

ПРИМЕНЕНИЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

АВТОР:

П.В. СОКУР, К.Т.Н.,
«НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Работы по асинхронизации синхронной машины были начаты еще в 30-е годы прошлого века. В СССР впервые эта проблема была поставлена известным советским электротехником А.А. Горевым.

Асинхронизированной называют такую синхронную машину, у которой при скольжении ротора и разомкнутом статоре поток, создаваемый током возбуждения, вращается с синхронной скоростью.

Ключевые слова: асинхронизированная машина; реактивная мощность; асинхронизированный турбогенератор; асинхронизированный компенсатор; электромеханическая вставка переменного тока.



Асинхронизированный турбогенератор ТЗФАУ-160-2У3 мощностью 160 МВт на блоке № 11 ТЭЦ-21 «Мосэнерго»

ВВЕДЕНИЕ

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроэнергетики в 1964 г. была образована лаборатория «Асинхронизированные машины», которой было поручено довести теоретические идеи асинхронизированной машины М.М. Ботвинника до практической реализации. В различные годы лабораторию возглавляли М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян, И.А. Лабунец. Весомый вклад в разработку и внедрение таких машин внесли А.П. Лохматов, Т.В. Плотникова, И.Я. Довганюк и др. Результатами работы лаборатории стал ряд асинхронизированных машин: турбо- и гидрогенераторов, компенсаторов реактивной мощности, двигателей, а также агрегата для несинхронной связи энергосистем.

АСИНХРОНИЗИРОВАННАЯ МАШИНА

В 1960 г. вышла в свет книга М.М. Ботвинника «Асинхронизированная синхронная машина» [1]. В этой работе была теоретически обоснована идея создания электрической машины, сочетающей свойства синхронных и асинхронных машин. Устойчивость асинхронизированной синхронной машины лимитируется скольжением, как и у асинхронной машины. При этом, как и у синхронной машины, имеется возбуждение, что позволяет регулировать реактивную мощность (напряжение).

Выход в свет книги М.М. Ботвинника относится ко времени бурного развития энергетики СССР, сооружения мощных электростанций, протяженных линий электропередачи, объединения энергосистем, создания единой энергосистемы. Одной из наиболее сложных задач, которые

необходимо было решать на каждом этапе развития электроэнергетики, было обеспечение устойчивости создаваемых энергосистем и энергообъединений. На радикальное решение именно этой задачи и было нацелено предложение М.М. Ботвинника.

Конструктивно асинхронизированный синхронный генератор (далее будем употреблять устоявшийся в нашей стране термин «асинхронизированный генератор») представляет собой асинхронную машину с фазным ротором. На роторе размещается три (или две) обмотки возбуждения. Питание обмоток возбуждения осуществляется переменным током с частотой скольжения. Это позволяет асинхронизированному генератору работать с несинхронной частотой вращения, оставаясь в синхронизме с сетью.

Если ротор вращается с выше синхронной частотой вращения $\omega_p = 51$ Гц, то при возбуждении переменным током с частотой $\omega_2 = 1$ Гц с направлением вращения в обратную сторону относительно вращения

ротора в статоре будет индуцироваться напряжение частотой $\omega_1 = 50$ Гц (рис. 1).

Для асинхронизированного генератора соблюдается следующее соотношение:

$$\omega_1 = \omega_p \pm \omega_2, \quad (1)$$

где ω_1 — частота напряжения статора;

ω_p — частота вращения ротора;

ω_2 — частота тока возбуждения (частота вращения поля ротора относительно ротора).

Однако если возбуждение будет подаваться от источника заданной частоты, то генератор, по сути, останется синхронным, но с известными ограничениями по устойчивости, накладываемыми угловой характеристикой. Для того чтобы генератор стал асинхронизированным, управление возбуждением должно осуществляться в векторном виде для независимого управления активной и реактивной мощностью [2].

