АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ – ИННОВАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

АВТОРЫ:

ШАКАРЯН Ю. Г.,
Д.Т.Н., ПРОФ.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

СОКУР П. В.,
К.Т.Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

АРШУНИН С. А.
ОАО «МОСЭНЕРГО»

Россия – лидер по применению асинхронизированных турбогенераторов (АСТГ). Здесь изготовлены и введены в эксплуатацию уникальные образцы, не имеющие аналогов в мире. Круг задач, решаемых с их помощью, огромен: генерация электроэнергии, асинхронизированный привод, асинхронизированные компенсаторы и даже устройства для несинхронной связи двух энергосистем. Применение АСТГ увеличивает надежность работы генерирующего оборудования.

Асинхронизированный турбогенератор ТЗ ФСУ-320–2У3 мощностью 320 МВт на блоке № 3 Каширской ГРЭС

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ: ОТ ИДЕИ К ВНЕДРЕНИЮ

Шестьдесят лет тому назад Михаил Моисеевич Ботвинник, размышляя о проблеме повышения статической устойчивости синхронных генераторов, пришел к идее так называемого сильного регулирования возбуждения [1]. Идея оказалась очень плодотворной. Разработанные на ее основе автоматические регуляторы возбуждения сильного действия (АРВСД) позволили существенно поднять мощность, передаваемую по линиям электропередачи (ЛЭП), и увеличить длину ЛЭП при сохранении необходимых запасов статической устойчивости синхронных генераторов электростанций. Подход оказался весьма и весьма успешным и породил широкое внедрение АРВСД, практически повсеместное, в том числе и вне пределов СССР.

Применение АРВСД на синхронных генераторах значительно расширило диапазон стабильной работы генераторов. Однако проблему, связанную с зависимостью устойчивости работы от углового положения ротора (т. е. угла между ЭДС генератора и напряжением генератора), преодолеть не удалось. Таким образом, следует иметь в виду, что синхронные генераторы всегда обладают определенным ограничением по устойчивости. Это их принципиальное свойство.

Ботвинник выдвинул также идею создания особой электрической машины, которая сочетала бы одновременно как положительные свойства синхронных, так и достоинства асинхронных машин.

