

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проводимая в последние десятилетия в ряде ведущих в области электроэнергетики стран интенсивная работа по реструктуризации и изменению принципов управления этой отраслью — переход к рыночным отношениям в сочетании с изменением состава генерирующих источников (распределенная генерация, ветроэнергетика и др.), а также наличие законодательных и социальных ограничений по созданию новых линий электропередачи создали существенные трудности в развитии электрических сетей, связанные, прежде всего, с сокращением инвестиций в создание и развитие электрических сетей.

В частности, в США в течение последних 20 лет наблюдается снижение инвестиций в системы передачи электроэнергии при росте ее потребления на 45%. Только в период 1990–2000 гг. капитальные вложения уменьшились с 1300 до 750 млн долл. При этом резерв пиковой мощности в США и Швеции снизился с 20% до 10%, а доля устаревшего оборудования подстанций и высоковольтных линий с наработкой выше нормативной величины превысила половину общего объема. В результате возросло количество крупных аварий с отключением части потребителей электроэнергии.

Так, в 1991–1995 гг. в электрических сетях США было 66 аварий с отключением в каждом случае от 100 МВт и выше мощности потребителя при средней величине около 800 МВт. В период 1996–2000 гг. количество отключений выросло до 76 случаев, а средняя отключаемая мощность — до 1100 МВт.

В 2003 г. в мире произошло четыре крупных аварии:

- 14.08.2003 г. на северо-востоке США и Канады без электроснабжения осталось 50 млн чел. Отключилось 61,8 ГВт мощности;

- 28.08.2003 г. в Лондоне на 50 мин отключилось 724 МВт (20%) городского электроснабжения, а 0,5 млн чел. имело затруднения во время транспортного часа пик;
- 23.09.2003 г. в Швеции и Дании авария привела к потере 3 ГВт мощности с отделением части электрической сети и перерывом электроснабжения на 5 ч. Общее количество отключенных потребителей составило 5 млн чел.;
- 28.09.2003 г. в Италии без электроснабжения на 5–9 ч осталось 57 млн чел. с отключением 50 ГВт мощности.

В середине 2005 г. авария в Московской энергосистеме привела к отключению 2,5 ГВт (26% общего энергопотребления в регионе) на 4 ч, а авария в Швейцарии вызвала остановку практически всего электрифицированного транспорта.

Интересно отметить, что Госэнергонадзор Италии оштрафовал компанию Enel на 150 млн Евро за то, что ей не удалось обеспечить необходимый уровень резерва мощности и это привело к развалу энергосистемы.

В результате лавины напряжения в распределительных сетях Московской энергосистемы России произошло отключение нескольких электростанций. Дальнейшее каскадное развитие аварии привело к отключению 26% потребителей Московского региона, 87% — в Тульской и 22% — в Калужской областях. Распространение аварии было остановлено в течение 3 ч, а полное восстановление энергопотребления — в течение суток. При этом системаобразующая сеть 500 кВ не была затронута аварийным процессом.

В большинстве стран, включая Россию имеет место недостаток регулируемых средств компенсации реактивной мощности в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах. Ограничения пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП) при авариях ограничивают мобилизацию аварийного резерва на электростанциях, если даже он есть. Следовательно, стремление к уменьшению затрат на производство и транспорт электроэнергии приводит к снижению надежности работы энергосистем, уменьшению аварийного резерва, а в некоторых странах — к возрастанию системных аварий.

Уменьшение аварийного резерва можно компенсировать организацией электрических связей большой пропускной способности, которые обеспечат взаимное резервирование энергосистем в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах. Примерами этого могут стать электросетевое объединение стран Европейского содружества, создаваемые Балтийское и Средиземноморское кольца, обсуждаемое объединение энергосистем Европы и России. Развитие линий электропередачи большой мощности — один из важных факторов обеспечения надежного энергоснабжения потребителей. Эти задачи могут быть решены строительством новых или повышением пропускной способности существующих линий. При этом усиление существующих линий электропередачи в ряде случаев может оказаться экономичнее, чем сооружение новых, при их достаточном количестве. При усилении предъявляются более жесткие требования к новым устройствам и системам, в отношении обеспечения повышения пределов передаваемых мощностей, демпфирования колебаний мощности, поддержания напряжения в сети, быстродействия для предотвращения лавины напряжения, а также в части перераспределения потоков мощности в электрических сетях.

