

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

ШАКАРЯН Ю.Г., ЛАБУНЕЦ И. А., ОАО «НТЦ электроэнергетики»

ПИНЧУК Н.Д., КАДИ-ОГЛЫ И. А., ОАО «Силовые машины» – Электросила»

ШУЛЬГИНОВ Н.Г., ДЬЯЧКОВ В.А., ОАО «СО ЕЭС»

ВОРОНИН В.А., ТУЗЛУКОВА Е.В., ОАО «Институт «Энергосетьпроект»

ЗИНАКОВ В.Е., АРШУНИН С.А., ОАО «Мосэнерго»

Многолетними и фундаментальными работами в области проектирования и конструирования синхронных турбогенераторов (СТГ) и их систем возбуждения, исследованиями и разработками в области регулирования возбуждения достигнуты достаточно высокие показатели их надежности и устойчивости работы в электроэнергетических системах.

Вместе с тем специфические особенности СТГ, обусловленные их принципом действия, не позволяют в ряде случаев решать наилучшим образом существующие и вновь возникающие в электроэнергетических системах проблемы, обеспечить требуемую степень устойчивости, надежность и экономичность работы электроэнергетических систем в нормальных (установившихся) и в переходных (динамических) режимах работы.

К наиболее актуальным из вышеуказанных проблем относятся нижеследующие.

НАГРУЗКА КРУПНЫХ ГОРОДОВ И МЕГАПОЛИСОВ

Характеризуется резкой неравномерностью в течение суток, года, и эта неравномерность по мере их развития только возрастает. Потребление электроэнергии в ночные и дневные часы резко отличается, что приводит к значительным колебаниям напряжения и необходимости его регулирования и стабилизации, а также обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии, установки в сети средств

компенсации реактивной мощности, способных как генерировать, так и потреблять реактивную мощность.

СТГ способны работать в режимах выдачи реактивной мощности и лишь незначительно в режимах ее потребления, так как подобные режимы работы приводят к рискам нарушения устойчивой работы генерирующего оборудования, перегрева крайних пакетов стали статоров, повреждения их конструкции, а иногда и аварий. В существующих условиях решение проблем обеспечения допустимых режимов работы генерирующего оборудования обычно возлагается на дополнительно устанавливаемое в электрических сетях электрооборудование для компенсации избытков реактивной мощности, что сопряжено с повышенными капитальными затратами и не всегда технически эффективно.

РОСТ ПРОТЯЖЕННОСТИ И РАЗВЕТВЛЕННОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ (110–750 кВ)

Создает проблемы обеспечения устойчивой работы генераторов при передаче энергии на большие расстояния, а повышение класса напряжений линий электропередачи – проблемы необходимости регулирования в широких пределах реактивной мощности с целью обеспечения требуемого качества напряжения. Особую остроту данные проблемы приобретают в ремонтных и послеаварийных режимах.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В рыночных условиях функционирования электроэнергетики надежность имеет особо важное значение. Аварии на генерирующих объектах, в том числе и на СТГ, должны минимальным образом сказываться на проблемах энергоснабжения потребителей. Известно, что аварии в системах возбуждения СТГ приводят к необходимости их немедленной разгрузки до 60–40 % и последующему отключению энергоблоков от сети в течение 15–30 минут.

Идеи создания более совершенных генераторов, нежели СТГ, возникали еще в начале XX века в связи с разработкой так называемых коллекторных каскадов. Однако отсутствие теории, средств регулирования и возбуждения не позволяли решить эту проблему. Только начиная с 1956 года в СССР во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроэнергетики (ВНИИЭ) по инициативе и под научным руководством профессора, д.т.н. М.М. Ботвинника были начаты систематические исследования по созданию нового типа электрических машин переменного тока – асинхронизированных (АС) машин. На основе этих исследований в 1967 г. во ВНИИЭ (М.М. Ботвинник и др.) совместно с ЛПЭО «Электросила» были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию не имевшие мировых аналогов два опытно-промышленных образца АС-гидрогенераторов мощностью по

40 МВт (Иювская ГЭС). Их длительная опытно-промышленная эксплуатация подтвердила на практике теорию и основные свойства и характеристики АС-машин.