СООТНОШЕНИЯ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ДЛЯ СИНХРОННОГО (А) И АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО (Б) ГЕНЕРАТОРА

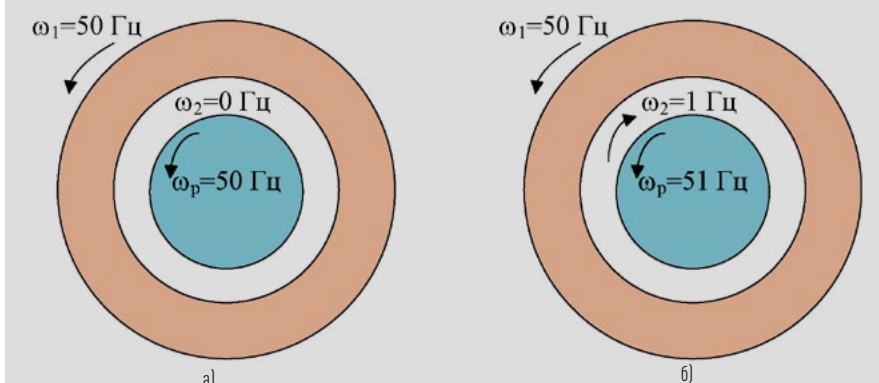
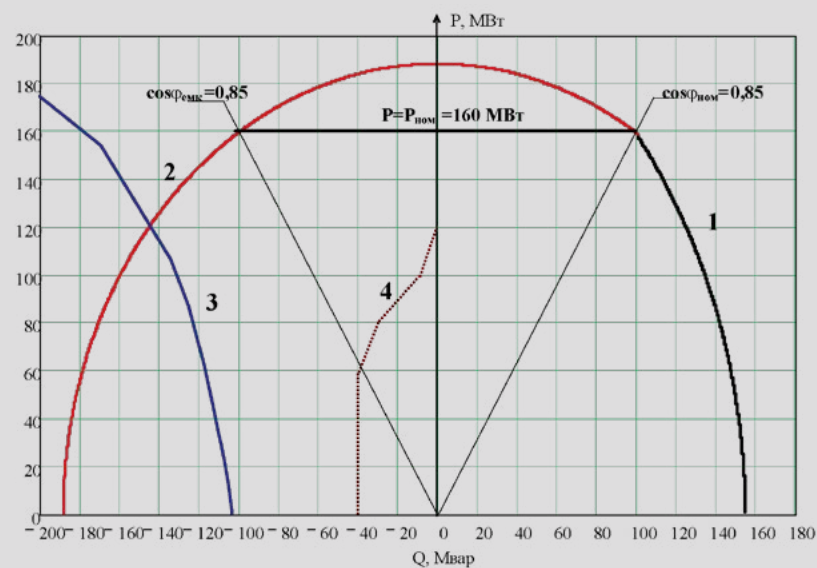


Рис. 1

ДИАГРАММА МОЩНОСТИ АСТГ ТИПА ТЗФАУ-160-2УЗ



Обозначения: 1 — ограничение по номинальному току ротору; 2 — ограничение по номинальному току статора; 3 — асинхронная характеристика; 4 — ограничение минимального возбуждения СТГ типа ТЗФП-160-2УЗ.

Рис. 2

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ ТУРБОГЕНЕРАТОР

Асинхронизированный турбогенератор (АСТГ) является частным случаем асинхронизированной машины. Из-за наличия массивного ротора АСТГ не может длительно работать со значительным скольжением, поэтому в установившихся режимах работы он эксплуатируется с синхронной частотой вращения.

Однако асинхронизированный принцип управления возбуждением позволяет обеспечить статическую устойчивость независимо от угла нагрузки генератора, а также практически равные запасы динамической устойчивости в режимах как выдачи, так и потребления реактивной мощности.

Предпочтительной областью применения АСТГ с учетом их свойств являются электростанции с присоединением блоков к сетям напряжением 220 кВ и выше, а также тепловые электростанции с блоками от 100 МВт и выше, работающие в специфических условиях, где, например, концентрация генерирующей мощности в сетях 110–220 кВ оказывает влияние на уровни напряжения сетей более высоких классов напряжения, либо в случаях, когда выдача мощности этих электростанций осуществляется через сравнительно длинные линии электропередачи с возможными стоками реактивной мощности в генераторы.