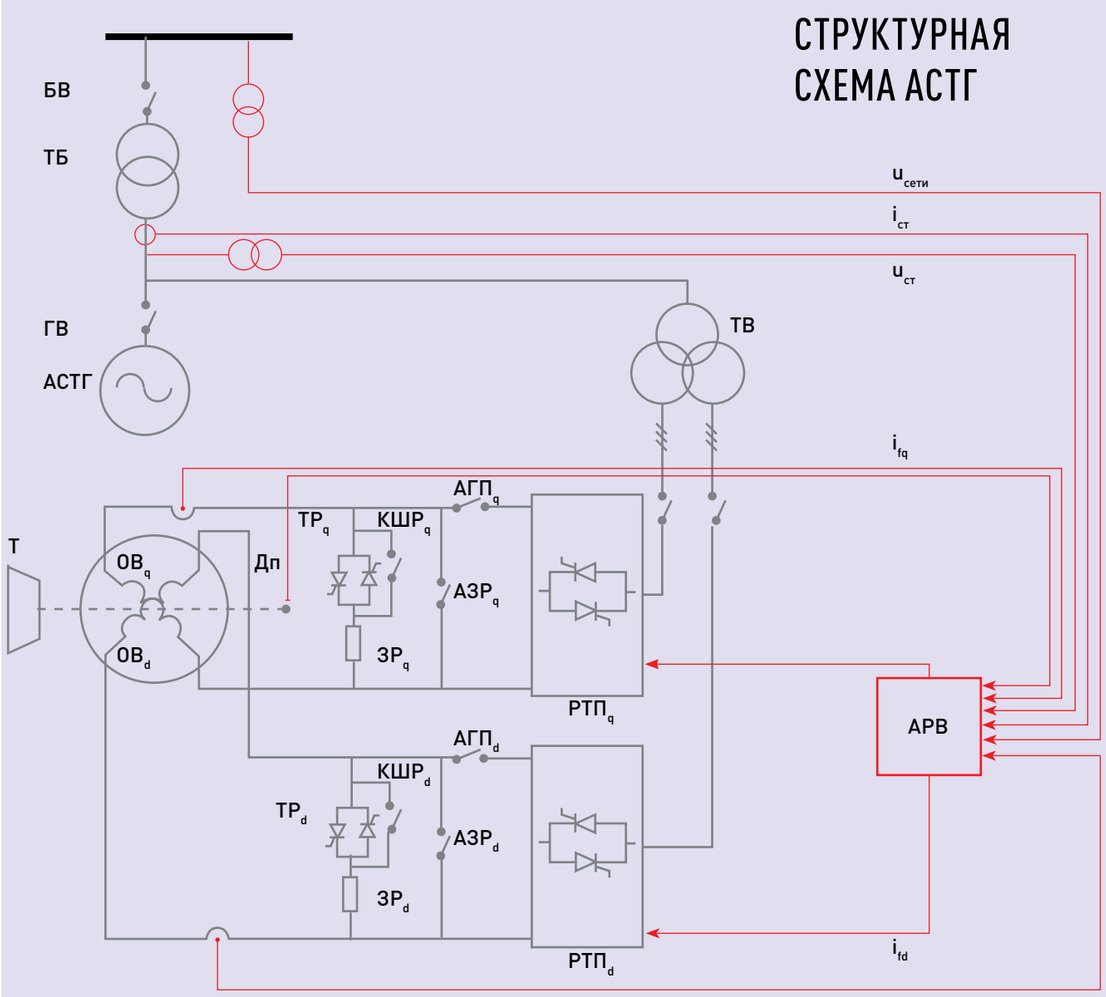
Устойчивость асинхронной машины (работающей без возбуждения) лимитируется не углом, а ее скольжением. Электрическая машина, имеющая возбуждение и обладающая устойчивостью по скольжению, называется асинхронизированной. Исследование таких устройств является, с одной стороны, важной практической задачей, а с другой стороны, составляет суть весьма нетривиальной проблемы. Именно поэтому в свое время во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроэнергетики (ныне ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС») была образована лаборатория «Асинхронизированные машины», призванная использовать теоретические идеи для создания реальной машины. В результате совместной работы с другими исследовательскими организациями и заводами («Электросила», «Уралэлектротяжмаш» и «Электротяжмаш») были разработаны и введены в эксплуатацию два асинхронизированных гидрогенератора мощностью по 40 МВт на Иовской ГЭС и гидрогенератор мощностью 400 кВт для опытной Кислогубской приливной электростанции, а также семь асинхронизированных турбогенераторов мощностью от 110 до 320 МВт и два асинхронизированных компенсатора мощностью по 100 МВА.

В 1955 году М. М. Ботвинник выдвинул идею и в дальнейшем разработал основы теории электрических машин нового типа – с продольно-поперечным возбуждением, названных асинхронизированными машинами. Первая в мире обобщающая теоретическая работа в этой области была написана Михаилом Моисеевичем в 1960 году и опубликована сначала в СССР, а затем в Великобритании

ИНФОРМАЦИЯ

АСИНХРОНИЗИРОВАННАЯ МАШИНА

Электрическая машина с возбуждением, сконструированная так, что положение вектора магнитного потока не зависит от пространственного положения ротора. Это свойство достигается за счет наличия на роторе многофазной обмотки возбуждения, реверсивного многофазного (по числу обмоток возбуждения) возбудителя и асинхронизированного принципа управления возбуждением. При отказе системы возбуждения асинхронизированная машина становится обычной асинхронной машиной.



ГВ – генераторный выключатель, БВ – блочный выключатель, ТБ – трансформатор блочный, Т – турбина, ОВ – обмотка возбуждения, Дп – датчик углового положения ротора, ТР – тиристорный разрядник, ЗР – защитный резистор, КШР – контактор-шунтирующий разрядник, АГП – автомат гашения поля, АЗР – автомат закорачивания ротора, РТП – реверсивный тиристорный преобразователь, ТВ – трансформатор системы возбуждения, АРВ – автоматический регулятор возбуждения

Рис. 1

СВОЙСТВА, ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ И СИНХРОННЫХ МАШИН

Так в чем же состоит основное отличие асинхронизированной машины от синхронной? В отличие от последней на роторе асинхронизированной машины находится две или три обмотки возбуждения. Такой ротор может питаться как постоянным, так и переменным током. При использовании постоянного тока, в отличие от обычной синхронной машины, происходит векторное управление возбуждением. Это обеспечивает устойчивую работу при любом угле нагрузки вплоть до 180°. В случае переменного тока поле возбуждения вращается относительно ротора, и при этом сохраняется синхронность с полем статора.