Позднее в институте были проведены исследования по оценке возможности создания и применения синхронных компенсаторов со «слабой» поперечной обмоткой для повышения устойчивости работы таких компенсаторов в электрических сетях (Н. И. Соколов и др.).

В начале 80-х годов на основе развитой теории АС-турбогенераторов во ВНИИЭ (Ю. Г. Шакарян, И. А. Лабунец и др.) совместно с заводами «Электротражмаш» (г. Харьков), ПО «Уралэлектротражмаш», (г. Екатеринбург) и ВЭИ (г. Москва) были разработаны и изготовлены не имеющие на сегодняшний день аналогов в мировой практике АС-турбогенераторы типа АСТГ-200 мощностью 200 МВт с водородно-водяным охлаждением, первые образцы которых были введены в эксплуатацию на Бурштынской ГРЭС (Львовэнерго) в 1985–1991 гг. и которые успешно работают до настоящего времени. АС-турбогенераторы данного типа в 1991 г. НПО «Электротражмаш» запустило в серийное производство.

С начала 2000 г. по инициативе ОАО «Мосэнерго» специалистами ОАО «ВНИИЭ», ОАО «Институт «Энергосетьпроект» и ОАО «Мосэнерго» была разработана программа оснащения (при модернизации и новом строительстве) ряда ТЭС ОАО «Мосэнерго» АС-турбогенераторами, что было обусловлено необходимостью оптимального решения острейших проблем регулирования реактивной мощности, повышения надежности эксплуатации и снижения аварийности турбогенераторов ТЭС ОАО «Мосэнерго».

Современные достижения филиала ОАО «Силовые машины» – «Электросила» в области конструирования и технологии производства турбогенераторов, разработка и освоение производства СТГ с полностью водяным и полностью воздушным охлаждением послужили мощной базой для разработки и создания АС-турбогенераторов. В течение 2000–2002 гг. на заводе была подготовлена конструкторская документация и технологическая база по серийному производству АС-турбогенераторов

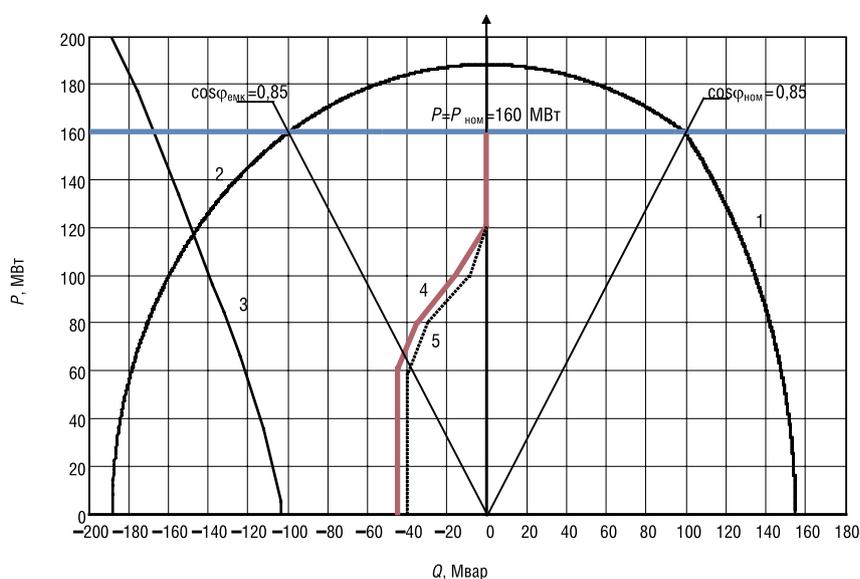


Рис. 1. Диаграмма допустимых режимов работы турбогенератора ТЗФАУ-160 (бл.№3 ТЭЦ-27 «Мосэнерго») при номинальном напряжении на шинах статора. 1 – ограничение по номинальному току возбуждения; 2 – ограничение по номинальному току статора; 3 – асинхронная характеристика; 4 – ограничение минимального возбуждения – ОМВ (при работе в резервном синхронном режиме); 5 – ОМВ синхронного турбогенератора ТЗФГ-160

мощностью 110–350 МВт в вариантах: с полностью водяным, комбинированным и с полностью воздушным охлаждением.