У синхронных турбогенераторов (СТГ) в режимах потребления реактивной мощности вводится ограничение минимального возбуждения (ОМВ), которое обусловлено снижением ста-

тической и динамической устойчивости и нагревом торцевых зон в этих режимах. Применение асинхронизированного принципа управления возбуждением у АСТГ позволяет снять ограничения по статической и динамической устойчивостям машины при глубоком потреблении реактивной мощности. Благодаря этому, а также отсутствию ограничений по нагреву торцевых частей статора режим глубокого потребления реактивной мощности для АСТГ ограничен только допустимым током обмотки статора. При выдаче реактивной мощности рабочий диапазон АСТГ определяется допустимым током возбуждения. На рис. 2 приведена диаграмма мощности АСТГ типа ТЗФАУ-160-2УЗ мощностью 160 МВт, на которой показано ОМВ СТГ типа ТЗФП-160-2УЗ аналогичной мощности. Как видно из сопоставления, АСТГ имеет значительное преимущество по регулированию реактивной мощности в режимах потребления реактивной мощности по сравнению с СТГ.

Пределы динамической устойчивости АСТГ при аварийных возмущениях практически не зависят от режима его работы: за счет возможности управления фазой напряжения возбуждения независимо от поворота ротора генератора обеспечиваются практически одинаковые пределы динамической устойчивости как в режимах глубокого потребления, так и в режимах выдачи реактивной мощности.

АСТГ, обладая большим регулировочным диапазоном на прием реактивной мощности, может служить заменой шунтирующего реактора на высоковольтных связях электростанции с энергосистемой и между отдельными частями последней. В этом случае АСТГ, как непрерывно регулируемый источник реактивной мощности, может обеспечивать повышение пропускной способности указанных электрических связей

по условиям статической устойчивости. Одновременно уменьшается необходимость коммутации в режимах, остающихся в работе шунтирующих реакторов и батарей статических конденсаторов.

За период с 2003 по 2010 г. совместно с ПАО «Силовые машины» были разработаны и внедрены в эксплуатацию АСТГ мощностью 110, 160 и 320 МВт.

Для примера на рис. 3 приведены характерные суточные графики работы по реактивной мощности СТГ и АСТГ на ТЭЦ-27 «Мосэнерго» для блоков ПГУ-450 № 3 и № 4 [3]. Из приведенных графиков видно, что использование АСТГ позволяет практически полностью разгрузить СТГ от потребления реактивной мощности, что повышает надежность эксплуатации генерирующего оборудования.

Согласно Приказу от 04.07.2002 № 476 АО «Мосэнерго» и приказу от 19.03.2003 № 488 ОАО ПАО «ЕЭС России» в период до 2009 г. планировалось установить 10 АСТГ мощностью от 110 до 350 МВт. Фактически были установлены один АСТГ мощностью 110 МВт на ТЭЦ-22 «Мосэнерго», три АСТГ мощностью 160 МВт на ТЭЦ-21 и ТЭЦ-27 «Мосэнерго» и один АСТГ мощностью 320 МВт на Каширской ГРЭС.

Дальнейшая реализация плана внедрения АСТГ была приостановлена из-за реформирования ПАО «ЕЭС России» и организации рыночных отношений в электроэнергетике. Если в единой энергосистеме задача регулирования реактивной мощности решалась комплексно, то в рыночных условиях АСТГ оказались экономически невыгодны собственнику электростанции. Расширенный регулировочный диапазон по реактивной мощности у АСТГ не оплачивается, поэтому покупка более эффективного и полезного, но дорогого генератора

в рыночных условиях становится необоснованной.

В ряде зарубежных стран услуга по сверхнормативному диапазону регулирования реактивной мощности генераторами электростанций дополнительно финансируется [4]. АСТГ будут экономически эффективны

при учете системного эффекта по регулированию реактивной мощности, что требует развития рынка системных услуг в России.