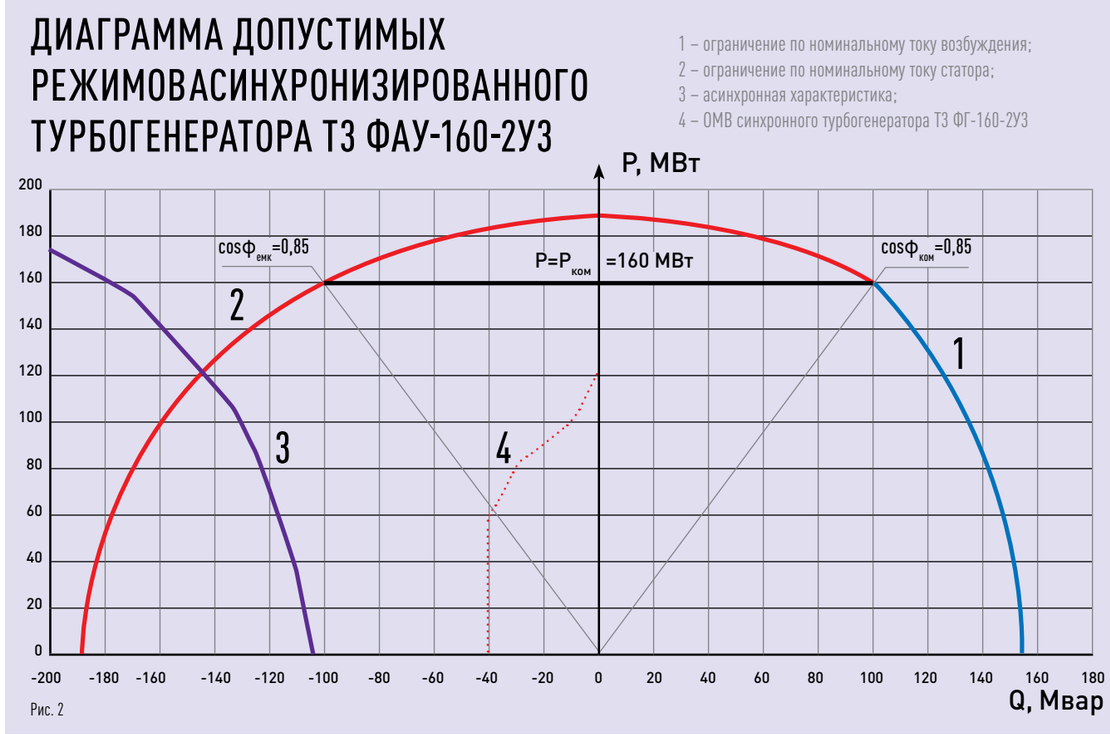


Рис. 2

В результате появляется возможность работы с переменной частотой вращения турбины, что актуально для гидрогенераторов, а также генераторов ветроустановок.

Круг задач, решаемых с помощью асинхронизированных машин, огромен. Это не только генерация электроэнергии, но и асинхронизированный привод, асинхронизированные компенсаторы и даже устройства для несинхронной связи двух энергосистем. В мировой электроэнергетике такие машины нашли широкое применение в ветро- и гидроэнергетике, где за счет использования переменной частоты вращения гидротурбины и ветроколеса удается существенно повысить эффективность работы генерирующего оборудования.

Наша страна является лидером по применению асинхронизированных турбогенераторов. Поскольку турбогенераторы имеют массивный ротор, то работа в установившихся режимах со скольжением не выгодна, т. к. возникают большие потери в массиве ротора. Поэтому в установившихся режимах АСТГ работают с синхронной частотой вращения. При этом осуществляется независимое регулирование электромагнитного момента и напряжения.

На рис. 1 приведена структурная схема АСТГ. Каждая из обмоток возбуждения питается от реверсивного тиристорного преобразователя (РТП), управляемого АРВ, реализующим асинхронизированный принцип управления.