С 2002 г. на заводе «Электросила» началось серийное производство АС-турбогенераторов мощностью 110–160 МВт с полностью воздушным и 320 МВт с комбинированным воздушно-водяным охлаждением. Подготовлены к производству две модификации АС-турбогенераторов с симметричными (одинаковыми) обмотками возбуждения (ОВ) и с несимметричными (основная и управляющая) ОВ, отличающиеся друг от друга допустимым диапазоном регулирования реактивной мощности и иными техническими показателями и характеристиками. В то же время, параллельно с разработкой АС-турбогенераторов, были разработаны и созданы системы силовой элементной базы и микропроцессорная система регулирования этих машин.

Область допустимых режимов работы АС-турбогенераторов может быть отображена в виде P-Q диаграммы, из которой видно, в каком диапазоне может изменяться реактивная мощность при фиксированном значении активной мощности. Сопоставительная диаграмма допустимых режимов работы на примере АС-турбогенератора

ТЗФАУ-160 и СТГ типа ТЗФГ-160 (аналога) показана на рис. 1.

Как видно из диаграммы, в режимах выдачи реактивной мощности (правая часть диаграммы) ограничением является номинальный ток ротора (ограничение 1). В этой части диаграммы АС-турбогенератор типа ТЗФАУ-160 и его СТГ аналог – типа ТЗФГ-160 обладают одинаковыми свойствами.

В режимах потребления реактивной мощности (левая часть диаграммы) для генератора ТЗФГ-160 по условиям статической и динамической устойчивости вводится ограничение минимального возбуждения (ОМВ) – ограничение 5 на рис. 1. Для АС-турбогенератора ТЗФАУ-160 ОМВ отсутствует, т.к. в этой зоне режимов статическая и динамическая устойчивость обеспечиваются, а ограничением в режимах с потреблением реактивной мощности является только номинальный ток статора – ограничение 2 на рис. 1. Из диаграммы видно, что в режимах потребления реактивной мощности АС-турбогенератор обладает более широким диапазоном регулирования реактивной мощности по сравнению с СТГ. Например, при номинальной активной мощности $P = 160$ МВт СТГ типа ТЗФГ-160 может работать только с нулевой реактивной мощностью.

