронизированных. Благодаря двум обмоткам возбуждения,

расположенным на роторе АСМ под углом 90° друг относительно друга, АС ЭМПЧ обеспечивает:

- поддержание заданного или регулирование по требуемому закону перетока мощности (поперечная составляющая ЭДС возбуждения);
- регулирование напряжения и реактивной мощности (продольная составляющая ЭДС возбуждения).

Среди технических альтернатив исполнения межгосударственной связи Белорусской ЭЭС может рассматриваться вариант связи на базе АС ЭМПЧ.

В свете экономической интеграции стран, развития и функционирования национальных и региональных ЭЭС, совместного выхода на международный рынок электроэнергии практический интерес может представлять предложение о комбинированном объединении энергосистем. Идея [12] комбинированной связи энергообъединений Востока и Запада заключается в выделении промежуточной подсистемы в энергообъединении Востока, которая имеет гибкую связь с основной его частью и обычную связь по ЛЭП переменного тока с энергообъединением Запада. Цель данного предложения — повышение конкурентоспособности поставляемой на рынок электроэнергии из энергообъединения Востока. В качестве альтернативных исполнений гибкой связи рассматриваются электромеханическая вставка переменного тока (ЭВПТ) на основе АС ЭМПЧ и вставка постоянного тока нового типа с запираемыми тиристорами (ВПТЗ).

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В современных энергосистемах протяженные электропередачи выполняют функции электронного транспорта энергии и мощности от удаленных источников, системообразующую, межсистемных и межрегиональных связей. Эволюция функций в процессе развития ЭЭС приводит к превращению электропередачи из однородной в неоднородную и росту степени неоднородности.

Волновая природа передачи электроэнергии и наличие неоднородностей приводят к высокой сложности расчетов протяженных электропередач.

В [13] разработаны соотношения для расчета потерь мощности, коэффициентов полезного действия подобных электропередач. В контексте применения FACTS в ЭЭС эти соотношения приобретают особое значение в связи с их универсальностью и возможностью многофункционального использования.

Обозначим I_2 и U_2 - ток и напряжение в конце электропередачи; r_0 - активное сопротивление на 1 км линии; L - длина линии; γ - коэффициент распространения волны; \underline{z}_s - волновое сопротивление линии. Тогда для однородной линии электропередачи потери мощности:

$$\Delta P = 3 \int_0^L I^2 r_0 dl \quad (1)$$

где ток, текущий в какой-либо точке линии на расстоянии l от конца линии,

$$\underline{I} = \underline{I}_2 \cosh \gamma l + \frac{\underline{U}_2}{z_g} \sinh \gamma l. \quad (2)$$

После интегрирования (1) и преобразований получим выражения для вычисления потерь активной и реактивной мощности однородной линии:

$$\Delta P = \frac{S_2^2}{U_2^2} R_l k_1 + \frac{P_{нам} R_l}{z_g} k_2 + \frac{P_2 z_g - Q_2 x_g}{z_g^2} R_l \beta L - \frac{Q_2 z_g - P_2 x_g}{z_g^2} R_l k_3 \quad (3)$$

$$\Delta Q = \frac{S_2^2}{U_2^2} x_l k_1 + \frac{P_{нам} x_l}{z_g} k_2 + \frac{P_2 z_g - Q_2 x_g}{z_g^2} x_l \beta L - \frac{Q_2 z_g - P_2 x_g}{z_g^2} x_l k_3 \quad (4)$$

Здесь

$$k_1 = 0,5 + \frac{\sin 2\alpha L}{4\alpha L} \quad (5),$$

$$k_2 = 0,5 - \frac{\sin 2\alpha L}{4\alpha L} \quad (6),$$

$$k_3 = \frac{1 - \cos 2\alpha L}{2\alpha L} \quad (7),$$

$$R_l = r_0 L, \quad x_l = x_0 L.$$

При небольших расстояниях L из (3)-(7) можно получить известные формулы, применяемые в расчетах электрических сетей и корректные при длинах линий до 300...500 км:

$$\Delta P = \frac{S_2^2}{U_2^2} R_l; \quad \Delta Q = \frac{S_2^2}{U_2^2} x_l.$$

Для электропередачи с промежуточными включениями необходимо переходить к представлению ее эквивалентным четырехполюсником с обобщенными постоянными:

$$\underline{A} = A' + jA''; \quad \underline{B} = B' + jB''; \quad \underline{C} = C' + jC''; \\ \underline{D} = D' + jD''.$$

Исходя из соотношений:

$$\Delta P = P_1 - P_2; \quad P_1 = \operatorname{Re}(\underline{U}_1 \underline{I}_1) \quad \text{и} \\ \underline{U}_1 = \underline{A} \underline{U}_2 + \underline{B} \underline{I}_2; \quad \underline{I}_1 = \underline{C} \underline{U}_2 + \underline{D} \underline{I}_2,$$

в [1] получено универсальное выражение для расчета потерь активной мощности

$$\Delta P = (A'C' + A''C'')U_2^2 + (B'D' + B''D'')I_2^2 + 2(A''D'' + B'C'')P_2 + 2(A'D'' + B'C'')Q_2. \quad (8)$$