Из-за недостатка средств компенсации реактивной мощности к регулированию в режимах потребления реактивной мощности привлекаются

СУТОЧНЫЙ ГРАФИК РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ Г31, Г32, Г33, Г41, Г42, Г43 ПО РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТЭЦ-27 «МОСЭНЕРГО» (Г33, Г43 — АСТГ ТИПА ТЗФАУ-160-2УЗ)

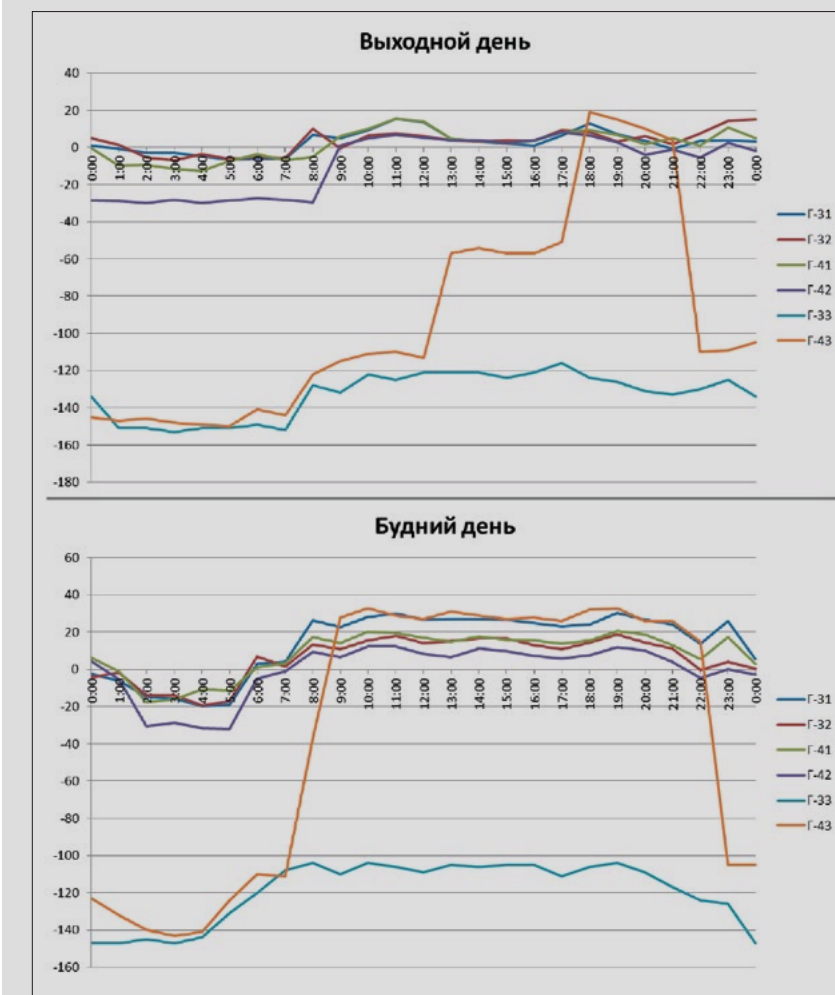
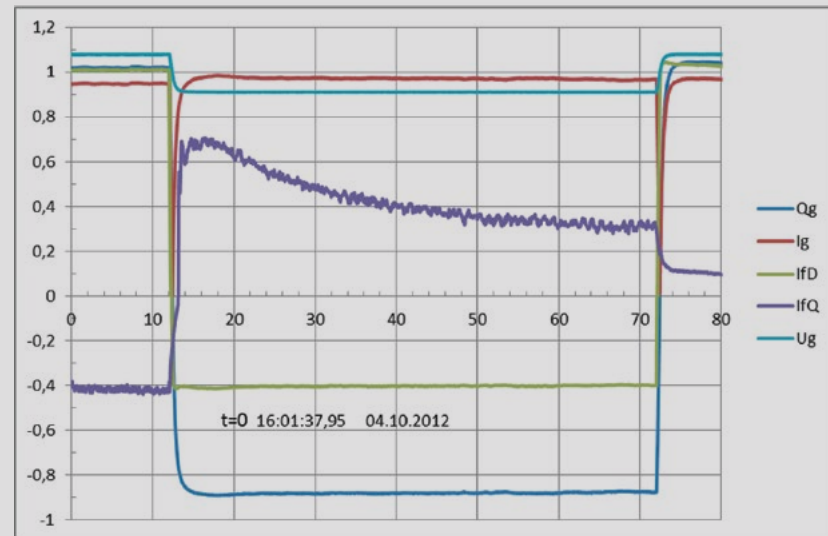


Рис. 3

РЕВЕРС РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КОМПЕНСАТОРА АСК-100-4



Обозначения: Qg — реактивная мощность; Ig — ток статора; IfD — ток возбуждения обмотки d; IfQ — ток возбуждения обмотки q; Ug — напряжение статора.