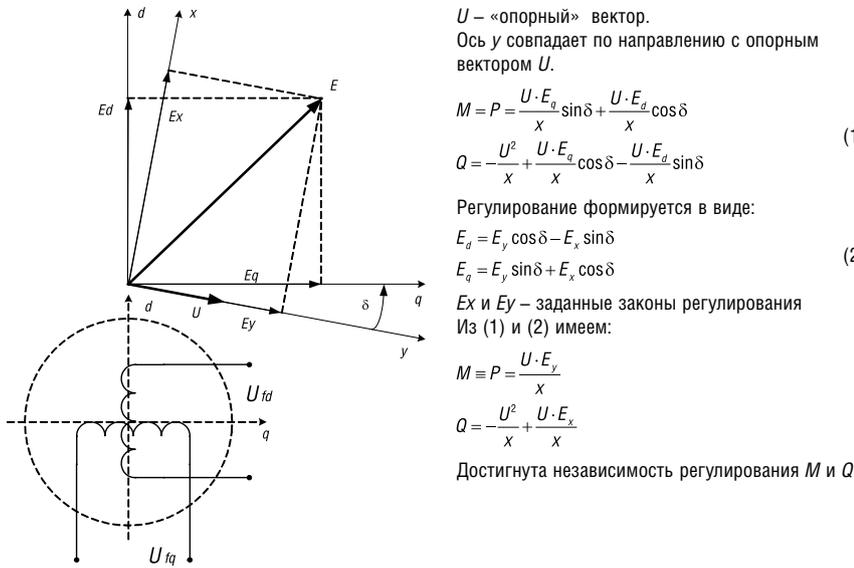


Рис. 2. Основные свойства машины с векторным регулированием

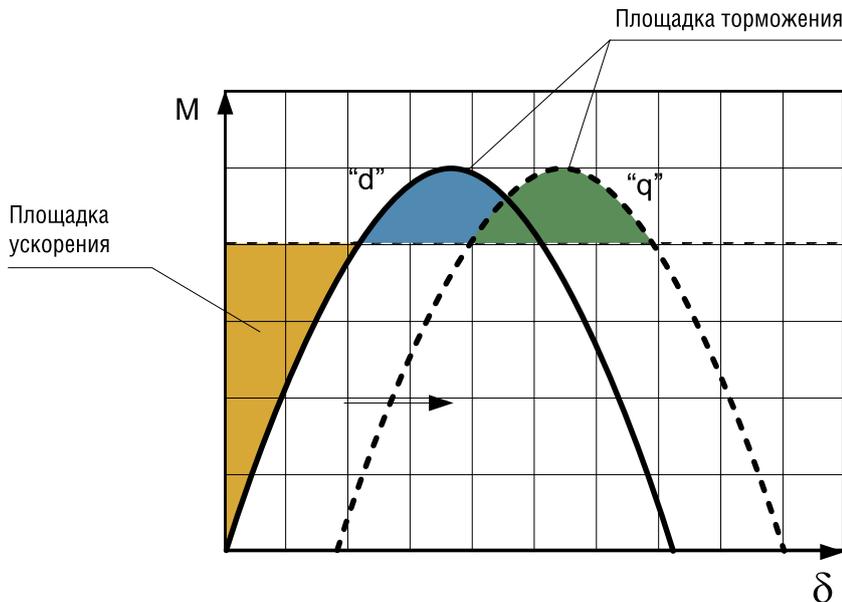


Рис. 3. Эффективность векторного регулирования в динамике

При той же активной мощности АС-турбогенератор ТЗФАУ-160 может потреблять до 100 МВА реактивной мощности.

Структура продольно-поперечных ОВ и наличие реверсивных возбудителей у каждой ОВ дают возможность в переходных режимах оптимально ориентировать м.д.с. генератора с целью создания максимального тормозящего электромагнитного момента. При сильных возмущениях, когда возможности управления ограничены «потолочным» напряжением возбуждения, оптималь-

ная ориентация м.д.с. возбуждения достигается автоматически по командам АРВ сочетанием форсировок и расфорсировок напряжений на ОВ по осям d и q (рис. 2, 3).

Поскольку управление каналом напряжения может осуществляться независимо от электромеханического процесса качаний ротора, то в условиях, когда напряжение возбуждения не достигает потолочных значений, можно повысить качество регулирования напряжения на шинах станции. Это, в частности, способствует повы-

шению динамической устойчивости параллельно работающих синхронных турбогенераторов и ускоряет восстановление нормального энергоснабжения потребителей.

Результаты исследований режимов работы АС-турбогенераторов показали, что уровень их динамической устойчивости мало зависит от режима работы по реактивной мощности и выше, чем у синхронных генераторов, которые в режимах потребления реактивной мощности требуют глубокого снижения нагрузки.