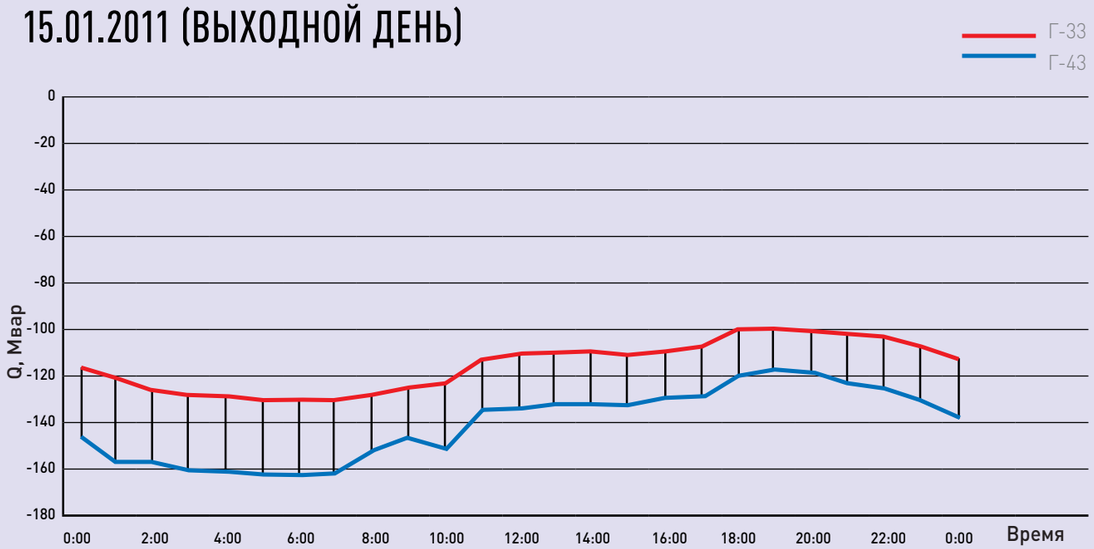
Возможность независимого управления током в двух осях позволяет осуществлять вращение или поворот результирующего вектора магнитного потока независимо от текущего углового положения ротора в отличие от синхронного генератора, где магнитное поле жестко связано с ротором. Таким образом, у синхронного генератора осуществляется скалярное управление возбуждением, а асинхронизированного генератора – векторное.

Как известно, у синхронных турбогенераторов в режимах с недовозбуждением вводится ограничение минимального возбуждения (ОМВ), связанное с повышением нагрева торцевых зон статора и значительным снижением запасов статической и динамической устойчивости.

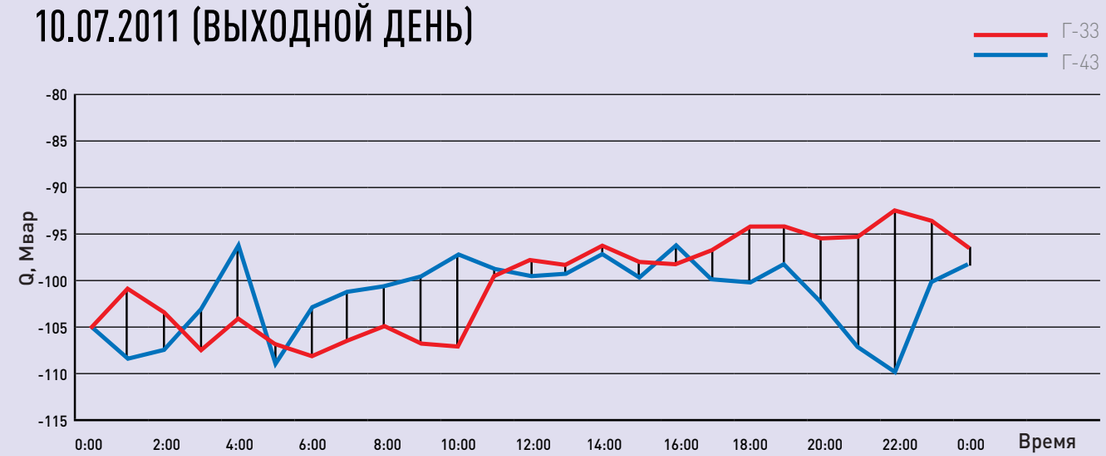
У асинхронизированных турбогенераторов эти вопросы решены, и диаграмма допустимых режимов в ее левой части ограничена только номинальным током статора. Как видно из рис. 2, асинхронизированные турбогенераторы обладают

СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ ПО РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ № 33 И № 43 ТЭЦ-27 «МОСЭНЕРГО» ДЛЯ ЗИМНЕГО И ЛЕТНЕГО ДНЯ

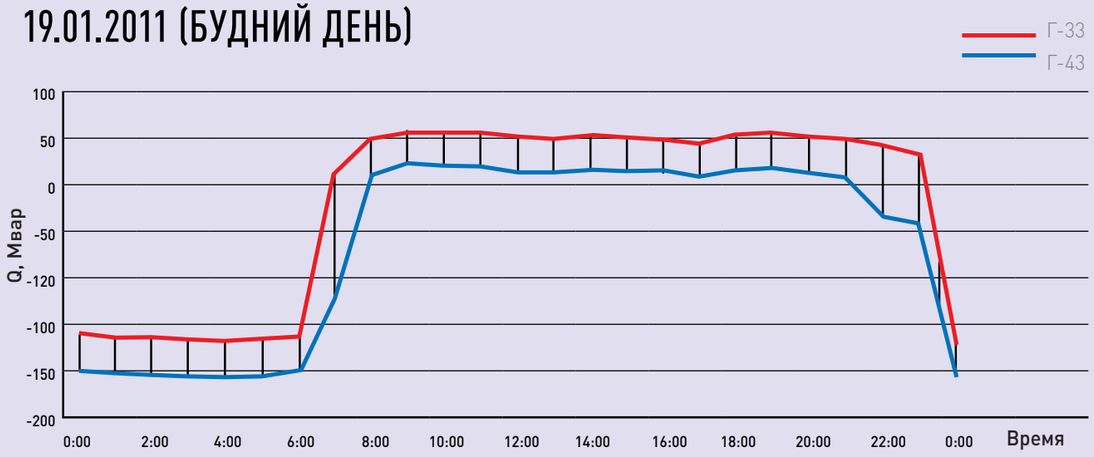
15.01.2011 (ВЫХОДНОЙ ДЕНЬ)



10.07.2011 (ВЫХОДНОЙ ДЕНЬ)



19.01.2011 (БУДНИЙ ДЕНЬ)



22.07.2011 (БУДНИЙ ДЕНЬ)

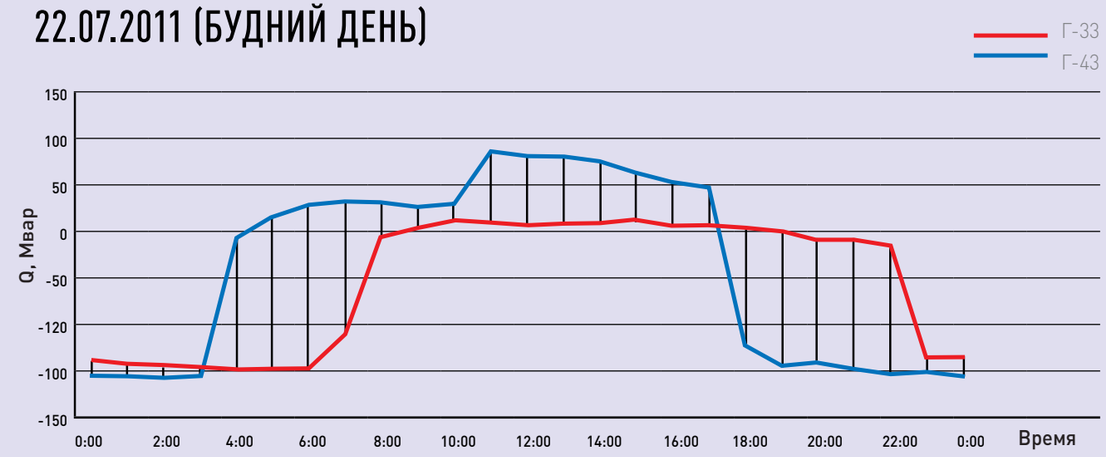


Рис. 3

ИНФОРМАЦИЯ

ОСОБЕННОСТИ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИН

Основным отличием асинхронизированных машин от обычных синхронных машин является наличие двух (трех) обмоток возбуждения. В нормальном режиме ротор может питаться постоянным или переменным током. При питании постоянным током, в отличие от обычной синхронной машины, осуществляется векторное управление возбуждением, что делает возможным устойчивую работу при любом угле нагрузки вплоть до 180°. При питании ротора переменным током поле возбуждения вращается относительно ротора, при этом сохраняется синхронность с полем статора.

