

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И РАЗВИТИЕ ИХ УПРАВЛЯЕМОСТИ В СВЕТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБКИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ FACTS

**Асп. КУЗЬМИЧ С. В., засл. деят. науки и техники Республики Беларусь,
докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.**

Белорусский национальный технический университет

Современное развитие электроэнергетических систем промышленно развитых стран характеризуется применением гибких (управляемых) систем электропередач (FACTS – Flexible Alternative Current Transmission) [1–3]. На первом этапе к категории FACTS были отнесены лишь устройства на базе полностью управляемых вентилей. Затем понятие FACTS было существенно расширено [2]. В настоящее время к устройствам FACTS относятся устройства продольной компенсации как традиционного типа, так и регулируемые, статические тиристорные компенсаторы, вставки постоянного тока и другие устройства, предназначенные в электрической сети для стабилизации напряжения, повышения устойчивости, оптимизации потокораспределения, снижения потерь [2]. Термин FACTS применяется с середины 80-х гг. прошлого столетия в научных статьях европейских и североамериканских специалистов по использованию в передачах переменного тока силовой электроники. Но, как правильно отмечается [1], термины «управление», «гибкие электропередачи» использовались в СССР с 70-х гг. прошлого столетия. Справедливо также утверждение [4], что отечественная электроэнергетика опередила западную.

Впервые проблема передачи большей мощности на расстояние 900 км была поднята в 1936 г. в связи с разработкой Куйбышевского гидроэнергетического узла на реке Волге и проекта электропередачи Куйбышев – Москва. Мощность электростанции составляла 2 ГВт. Существовавшее тогда наивысшее напряжение 220–287 кВ не могло обеспечить приемлемые технико-экономические показатели электропередачи, поэтому было принято решение об освоении новой ступени номинального напряжения 400 кВ. Для повышения устойчивости системы передачи была предусмотрена установка продольной компенсации для частичной компенсации индуктивного сопротивления линии передачи. Этот проект в силу объективных обстоятельств был реализован только в 1956 г. После пуска электропередачи установлено, что ее напряжение может быть повышено до 500 кВ. Поэтому в государственный стандарт номинальных напряжений вместо напряжения 400 кВ было введено напряжение 500 кВ, и электропередача Куйбышев (ныне Самара) – Москва работает при напряжении 500 кВ.

Аналогичная электропередача на 400 кВ в схеме выдачи мощности гидроэлектростанции была построена в Швеции, где также сооружена установка продольной компенсации.

Электропередача 500 кВ Куйбышев – Москва послужила не только схемой выдачи мощности Волжской гидроэлектростанции, но стала основой для создания Единой электроэнергетической системы Европейской

части СССР. Электросети высшего напряжения электроэнергетических систем должны выполнять ряд функций: передачу и распределение в сети высшего напряжения энергии электростанций системы, обеспечение внутрисистемных перетоков электроэнергии и мощности, а также параллельной работы электростанций.

Значительным решением проблемы статической устойчивости явились в 1938 г. результаты исследований С. А. Лебедева по искусственной устойчивости синхронных генераторов [4]. Работа в зоне искусственной устойчивости стала возможной благодаря созданию в Советском Союзе электронного регулятора возбуждения ВЭИ [5] и компаундирования – автоматических регуляторов возбуждения без зоны нечувствительности, применение которых в синхронных компенсаторах существенно повысило эффективность ранее известной схемы Ф. Баума – электропередачи с промежуточными синхронными компенсаторами. За рубежом принципы работы синхронных машин в зоне искусственной устойчивости привлекли внимание позже.

В период первого проектирования (1936 г.) электропередачи Куйбышев – Москва активно прорабатывались схемы компенсации индуктивности линии установками с емкостным эффектом, или так называемые схемы продольной компенсации. Серьезные исследования [5, 6] были проведены по использованию в качестве компенсирующих установок синхронных и асинхронных компенсаторов. Предложенная в 1930 г. Г. Морганом [6] схема, использующая в качестве компенсирующих устройств синхронные компенсаторы, оказалась неустойчивой и непригодной для передачи электроэнергии.

Неплохие результаты показали схемы продольной компенсации посредством батарей статических конденсаторов. Согласно [7] применение конденсаторной установки продольной компенсации мощностью 3240 МВт·А в двухцепном варианте электропередачи Куйбышев – Москва при передаваемой мощности 900 МВт дало бы экономию капитальных затрат в ценах 1936 г. на 300–400 млн руб. Шагом вперед, по сравнению с известным сборником докладов по передаче больших мощностей на далекие расстояния под редакцией Р. Рюденберга, и существенным вкладом в развитие теории дальних электропередач, и в частности компенсированных, явилась выполненная в тот период работа А. А. Вульфа.