При механических возмущениях (полный сброс момента турбины до нуля с последующим восстановлением) наличие в группе АС-турбогенераторов оказывает положительное влияние на динамические процессы параллельно работающих СТГ, а в случае работы в группе только АС-турбогенераторов самораскачивание отсутствует, переходные процессы затухают очень быстро. Аналогичные результаты имеют место при к.з. – введение в группу АС-турбогенераторов приводит к существенному повышению общего предела устойчивости, что особенно проявляется при наличии таких факторов, как режимы потребления реактивной мощности и увеличенная длина линии электропередачи (слабые связи). С усилением этих факторов даже относительно малое количество АС-турбогенераторов в группе оказывает большое влияние. При сравнительно коротких линиях (сильные связи) переходные процессы синхронных и АС-турбогенераторов в группе имеют более независимый характер, при этом АС-турбогенераторы обычно возвращаются в исходные режимы, но наблюдаются случаи нарушения устойчивости СТГ.

Для современных АС-турбогенераторов, как с симметричными, так и с несимметричными системами ОВ, реализован принцип векторного управления возбуждением, что позволило решить ряд проблем их устойчивости в статических и динамических режимах.

Благодаря векторному управлению возбуждением АС-турбогенераторы обладают одинаково высоким пределом динамической устойчивости как в режимах выдачи, так и глубокого потребления реактивной мощности. Кроме того, повышенная управляемость

позволяет эффективно демпфировать колебания в переходных режимах.

На рис. 4 приведены зависимости максимально допустимой длительности трехфазного короткого замыкания на шинах станции по условию динамической устойчивости для различного количества соотношения АС-турбогенераторов и СТГ на станции.

Из рисунка видно, что если на электростанции установлены только АС-турбогенераторы, то динамическая устойчивость практически не зависит от режима работы по реактивной мощности, при этом допустимая длительность короткого замыкания максимальна (кривая 2). В том случае, если на электростанции установлены только СТГ, наблюдается тенденция к резкому снижению предела динамической устойчивости по мере приближения к зоне потребления реактивной мощности (кривая 1). Максимальная длительность короткого замыкания в этом случае значительно меньше, чем при применении АС-турбогенераторов. Анализ кривых 3–5 показывает, что при увеличении количества АС-турбогенераторов на электростанции предел динамической устойчивости повышается, особенно в зоне потребления реактивной мощности.

Рассматривая характер электро-механического переходного процесса при трехфазном коротком замыкании на шинах станции, можно отметить, что у АС-турбогенераторов процесс восстановления напряжения происходит быстрее, время завершения переходного процесса составляет 3 с (при времени завершения переходного процесса 6 с для СТГ). Кроме того, АС-турбогенератор способствует демпфированию колебаний параллельно работающих СТГ.

Следует еще раз подчеркнуть, что АС-турбогенераторы могут устойчиво работать в номинальном режиме с $\cos \varphi = 1,0$, а также не имеют дополнительных ограничений по условиям электро-механических нагрузок торцевых зон статоров. При этом единственным ограничением по выдаче активной мощности генератором является номинальный ток статора, т.е. его выдаваемая мощность, в принципе, может быть повышена на 10–15 %. Это их очень важное достоинство может позволить рассматривать их в этом режиме как альтернативу при-