существенно большими регулировочными возможностями в области потребления реактивной мощности (кривая 2, рис. 2) по сравнению с синхронными турбогенераторами, у которых режим потребления лимитируется ОМВ (кривая 4, рис. 2).

Технико-экономический эффект от применения асинхронизированных турбогенераторов заключается в следующем:

1. Отказ от дополнительных устройств компенсации реактивной мощности (реакторов) на шинах станции.
2. Улучшение режимов работы по реактивной мощности синхронных турбогенераторов электростанции за счет исключения неблагоприятных для них режимов с потреблением реактивной мощности (или близких к потреблению).
3. Увеличение надежности работы генерирующего оборудования.

Что касается надежности работы асинхронизированного турбогенератора, то при формальном подходе, казалось бы, его надежность должна быть ниже, т. к. увеличивается количество конструктивных элементов, в которых возможен отказ (две обмотки возбуждения, два реверсивных тиристорных преобразователя). Однако если рассматривать живучесть, т. е. способность сохранять работоспособность с ограниченной функциональностью, то здесь у асинхронизированного турбогенератора безусловные преимущества.

Во-первых, при отказах в одном из тиристорных преобразователей есть возможность работы с одной обмоткой возбуждения. В этом случае генератор становится обычным синхронным, т. е. в режимах потребления появляется ОМВ.

Но главное, что генератор при потере возбуждения в одной из обмоток не отключается от сети, а остается в работе. После устранения неисправности по команде оператора генератор снова переводится в режим с возбуждением по двум обмоткам.

Во-вторых, асинхронизированный турбогенератор способен неограниченно долго работать без возбуждения! Работа синхронных генераторов при потере возбуждения ограничивается по времени (не более 30 минут) и величине активной мощности (не более 60% от номинальной), после чего генератор отключается от сети. На практике в большинстве случаев релейная защита настраивается на практически мгновенное отключение генератора от сети. Это связано с тем, что из-за электромагнитной несимметрии ротора синхронного генератора в асинхронном режиме возникают существенные колебания напряжения и тока. У асинхронизированного турбогенератора ротор имеет электромагнитную симметрию, поэтому при работе без возбуждения параметры режима генератора стабильны.

Как видно из рис. 2, в соответствии с асинхронной характеристикой генератор работает в режимах с потреблением реактивной мощности и активной мощностью до 75–80% от номинальной. Еще раз подчеркнем, что такой режим допустим неограниченно.

Указанные преимущества асинхронизированных турбогенераторов были востребованы в системе «Мосэнерго». Такие особенности Московской энергосистемы, как резко пиковый характер нагрузки, реверсивный режим работы, транзитное положение энергосистемы, выпуск мощности электростанций 3-го поколения непосредственно в сеть 500 кВ, очень высокое удельное потребление энергии региона (с учетом тепловой нагрузки), вытеснение воздушных линий кабельными, требуют обеспечения энергосистемы средствами регулирования напряжения в широком диапазоне. В действительности же из-за демонтажа синхронных компенсаторов, недостаточной оснащенности трансформаторов надежными устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) и автоматического регулирования напряжения трансформаторов (АРНТ), запрета на режимы работы генераторов с потреблением реактивной мощности

Для опытной Кислогубской приливной электростанции лабораторией ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» «Асинхронизированные машины» был разработан и введен в эксплуатацию гидрогенератор мощностью 400 кВт

в энергосистеме сейчас практически исчерпаны возможности регулирования напряжения и реактивной мощности.

В 2002 году для улучшения управляемости режимами Московской энергосистемы с точки зрения поддержания требуемых уровней напряжения и регулирования перетоков реактивной мощности, а также для повышения устойчивости и надежности энергосистемы в ОАО «Мосэнерго» было принято решение об установке АСТГ на ряде электростанций.