Рис. 4

СТГ, для которых такие режимы являются нежелательными, а уникальная отечественная разработка — АСТГ, которые созданы специально для работы в режимах потребления реактивной мощности и подтвердили свою эффективность, не востребованы в современных рыночных условиях.

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ КОМПЕНСАТОР

В последнее время в энергосистемах широко применяются статические устройства компенсации на базе силовой электроники. Наряду с несомненными достоинствами (высокое быстродействие, отсутствие вращающихся частей) у них есть и недостатки (генерация

гармоник, зависимость реактивной мощности от напряжения в точке подключения).

Вместе с тем электромашинные компенсаторы реактивной мощности в отличие от статических устройств выдерживают кратковременную двукратную перегрузку, что для статических устройств может быть достигнуто фактически только за счет удвоения установленной мощности. Важна также устойчивость к возможным импульсным перенапряжениям в линиях (например, вследствие грозовой деятельности).

Опыт разработки и внедрения АСТГ позволил в короткие сроки ввести в эксплуатацию новый тип электромашинных компенсаторов реактивной мощности — асинхронизированный компенсатор (АСК).

Наличие двух обмоток возбуждения с системой возбуждения и векторного управления дает новые свойства и преимущества таким компенсаторам по сравнению с традиционными синхронными компенсаторами с одной обмоткой возбуждения:

- расширенный диапазон регулирования реактивной мощности от +100 до -100 Мвар (у традиционных синхронных компенсаторов от +100 до -50 Мвар);
- более высокое быстродействие регулирования реактивной мощности (напряжения) за счет возможности реверса токов в обмотках возбуждения;
- улучшенное демпфирование колебаний режимных параметров при возмущениях в сети;
- повышенную живучесть за счет возможности работы в резервных режимах при отказах в системе возбуждения. При различных отказах в системе возбуждения компенсатор может работать в резервных режимах:
 - с возбуждением только по основной обмотке ($-40 \text{ Мвар} < Q < +100 \text{ Мвар}$),
 - в асинхронном режиме без возбуждения ($Q \approx -40 \text{ Мвар}$).

Два АСК мощностью 100 МВА типа АСК-100-4 установлены в Москве на подстанции (ПС) 500 кВ «Бескудниково». Проведены системные испытания компенсаторов, которые полностью подтвердили соответствие технических характеристик [5]. Режимы работы АСК задаются Московским РДУ.

На рис. 4 показан переходный процесс при реверсе реактивной мощности компенсатора АСК-100-4. При проведении опыта осуществ-

лялось скачкообразное изменение уставки напряжения автоматического регулятора возбуждения (АРВ) с исходного значения $U = 1,08$ о.е. до $U = 0,91$ о.е. на время $\Delta t = 60$ с и затем восстановление исходного значения уставки. При выбранных значениях уставок напряжения компенсатор работает сначала в режиме выдачи реактивной мощности ($Q = 1,02$ о.е.) и затем в режиме глубокого потребления реактивной мощности ($Q = -0,89$ о.е.) при практически номинальном токе статора $i \approx 1$ о.е.

Реверс реактивной мощности компенсатора осуществляется за счет реверса тока IfD в основной обмотке возбуждения. Угловое положение ротора АСК при реверсе реактивной мощности остается практически неизменным. Процесс реверса реактивной мощности динамически устойчив. Новое значение напряжения на шинах генератора устанавливается (не отличается более чем на 5% от уставки) примерно через 0,8 с. Максимальная скорость изменения реактивной мощности компенсатора составляет 300 Мвар/с.