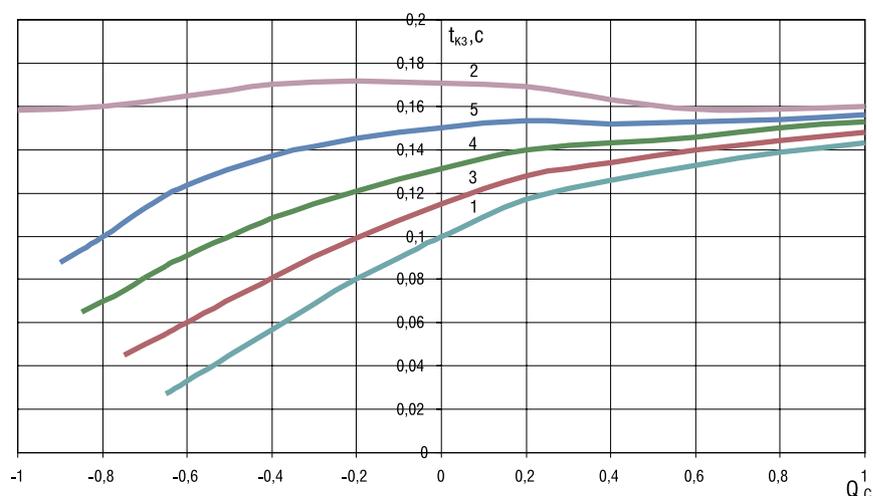


Рис. 4. Максимальные длительности короткого замыкания по условию динамической устойчивости для вариантов состава генераторов на станции: 1 – «4 СТГ»; 2 – «4 АСТГ»; 3 – «1 АСТГ + 3 СТГ»; 4 – «2 АСТГ + 2 СТГ»; 5 – «3 АСТГ + 1 СТГ»

менения СТГ в сочетании с компенсирующими устройствами для снижения затрат на генерацию [2].

АС-турбогенераторы имеют 2 резервных режима (синхронный – при отказе канала возбуждения управляющей обмотки, и асинхронный – при полном отказе (аварии) системы возбуждения), позволяющих не отключать энергоблок в этих аварийных ситуациях и продолжать неограниченно длительную эксплуатацию энергоблока, хотя и при несколько меньших нагрузках и с соответствующими ограничениями по регулированию реактивной мощности.

Особенности конструкции АС-турбогенераторов и структуры его системы возбуждения, наличие двухканальной системы возбуждения АС-турбогенераторов (две обмотки возбуждения и два реверсивных тиристорных возбудителя) предоставляет принципиально новые возможности для сохранения работоспособности генератора при отказах элементов системы возбуждения, в том числе регулятора возбуждения, т.е. для повышения живучести генератора.

При аварии в системе возбуждения генератор переводится в неуправляемый асинхронный режим, с замыканием обеих обмоток возбуждения накоротко или на «симметрирующие» сопротивление (для АС-турбогенераторов с управляющей обмоткой возбуждения).

Поскольку в АС-турбогенераторах система замкнутых цепей обмоток

ротора симметрична, то замыкание обеих обмоток возбуждения накоротко или на «симметрирующее» сопротивление не приводит к появлению «эффекта одноосного включения» и к другим сопутствующим эффектам, присущим синхронным турбогенераторам. Более того, симметричный короткозамкнутый контур обмоток возбуждения обеспечивает создание жесткой асинхронной характеристики с относительно высокой величиной максимального электромагнитного момента при весьма малом скольжении.

Например, турбогенератор ТЗФА-110 в асинхронном режиме (с замкнутыми накоротко обмотками возбуждения) может нести неограниченно длительно нагрузку до 60–70 % от номинальной активной мощности.

На рис. 5 приведены осциллограммы перехода турбогенератора ТЗФА-110 бл. № 8 ТЭЦ-22 в асинхронный режим (без возбуждения) и обратно в штатный режим – асинхронизированный. Как видно, такие переходы проходят успешно за время 2–3 с без существенных колебаний активной мощности.

В асинхронном режиме (без возбуждения) АС-турбогенератор, в отличие от СТГ, может работать неограниченно долго. В этом случае, в соответствии с асинхронной характеристикой (рис. 1, кривая 3), генератор работает с потреблением реактивной мощности. Обратный переход в штатный режим