Первым этапом внедрения таких машин стала установка на ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» первого в России промышленно эксплуатируемого АСТГ. В декабре 2003 года на ТЭЦ-22 был введен в опытно-промышленную эксплуатацию головной образец АСТГ типа ТЗФА-110–2У3, станционный номер блока № 8, производства филиала ОАО «Силовые машины» «Электросила» [2].

За время эксплуатации АСТГ работал как в режимах выдачи, так и потребления реактивной мощности. В режимах потребления генератор работает, как правило, в ночные часы и круглосуточно – в выходные дни. Средний уровень потребляемой реактивной мощности (-30) ÷ (-40) МВА при пониженной активной нагрузке. Были решены сразу две задачи: поддержание требуемого напряжения на шинах станции и предотвращение для параллельно работающего блока № 7 с синхронным турбогенератором опасных для него режимов с потреблением реактивной мощности или близких к ним.

Вторым этапом внедрения АСТГ стал ввод в эксплуатацию еще трех турбогенераторов в 2007–2008 годах. В составе парогазовых установок (ПГУ) общей мощностью блока 450 МВт на ТЭЦ-27 (блоки №№ 3 и 4) и ТЭЦ-21 (блок № 11) установлены турбогенераторы ТЗФАУ-160–2У3 мощностью 160 МВт. В 2007 году введен в эксплуатацию блок № 3 на ТЭЦ-27, в 2008 году – еще два аналогичных блока: блок № 11 на ТЭЦ-21 и блок № 4 на ТЭЦ-27 [3, 4]. Блоки ПГУ-450 являются так называемыми трехвальными энергоблоками. Блоки состоят из двух синхронных генераторов ТЗФГ-160–2У3, установленных на одном валу с газовыми турбинами, и одного асинхронизированного, установленного на одном валу с паровой турбиной. Отработанные газы после газовых турбин подаются в котел-утилизатор, из которого перегретый пар под давлением подается в паровую турбину.

Выбор ТЭЦ-21 и ТЭЦ-27 в качестве площадок для установки АСТГ неслучаен. Наиболее проблемными

ГРАФИК АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЗА ПЕРИОД С 26 СЕНТЯБРЯ ПО 02 ОКТЯБРЯ 2010 Г. БЛОКА №3 КАШИРСКОЙ ГРЭС

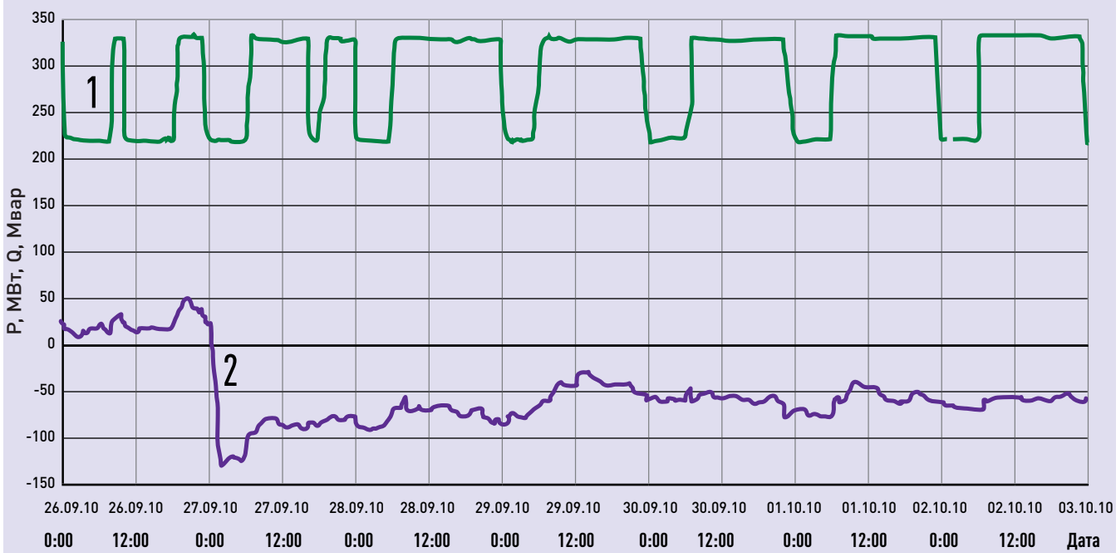


Рис. 4

в плане избытка реактивной мощности в период пониженного энергопотребления (период летнего минимума нагрузки, а также в ночные часы) являются именно север и северо-запад Московского региона – район ТЭЦ-21 и ТЭЦ-27. Причиной избытка реактивной мощности в данном районе сети является большое количество кабельных линий электропередачи 220 кВ.