Необходимо отметить также, что применение новых технологий регулирования режимов работы электроэнергетических систем для решения поставленных задач в промышленно развитых странах вызвано рядом обстоятельств:

- трудностями с отводом земли под трассы линий электропередачи и ростом стоимости сооружения новых линий электропередачи из-за ужесточения экологических требований, необходимости вести строительство в уже освоенных и заселенных регионах со сложившейся инфраструктурой и коммуникациями;
- необходимостью увеличения пропускной способности системыобразующих связей, ограничиваемой по условиям устойчивости;
- ростом потерь в системах и некоторым снижением эффективности использования мощных линий электропередачи, обусловленных тем, что в сложной электрической сети с

параллельной работой линий разных номинальных напряжений часто оказывается, что линии более низкого напряжения перегружаются, а более высокого — недогружаются, что снижает пропускную способность электропередачи в целом.

Эти проблемы постоянно возникали по мере развития электроэнергетических систем, повышения класса напряжения линий электропередачи, увеличения протяженности линий электропередачи, возрастания нагрузок и плотности этих нагрузок и решались путем применения более совершенных систем регулирования возбуждения синхронных машин, создания и применения статических и врачающихся устройств регулирования реактивной мощности, таких как шунтирующие реакторы, синхронные компенсаторы, управляемые шунтирующие реакторы, трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой, фазоповоротные трансформаторы и статические тиристорные компенсаторы (СТК).

В 1986 г. в журнале американского института EPRI (Electric Power Research Institute) появилась программная публикация с концепцией развития гибких систем переменного тока — Flexible AC Transmission System (FACTS). Сущность этой концепции сводилась к тому, что успехи, достигнутые в области силовой электроники, позволяют поставить задачу о широком внедрении разрабатываемых на ее основе устройств в сети переменного тока с целью повышения их управляемости. При этом указывалось, что такого рода устройства могут обеспечить стабилизацию напряжений, демпфирование низкочастотных колебаний, повышение статической и динамической устойчивости, оптимизацию потокораспределения, а в итоге — повышение пропускной способности сети и снижение потерь. При этом термин FACTS был распространен как на уже существующие устройства, основанные на применении однооперационных тиристоров (СТК), а также на фазоповоротные устройства и различные трансформаторные схемы, так и на новейшие, основанные на применении полностью управляемых приборов силовой электроники, основой которой является преобразование напряжения. В начале 1980-х гг. в Московском

отделении НИИ постоянного тока была разработана научно-методическая основа расчетов параметров элементов преобразователя, в том числе компенсатора реактивной мощности на этой базе типа СТАТКОМ, а также создан и испытан экспериментальный образец мощностью 1,7 МВ·А на напряжение 10 кВ. Проведенные исследования этой установки подтвердили высокую эффективность данного класса преобразователей.

Следует отметить, что в последнее десятилетие ведущие зарубежные компании достигли большого прогресса в части внедрения устройств FACTS в энергосистемы.

В Советском Союзе в 1965–1985 гг. были разработаны теоретические основы так называемого векторного регулирования режимов работы электроэнергетических систем (регулирование по независимым законам активной и реактивной мощности либо величине и фазе вектора напряжения) с помощью асинхронизированных машин, представляющие собой комплекс машин переменного тока и преобразователей частоты в роторной зоне, были созданы и внедрены в эксплуатацию такие машины, представляющие собой основу электромашинных устройств технологии FACTS.

В настоящей монографии обобщен опыт создания и применения устройств и технологии FACTS, обсуждены пути дальнейшего развития и применения этой технологии при развитии электроэнергетической системы (ЭЭС) России.

Авторы выражают признательность всем специалистам и создателям этого нового направления в электроэнергетике, материалы которых были использованы при написании книги. Авторы выражают также искреннюю благодарность специалистам, взявшим на себя труд рецензирования данной книги.

Замечания и пожелания просьба направлять по адресу:

Филиал ОАО «НТЦ электроэнергетики» — ВНИИЭ
Москва 115201, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3, стр. 2

ВВЕДЕНИЕ

Анализ и обобщение опыта развития и эксплуатации электроэнергетических систем и электрических станций многих стран, в том числе России, несмотря на давно и систематически проводимые исследования и практическую реализацию мероприятий по обеспечению требуемых уровней пропускной способности, устойчивости и надежности электроэнергетики показывают, что в настоящее время сохраняются и даже в определенной степени возросли некоторые проблемы, серьезно влияющие на эффективность и надежность электроэнергетических систем в целом.

В той или иной мере в электроэнергетических системах различных стран имеют место нижеследующие проблемы, проявляющиеся в различной степени.

1. Недостаточные пропускные способности отдельных линий электропередачи и сетей в целом, ограничивающие выдачу мощности электростанций, поставку электроэнергии потребителям, межсистемный, внутрисистемный и межгосударственный обмены мощности не только в аварийных и послеаварийных режимах, но и в нормальных режимах.
2. Формальные трудности выделения территорий для сооружения новых линий электропередачи, особенно для линий электропередачи высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения, обусловленные законодательными ограничениями, связанными с охраной окружающей среды, безопасностью для людей и животных и т. д.
3. Быстрое старение линий электропередачи и оборудования электросетей и подстанций, трудности их модернизации, как правило, на тех же территориях с увеличением пропускной способности линий электропередачи и улучшением управляемости электрических сетей.