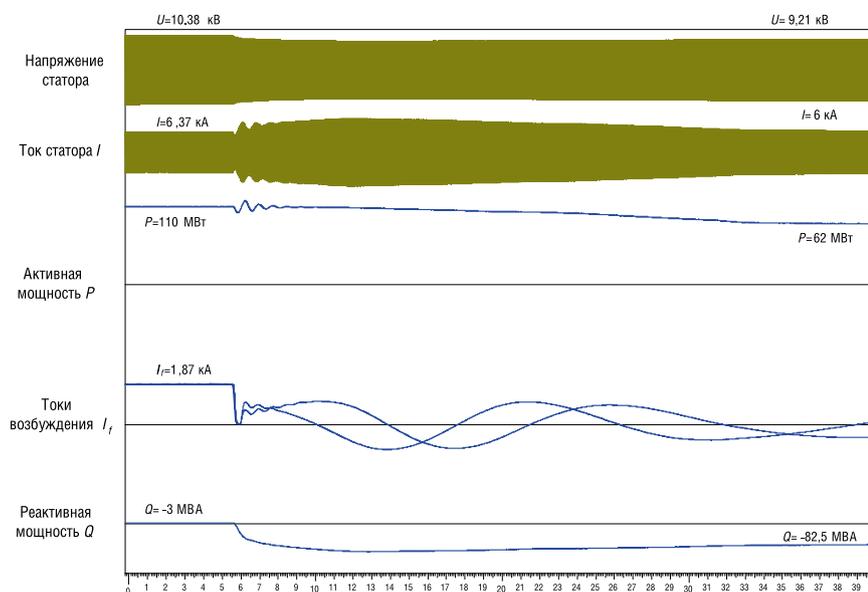


Рис. 5. Переход в асинхронный режим АС-турбогенератора ТЗФА-110 с автоматической разгрузкой турбины до номинальной асинхронного (резервного) режима

осуществляется по команде оперативного персонала.

В 2003 г. на ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» был введен в эксплуатацию АС-турбогенератор типа ТЗФА-110 с симметричными обмотками возбуждения. Успешная эксплуатация данного турбогенератора продолжается и в настоящее время, при этом реактивная мощность регулируется в широких пределах (от режимов выдачи до режимов глубокого потребления) в соответствии с требованиями диспетчерского персонала. Подтверждена на практике также возможность его длительной работы в асинхронных режимах без возбуждения (при замкнутых накоротко обмотках возбуждения, рис. 1).

В 2007 г. на энергоблоке № 3 ТЭЦ-27, на паровой турбине в составе парогазовой установки ПГУ-450 введен в эксплуатацию АС-турбогенератор типа ТЗФАУ-160 (с управляющей обмоткой возбуждения) мощностью 160 МВт с полностью воздушным охлаждением и обеспечивающий полное (100 %) регулирование реактивной мощности как в режимах выдачи, так и в режимах потребления (рис. 5).

В 2008 г. два аналогичных АС-турбогенератора в составе ПГУ-450 введены в эксплуатацию на энергоблоке № 11 ТЭЦ-21 и энергоблоке № 4 ТЭЦ-27 ОАО «Мосэнерго».

В 2009 г. на энергоблоке № 3 Каширской ГРЭС вводится в эксплуатацию АС-турбогенератор типа ТЗФСУ-320 (с управляющей обмоткой возбуждения) мощностью 320 МВт с комбинированной системой охлаждения.

На заводе разработаны конструкции и подготовлена технологическая база по изготовлению АС-турбогенераторов мощностью 500, 800 и 1000 МВт.

На основе разработанных технологических решений в области АС-турбогенераторов на заводе создана конструкторская и технологическая база для выпуска АС-компенсаторов реактивной мощности 50, 100 и 160 МВА с полностью воздушным охлаждением. В отличие от традиционных, АС-компенсаторы отличаются возможностью регулирования реактивной мощности в более широком диапазоне ($\pm 100\%$) и имеют полностью воздушную систему охлаждения, а также тем, что они допускают 2–3-кратную перегрузку по мощности, что чрезвычайно важно для предотвращения процессов «лавины напряжения» и для повышения уровня устойчивости энергосистемы.

По заказу ОАО «ФСК ЕЭС» в 2008 г. на подстанцию 500 кВ «Бескудниково» МЭС Центра поставлены два АС-компенсатора мощностью по 100 МВА каждый в комплекте с системами пуска и возбуждения. В настоящее время

завершается стадия их подготовки к вводу в эксплуатацию.

В 2008 г. по заданию Системного оператора ЕЭС России ОАО «НТЦ электроэнергетики» и ОАО «Институт Энергосетьпроект» совместно с ОАО «ФСК ЕЭС», МЭС, ОГК и ТГК выполнили работу по уточнению перечня тепловых электростанций и подстанций, на которых в период до 2020 г. должны быть установлены АС-турбогенераторы.