На основе (8) выведены соотношения для оценки энергоэффективности электропередачи для расчета:

➤ значения КПД:

$$\eta = \frac{P_2}{k_4 U_2^2 + k_5 I_2^2 + k_6 P_2 + 2k_7 Q_2}, \quad (9)$$

➤ значения максимального КПД – наибольшего КПД при изменении нагрузки в достаточно широких пределах и неизменном напряжении одного из концов линии:

$$\eta_m = \frac{1}{2\sqrt{a-b}+a}, \quad (10)$$

где $k_4 = A'C' + A''C''$, $k_5 = B'D' + B''D''$, $k_6 = d = 2A''D'' + 2B'C' + 1$,

$$k_7 = C'B'' - A'D',$$

$$a = (A'C' + A''C'')(B'D' + B''D''), \quad b = (B'C' - A''D'').$$

Активная и реактивная мощности нагрузки электропередачи, соответствующие максимальному КПД определяются:

$$P_{2\eta_m} = \sqrt{\frac{k_4}{k_5} - \left(\frac{b}{k_5}\right)^2}, \quad Q_{2\eta_m} = \frac{b}{k_5}. \quad (11)$$

Расчетные соотношения (8) – (11) при всей своей простоте учитывают особенности режимов и параметров электропередач с пассивными и активными промежуточными элементами. Эти соотношения являются многофункциональными, так как, во-первых, их правые части включают параметры, являющиеся функциями многих переменных, а во-вторых, расчеты с их использованием могут иметь различные области применения.

Соотношения (8)-(11) позволяют учесть:

- волновую природу протяженных линий,
- изменения перетоков активной и реактивной мощности;
- все виды потерь, включая потери на корону,
- изменение нагрузок электропередачи (на конце линии и промежуточных) во времени $P_{нагр.i} = f(t)$,
- пассивные и регулируемые устройства компенсации электропередачи.

Способ учета нагрузок и регулируемых устройств компенсации предложен и описан в [14]. Он предусматривает эквивалентирование электропередачи на основе теории сигнальных графов. Значительно сложнее учесть активные промежуточные включения (источники энергии или устройства группы FACTS). Однако и это осуществимо при использовании подходов и алгоритма, предложенного в [14].

Укажем области применения соотношений (8)-(11):

➤ Они могут быть полезны при оценочных расчетах при планировании схем и режимов энергосистем. Необходимы при выполнении технико-экономических обоснований строительства и конкретном проектировании электропередач для оценки потерь мощности, энергоэффективности, рекомендации мер по снижению потерь.

➤ Следующей сферой применения рассматриваемых соотношений являются расчеты по определению цен и тарифов на электроэнергетическом оптовом рынке. Соотношения (3) и (8) позволяют объективно и обоснованно учесть в стоимости услуг по транспортировке электроэнергии составляющую потерь мощности и энергии в протяженных электропередачах и включить ее в тарифы.

Речь, прежде всего, идет о контрактных рынках, основанных на прямых двухсторонних соглашениях о физических поставках электроэнергии различной срочности, а также на торговле стандартизированными контрактами на биржах. Так, на долгосрочном рынке двухсторонних договоров стороны фиксируют цены и объемы поставок и несут обязательства по оплате потерь. Следует заметить, что рынок свободных двухсторонних договоров может рассматриваться как основной, так как на него приходится до 80% оборота электроэнергии оптового рынка. Стандартизированные контракты непосредственно не связаны с физическими поставками электроэнергии, а являются финансовыми инструментами. В них также требуется учитывать стоимостное выражение потерь, полученное

расчетным путем. Особую значимость для взаиморасчетов имеет объективная оценка потерь для электропередач, осуществляющих межгосударственные и межрегиональные связи.

Соотношения (3) и (8) могут использоваться в алгоритмах ценообразования на рынках «на сутки вперед» (спотовых) для учета потерь при передаче электроэнергии. При этом рассчитываемые значения эквивалентных обобщенных постоянных электропередачи необходимы также для расчетов ограничений по передаваемой мощности. Применение метода узловой цены требует определения ограничений по пропускной способности электрических сетей и потерь электроэнергии при передаче между точками поставок производителей и присоединения потребителей. Как указано в [15], узловое ценообразование обеспечивает физическую реализуемость поставок и адекватные ценовые сигналы для инвестиций в развитие сетевого комплекса, включая линии электропередачи.

➤ Актуальной областью использования соотношений (3)-(11) является учебный процесс. Относительная простота соотношений, возможность построения на их основе алгоритмов для исследования, анализа и подбора схем и энергоэффективных параметров и режимов электропередач позволяют применять их при выполнении студентами курсовых и дипломных проектов.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Общесистемные и синергетические эффекты технологий FACTS, а также недостаточность практики применения последних определяют особенности математического описания при выполнении технико-экономического обоснования их использования. Обобщим некоторые из этих особенностей:

- необходимо тщательное предпроектное исследование с элементами научных расчетов взаимного влияния активных элементов ЭЭС;
- требуется анализ и оценка как установившихся, так и переходных режимов фрагментов ЭЭС при обоснованных эквивалентировании их элементов и режимных допущениях;
- в математическом описании выбранного фрагмента ЭЭС удобно использовать ряд условных параметров: пропускная способность расчетного сечения, изменения напряжения вдоль расчетной электрической связи, отражающей совокупность линий электропередачи и т.п.;
- приходится учитывать известную неопределенность надежностных и стоимостных характеристик устройств FACTS, их потенциальное изменение с накоплением опыта применения.