В таблице 1 приведены средние значения величин реактивной мощности и средние значения числа часов работы при работе в режимах выдачи и потребления реактивной мощности асинхронизированных турбогенераторов ТЗФАУ-160–2У3 на ТЭЦ-27 «Мосэнерго» (станционные № 33 и № 43), а на рис. 3 – суточные графики по реактивной мощности для зимнего и летнего периода.

В декабре 2009 г. на блоке № 3 Каширской ГРЭС введен в эксплуатацию асинхронизированный турбогенератор ТЗФСУ-320–2У3 мощностью 320 МВт. Как видно из графиков нагрузки (рис. 4), данный генератор также востребован в энергосистеме в части регулирования напряжения с потреблением реактивной мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Российскими специалистами разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию уникальные, не имеющие аналогов в мире асинхронизированные турбогенераторы.
2. Опыт эксплуатации показывает, что асинхронизированные турбогенераторы востребованы в энергосистемах и работают в широком диапазоне регулирования напряжения, особенно в режимах глубокого потребления реактивной мощности, недостижимом для традиционных синхронных турбогенераторов.
3. Асинхронизированные турбогенераторы обладают большей живучестью, т.е. способностью оставаться в работе с некоторым ограничением функциональности. При отказах в системе возбуждения и управления есть возможность работы с одной из двух обмоток возбуждения или вообще без возбуждения.
4. Применение асинхронизированных турбогенераторов на электростанциях позволяет не только нормализовать уровень напряжения на шинах станции, но и обеспечить более благоприятные режимы работы по реактивной мощности для параллельно работающих синхронных турбогенераторов за счет исключения для них режимов с потреблением реактивной мощности (или близких к потреблению), что в целом существенно сказывается на увеличении надежности работы генерирующего оборудования.

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЛА ЧАСОВ ПРИ РАБОТЕ В РЕЖИМЕ ВЫДАЧИ И ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Месяц	Ст. №	Знак Q	$Q_{среднее}$, Мвар	Число часов
Январь	33	+	14	161
		-	-128	580
	43	+	28	248
		-	-116	333
Июль	33	+	49	303
		-	-97	348
	43	+	-96	439
		-	36	336

Таблица 1

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Ботвинник. Регулирование возбуждения и статическая устойчивость синхронной машины. – М.-Л.: ГЭИ, 1950.
2. Зинаков В. Е., Чернышев Е. В., Кузин Г. А., Воронов В. К., Лабунец И. А. Опыт промышленной эксплуатации головного образца асинхронизированного турбогенератора ТЗ ФА-110 на ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» // Электрические станции, 2005, № 1. – стр. 2–5.
3. Аршунин С. А., Голов П. В., Антипова Н. А., Лабунец И. А., Сокур П. В. Применение асинхронизированных турбогенераторов на электростанциях ОАО «Мосэнерго» // Электротехника, № 2, 2010. – стр. 14–18.
4. Довганюк И. Я., Марков А. Ю., Сокур П. В., Фёдоров И. В. Результаты испытаний асинхронизированного турбогенератора ТЗ ФАУ-160 на ТЭЦ-21 ОАО «Мосэнерго» // Электротехника, № 2, 2010. – стр. 18–23.

ИНФОРМАЦИЯ

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ

Формируется первичное управляющее воздействие по двум каналам в декартовой двумерной системе координат {x, y}, которая вращается с синхронной частотой. Полученный сигнал преобразуется в новую систему координат {d, q}, привязанную к положению ротора. В результате механический поворот ротора не влияет на величины активной и реактивной мощностей машины. В динамических режимах осуществляются независимые воздействия по поддержанию напряжения статорной цепи генератора и обеспечению статической и динамической устойчивости.