В результате были разработаны обобщенные критерии применения АС-турбогенераторов в ЕНЭС России, и, в частности, по ОЭС Урала был определен перечень тепловых электростанций, разбитый на 3 группы по степени важности рассмотрения технико-экономической целесообразности установки на них АС-турбогенераторов (в частности, к первой группе отнесены ГРЭС: Сургутская ГРЭС-2, Серовская, Южноуральская, Няганская, Уренгойская, Череповецкая, Харанорская, Щекинская, Беловская); ко второй – Пермская, Рефтинская, Березовская, Гусиноозерская, Костромская, Черепетская, Киришская); к третьей – Кармановская, Троицкая, Яйвинская, Нововоронежская, Конаковская, Северо-западная ТЭЦ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АС-турбогенераторы при несколько большей (на 15–25 %) стоимости, чем СТГ, обладают рядом преимуществ перед последними:

- увеличенные диапазоны по регулированию реактивной мощности (по напряжению);
- более высокие уровни статической и динамической устойчивости, более надежное функционирование в аварийных режимах (высокая «живучесть»);
- уменьшение затрат на установку в сетях замещающего компенсирующего оборудования;
- повышение надежности (увеличение межремонтных периодов) параллельно работающих СТГ за счет вывода последних в наиболее благоприятные для них режимы с выдачей реактивной мощности;
- существенное повышение надежности работы парогазовых установок (ПГУ) за счет высокой устойчивости и «живучести» АС-турбогенераторов и соответственно их благоприятного

Бесплатная электронная версия журнала предоставлена компанией

. Другие номера журнала на сайте редакции:

влияния на параллельно работающие СТГ в составе ПГУ, особенно в переходных и аварийных режимах.

Следует отметить, что многие проблемы технико-экономического обоснования установки АС-турбогенераторов на тепловых электростанциях могли бы эффективно решаться при условии создания механизма расчетов (системные услуги) между генерирующими и сетевыми компаниями за услуги по компенсации реактивной мощности (выдача и потребление) [1–3].

АС-турбогенераторы – одно из эффективных средств решения указанных проблем.

По мнению авторов, в практическом применении АС-турбогенераторов заинтересованы все субъекты энергетического рынка: генерирующие компании – в части повышения надежности эксплуатации параллельно работающих СТГ; сетевые компании – в части минимизации потерь и снижения затрат на установку компенсирующих устройств; системный оператор – в части наличия в системе генераторов, обладающих большими регулировочными возможностями по реактивной мощности (на-



Асинхронизированный турбогенератор типа ТЗФАУ-160-2 на энергоблоке № 3 ТЭЦ-27 «Мосэнерго»

пряжению) и по повышению уровня устойчивости энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reactive power pricing. Problems and a proposal for a competitive market. Rabiee A., Shayanfar H.A., Amjady N. IEEE Power and Energy Magazine, January/ February 2009, pp. 18–32.

2. Алексеев Б.А. Использование генераторов на электростанциях для выдачи и поглощения реактивной мощности. Энергоэксперт № 5, 2008, с. 88.

3. Виноградов И.В. Как заставить потребителя платить за реактивную мощность? Энергоэксперт № 5, 2008 г., с. 46–48.

II СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФОРУМ • 2009

КАВКАЗ-ЭНЕРГО 29–31 ОКТЯБРЯ КИСЛОВОДСК

Организаторы: ВЦ «РОСТЭКС», ВЦ «Кавказ»
При поддержке: Правительства Ставропольского края; Министерства промышленности, энергетики и транспорта Ставропольского края; ОАО «МРСК Северного Кавказа»

ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Реклама

РОСТЭКС ВЫСТАВКИ ЮГА РОССИИ

КАВКАЗ

ЭНЕРГОЭКСПЕРТ

Тел.: (863) 240-32-60/62; (87937) 331-79/74
rostex@aaanet.ru • www.rostex-expo.ru