Актуальными направлениями научных исследований по применению FACTS в электроэнергетике следует признать определение закономерностей управления устройствами FACTS по многоцелевому критерию их эффективного использования в ЭЭС и определение оптимальных условий использования технологий FACTS в ЭЭС с

учетом закономерностей управления реализующими эти технологии устройствами.

В мире уже реализованы проекты практически всех описанных выше устройств FACTS, определены программы дальнейшего внедрения этих устройств в ЭЭС промышленно развитых стран. В связи с высокой стоимостью преобразовательной техники нового поколения, а также синергетическими и общесистемными эффектами ее применения в электроэнергетике, необходим серьезный подход к технико-экономическому обоснованию и проработке проектов на предпроектной стадии.

Разработанные в [13] соотношения (3)-(11) имеют универсальный характер для однородных и неоднородных электропередач с промежуточными включениями пассивного и активного характера. Являются многофункциональными как в части учета физических явлений и взаимовлияния параметров и режимов электропередач, так и в части сфер применения: выполнение ТЭО, проектирование, ценообразование на оптовом рынке, учебный процесс.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кощеев Л.А., Шлайфштейн В.А. *Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети* // Электрические станции.- 2005.- № 12.-С. 30-38.
- [2] Александров Г.Н. *Технология гибких линий электропередачи и электропередач, настроенных на передаваемую мощность* // Электричество.- 2006.- № 6.-С. 2-6.
- [3] Алексеев Б.А., Мамиконянц Л.Г., Савваитов Д.С. *Основное электрооборудование электрических станций и сетей* // Электрические станции.- 2005.- № 2.-С. 48-57.
- [4] *Электромашино-вентильные комплексы – повышение надежности и экономичности генерирования и потребления электроэнергии* / Антипов К.М., Лабунец И.А., Лазарев Г.Б. и др. – Электрические станции.- 2005.- № 2.-С. 57-63.
- [5] Ивакин В.Н., Ковалев В.Д. *Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике* // Электричество.- 2001.- №19.-С.30-37.
- [6] *Координированное противоаварийное управление нагрузкой и устройствами FACTS* / Воропай Н.И., Этингов П.В., Удалов А.С. и др. – Электричество.- 2005.- №10.-С. 25-36.
- [7] *Основы современной энергетики: Курс лекций для менеджеров энергетических компаний. Часть 2. Современная электроэнергетика* / Под ред. проф. А.П. Бурмана и В.А. Строева.- М.: Издательство МЭИ, 2003.
- [8] Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. *Управляемая машина переменного тока*. М.: Наука, 1969.
- [9] Шакарян Ю.Г. *Асинхронизированные синхронные машины*. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [10] *Системная эффективность линий электропередач. Управляемые электропередачи*. – Сборник научных трудов. Вып.2. – Кишинев: Штиинца, 1989.
- [11] Сорокин В.М., Дорожко Л.И. *Управляемая компенсация дальних линий электропередачи* // Изв. АН - Энергетика.- 2005.- №3. –С. 75-83.
- [12] Зеленохат Н.И., Шаров Ю.В. *Комбинированное объединение больших энергосистем*. // Электричество.- 2006.- №5. –С.1-10.
- [13] Поспелов Г.Е. *Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач*. - Мн.: Вышэйш. школа, 1967.-312 с.
- [14] Поспелов Г.Е., Запатрин Р.И., Поспелова Т.Г. *Технико-экономические характеристики дальних электропередач с промежуточными присоединениями*. – Мн.: Наука и техника, 1983.-174 с.
- [15] Гительман Л.Д., Ратников Б.Е. *Энергетический бизнес: учебник*. – М.: Изд-во «Дело» АНХ, 2008. – 416 с.



Автор *Поспелова Татьяна Григорьевна – доктор технических наук, профессор Белорусского национального технического университета, директор НКУП «БелВИЭЦ, член экспертного совета БелВАКа. Родилась 23.01.1951 в г.Ташкенте (Узбекистан).*

развития и организации ЭЭС, энергоэффективности, возобновляемой энергетики. Имеет более 140 печатных научных работ. Работает консультантом по проектам UN, EU, WB, EBRD.

Закончила Энергетический факультет Белорусского политехнического института в 1972 г. по специальности «Электрические сети и системы». В 1975 г. защитила кандидатскую диссертацию «Особенности учета протяженных электропередач при создании АСУ ЭЭС» (БПИ, г. Минск), в 1991 г. – докторскую диссертацию «Научно-технические основы оценки и обеспечения эффективности электропередачи с учетом экологических условий» (НЭТИ, г. Новосибирск) по специальности 05.14.02 «Электрические станции (электрическая часть), сети, системы и управление ими». Проводит исследования в области