4. Недостаточное оснащение электроэнергетических систем и электрических сетей, в частности источником регулирования реактивной мощности для целей поддержания на допустимых уровнях напряжений в контролируемых точках, обеспечения устойчивости в нормальных, аварийных и по-слеаварийных режимах, предотвращения «лавины напряжений» и т. д.
5. Неоптимальное распределение потоков мощности в параллельных линиях электропередачи различного класса напряжений, кольцевые перетоки мощности в неоднородных сетях, приводящие к неполному использованию созданных электрических сетей, к повышенным потерям.
6. Ограничение по условиям устойчивости синхронных генераторов, в том числе в режимах потребления реактивной мощности.

Решением этих и смежных с ними проблем специалисты занимались на протяжении всей истории развития электроэнергетических систем и электрических сетей, в частности.

Значительное внимание уделялось проблемам устойчивости, повышению пропускной способности линий электропередачи, созданию рациональных конструкций электрических сетей, повышению их натуральной мощности, созданию и внедрению в практику различных устройств регулирования реактивной мощности и др.

Огромные и всеобъемные работы были в течение многих лет выполнены в СССР, где была создана наиболее передовая в мире научная школа по проблемам функционирования электроэнергетических систем. Трудами наших ученых и специалистов была создана и до сих пор успешно эксплуатируется Единая энергосистема СССР, ныне Единая энергосистема России.

Количество выдающихся отечественных ученых и специалистов, внесших свой вклад в мировую теорию и практику электроэнергетических систем, столь велико, что если привести их фамилии, то только перечисление этих имен составило бы многостраничную книгу. Авторы данной книги высоко ценият труды этих специалистов.

Как уже отмечалось, во всем мире и в СССР, а ныне в России, были разработаны и созданы различные устройства регулирования реактивной мощности, поддержания устойчивости, повышения пропускной способности.

Это синхронные турбо- и гидрогенераторы с сильным регулированием, синхронные и статические компенсаторы реактивной мощности, различного рода управляемые щунтирующие реакторы, трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой и фазоповоротные, мощные конденсаторы для установок с нерегулируемой продольной компенсацией.

В течение последних 15–20 лет во всем мире получает бурное развитие техника и технология, основанная на применении устройств современной электроники, позволяющая в темпе реального времени управлять не только величиной, но и фазой вектора напряжения в той или иной точке подключения этого устройства к электроэнергетической системе.

В трудах института EPRI (США) эта технология получила название управляемых (гибких) систем электропередачи переменного тока (в английской транскрипции FACTS). Несколько позже к устройствам FACTS стали относить как новые, так и ранее созданные — традиционные устройства регулирования реактивной мощности.

Как уже отмечалось в предисловии, в 1950–1960-х гг. в СССР во ВНИИЭ, а позже и в других организациях совместно с ВНИИЭ была разработана теория, созданы и внедрены в электроэнергетические системы не имеющие мировых аналогов асинхронизированные машины. Несколько позже (спустя почти 20 лет) производство подобного рода гидрогенераторов и компенсаторов реактивной мощности было освоено вначале в Японии, а затем в Европе.

По своим режимным свойствам асинхронизированные машины являются аналогом новейших статических устройств FACTS, поэтому мы их также относим к устройствам управляемых (гибких) электропередач переменного тока.

Настоящая книга состоит из семи глав. В первой главе приводятся основные понятия по проблемам обеспечения устойчивости электроэнергетических систем, повышения пропуск-

ной способности и управления режимами работы электрических сетей.

Во второй, третьей и четвертой главах описываются традиционные устройства поперечной и продольной компенсации, такие как управляемые шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы, тиристорно-управляемые устройства продольной компенсации.

В четвертой главе обобщается опыт эксплуатации упомянутых выше устройств FACTS.

В пятой главе описываются фазоповоротные устройства (ФПУ), которые могут быть отнесены как к традиционным, так и к новейшим устройствам FACTS. В первом случае — это ФПУ, отпайки которых коммутируются выключателями, во втором — вместо выключателей используются тиристорные преобразователи.

Шестая и седьмая главы посвящены новейшим статическим и электромашинным устройствам FACTS, опыту их разработки и практики применения.

В заключительной части книги дана классификация устройств FACTS: традиционных, новейших и перспективных, изложены соображения авторов по развитию этого направления в электроэнергетических системах России.