С 1942 г. в американских научно-технических журналах стали появляться статьи, рассматривающие продольную конденсаторную компенсацию как средство повышения пропускной способности дальних электропередач. Позже, главным образом в послевоенный период, появились труды шведских ученых, посвященные электропередачам 800–900 км.

А. А. Вульф исследовал также принцип настройки электропередачи на режим полуволны. Отметив недостатки настройки электропередачи на режим полуволны – возможность недопустимых перенапряжений на линии, наличие резонансной точки, по отношению к которой индуктивное сопротивление системы равно нулю, возможность резонанса токов, низкий КПД электропередачи и трудность промежуточных отборов, А. А. Вульф выразил сомнение в практической применимости этого принципа. Не было уверенности в возможности применения настроенных электропередач и в послевоенный период. Отношение к системам, настроенным на режим полуволны, несколько изменилось после исследований этого режима, про-

веденных, начиная с 1955 г., в Сибирском научно-исследовательском институте энергетики под руководством В. К. Щербакова [8]. В результате этих исследований установлено, что указанные недостатки настроенных электропередач могут быть устранены, а исследования и проверка этих электропередач должны быть продолжены.

Серьезные исследования переходных процессов в системах передачи с конденсаторными установками продольной компенсации в довоенный период провел Н. Н. Щедрин. В результате были предложены методы расчета электромагнитных переходных процессов в указанных системах, раскрыта сущность самовозбуждения, впервые определены области синхронного и асинхронного самовозбуждений и получены условия возникновения самораскачивания синхронных машин. На основе проведенных исследований в СССР в предвоенный период был разработан первый проект электропередачи 400 кВ на расстояние около 1000 км. Позже проблема передачи электроэнергии связывались уже не с отдельным объектом, а с общим ростом масштаба передачи энергии и выполнением планов по формированию Единой энергетической системы. Для решения этих проблем велись теоретические, экспериментальные и технико-экономические исследования научно-исследовательскими, проектными и учебными институтами, а также предприятиями энергетических систем. Были проведены исследования пропускной способности электропередач переменного тока и их технико-экономических характеристик, развиты теории компенсации параметров электропередач [9], рассматривались поведение изоляции при высоких напряжениях, перенапряжения в дальних линиях передачи, выбор уровня номинального напряжения и многие другие проблемы. В. И. Попков провел фундаментальные исследования по коронированию проводов воздушных линий. Кроме указанных выше институтов, которые вели научные и проектные разработки в области передачи энергии в довоенный период и после войны, аналогичные исследования проводили вновь организованные институты НИИПТ и ВНИИЭ; большую работу по конкретному проектированию электропередач 400–500 кВ под руководством С. С. Рокатяна выполнило «Отделение дальних передач» НИИПИ «Теплопроект» (позже «Энергосетьпроект»). Рассматривались вопросы выбора числа цепей и сечений проводов, конструкции фазы линии, устойчивости, применения компенсирующих устройств, перенапряжения, режимы электропередачи, условия работы электрооборудования 500 кВ и т. д.

Интересными и полезными по своим результатам оказались исследования, выполненные в МЭИ под руководством В. А. Веникова. На основе теории подобия и методов моделирования изучались различные системы автоматического регулирования возбуждения генераторов [10] и их влияние на устойчивость электрических систем, в том числе регулятора «сильного действия», разработанного в ВЭИ Г. Р. Герценбергом. Эти исследования показали, что регулирование по углу между ЭДС удаленной станции и напряжением шин приемной системы совместно с его первой и второй производными, как и регулирование по току с его первой и второй производными, обеспечивает предел статической устойчивости, определяемый постоянством напряжения на зажимах генераторов; при регулировании по току и его производным изменения параметров электропередачи требуют изменений и в настройке регуляторов. Регулирование по напряжению

с первой и второй его производными менее эффективно – обеспечивает меньший предел, чем при постоянстве напряжения, но больший, нежели при постоянстве ЭДС за переходным сопротивлением.

Разработка автоматических регуляторов возбуждения сильного действия существенно улучшила технико-экономические показатели системы передачи с промежуточными синхронными компенсаторами и способствовала положительным результатам исследования этой системы.

С учетом известных недостатков синхронных компенсаторов (высокая стоимость, большие потери мощности, низкий уровень динамической устойчивости и др.) велись работы по созданию управляемых устройств поперечной компенсации – ионные устройства и ферромагнитные аппараты. Эти работы продолжаются и в настоящее время.

Вновь привлекли внимание исследователей так называемые разомкнутые линии, которые в свое время изучались в МЭИ под руководством В. А. Веникова; на основе этих линий ученый предложил оригинальную идею создания кибернетически управляемых электропередач [11]. Альтернативная технология электропередач, разрабатываемая в СПбГПУ под руководством Г. И. Александрова, использует настройку линии на передаваемую по ней мощность посредством управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа (УШРТ).

УШРТ автоматически настраивает линию на квазинатуральный режим. Натуральная мощность обеспечивается путем увеличения числа проводов в фазе, значительного уменьшения междуфазовых расстояний и оптимизации конструкции опор [12].

В исследованиях влияния автоматических регуляторов возбуждения на динамическую устойчивость было показано, что они способствуют сохранению синхронизма во втором цикле качаний, уменьшают амплитуды качаний в последующих циклах и улучшают устойчивость послеаварийного режима систем электропередач. Эксперименты на электродинамических моделях выявили существенное повышение динамической устойчивости системы передачи за счет быстродействующей системы возбуждения с высокими кратностями тока обмотки возбуждения. Эффективными средствами повышения динамической устойчивости, повышающими ее до уровня статической, оказались электрическое и механическое торможение генераторов, а также послеаварийная продольная компенсация.

Интересные работы проведены во Львовском политехническом институте. В результате были предложены электропередачи пульсирующим током – одновременная передача постоянным и переменным током по общим проводам.

Значительное развитие в послевоенный период получила теория устойчивости электрических систем, в том числе и систем электропередач, были разработаны новые подходы к исследованию устойчивости с применением современной вычислительной техники. Детально рассматривались различные средства повышения пропускной способности.

ВЫВОД

При формировании энергообъединений уделялось внимание обеспечению управляемости энергосистем. В ГЭС СССР были разработаны и вне-

рены принципы автоматического регулирования возбуждения генераторов, в том числе сильного действия. Ученые исследовали и внедряли управляемые самокомпенсирующиеся ЛЭП со сближенными цепями, регулируемые устройства продольной и поперечной компенсаций, компактные ЛЭП со сближенными фазами, нетрадиционной конструкцией опор и расположением проводов в фазе, настроенные на полуволну ЛЭП и др. Показаны возможности использования для передачи электроэнергии режима четверти волны [13].

В настоящее время на основе «Статкона» разрабатываются устройства регулирования потоков активной и реактивной мощностей в ЛЭП. «Статкон» – это прибор на базе схемы генератора напряжения, работающего в режиме источника реактивной мощности. Все эти устройства основаны на использовании мощных преобразовательных блоков, на полностью управляемых полупроводниковых приборах. Исследования и разработки указанных средств представляют новое научное направление в области управления режимами электроэнергетических систем, а именно – создания гибких систем передачи энергии FACTS. Технология гибких электропередач требует внимания и нуждается в дальнейших исследованиях с учетом всех ранее проведенных разработок в области систем электропередач и опыта развития и эксплуатации электроэнергетических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. П о с п е л о в а, Т. Г. Потенциальные области использования FACTS и ACM в Белорусской энергосистеме / Т. Г. Поспелова // Энергия и Менеджмент. – 2006. – № 4. – С. 37–43.
2. К о щ е е в, Л. А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети / Л. А. Кощеев, Н. А. Шлайфштейн // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 30–38.
3. И в а к и н, В. Н. Исследование характеристик управляемой продольной компенсации как устройства для регулирования потоков мощности гибких линий электропередач переменного тока / В. Н. Ивакин // Электротехника. – 2006. – № 3. – С. 56–63.
4. Л е б е д е в, С. А. Анализ искусственной устойчивости генераторов / С. А. Лебедев // Электричество. – 1938. – № 4.
5. Г е р ц е н б е р г, Г. Р. Электронно-ионный регулятор для машин переменного тока / Г. Р. Герценберг // Электричество. – 1957. – № 10.
6. А л е к с а н д р о в, Г. Н. Об эффективности применения компенсирующих устройств на линиях электропередачи / Г. Н. Александров // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 62–67.
7. Л е б е д е в, С. А. Применение серийных статических конденсаторов для электропередачи Москва – Куйбышев / С. А. Лебедев // Бюллетень Д'В. – 1940. – № 7.
8. Н а с т р о е н н ы е электропередачи / В. К. Щербаков [и др.]. – Новосибирск: СО АН СССР, 1963. – 274 с.
9. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967. – 307 с.
10. В е н и к о в, В. А. Дальние электропередачи / В. А. Веников. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 312 с.
11. Э л е к т р о п е р е д а ч а переменного тока: а. с. 566288 СССР / В. М. Посталатий [и др.] // Бюл. изобр. – 1977. – № 27.
12. А л е к с а н д р о в, Г. И. Технология гибких электропередач и электропередач, настроенных на передаваемую мощность / Г. И. Александров // Электричество. – 2006. – № 6. – С. 2–6.
13. П о с п е л о в, Г. Е. Новый взгляд на возможности электропередачи переменного тока в режиме четверти волны / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 5–6. – С. 3–8.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 6.06.2007