Наиболее востребованным режимом работы АСК на ПС 500 кВ «Бескудниково» является режим глубокого потребления реактивной мощности [6].

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ВСТАВКА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Асинхронизированные машины позволяют не только эффективно управлять реактивной мощностью, но и осуществлять заданное регулирование активной мощности в электроэнергетических системах.

Электромеханическая вставка переменного тока (ВПТ) на базе асинхро-

ПРОЕКТ АГРЕГАТА АСЭМПЧ МОЩНОСТЬЮ 200 МВт

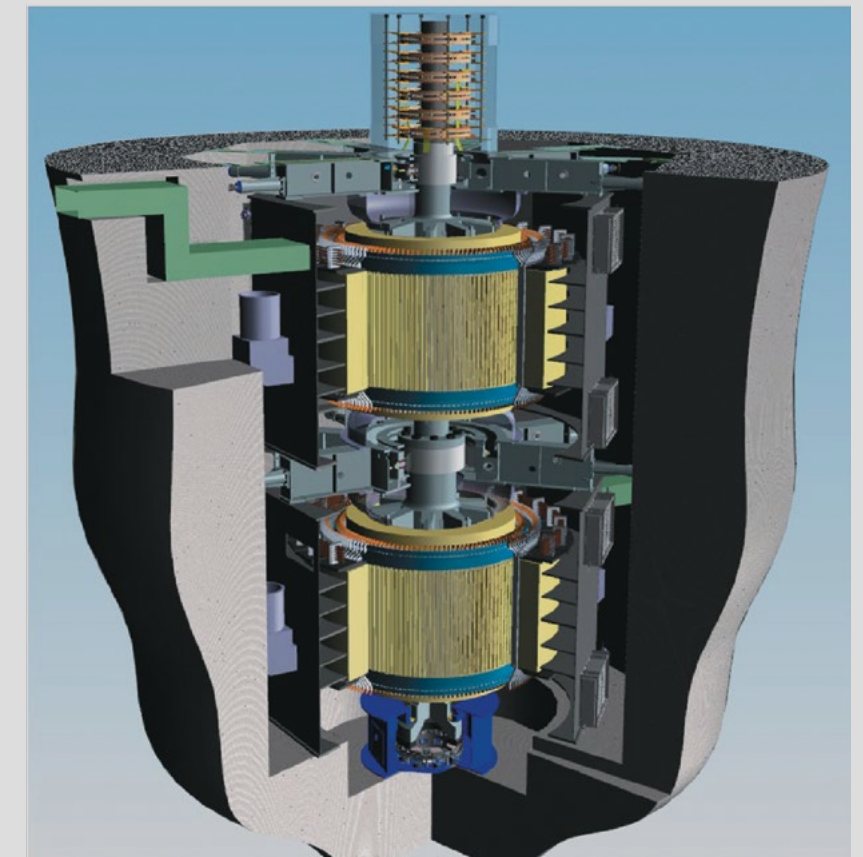


Рис. 5

низированных машин — асинхронизированный электромеханический преобразователь частоты (АСЭМПЧ) — представляет собой агрегат, на общем валу которого установлены две асинхронизированные машины. АСЭМПЧ может использоваться в качестве гибкой связи между двумя системами, имеющими различные номинальные частоты, или между двумя частями системы с одинаковой частотой.

Такой агрегат обеспечивает управляемость связи в широких пределах до ее реверса. Сглаживаются также броски и колебания мощности,

передаваемой из одной сети (или одной части сети) в другую. Кроме того, АСЭМПЧ исключает передачу токов обратной и нулевой последовательностей, высших гармоник тока и напряжения из одной сети в другую, т.е. осуществляется гальваническая развязка объединяемых сетей. Фактически АСЭМПЧ является полным аналогом современной ВПТ на полностью управляемых силовых ключах (IGBT-транзисторах).

Гальваническая развязка объединяемых сетей посредством АСЭМПЧ приводит к эффекту ограничения токов короткого замыкания (ТКЗ), что необходимо для сетей мегаполисов,

для которых характерны высокие значения ТКЗ [7].

В настоящее время АО «ОЭК» ведет проектные работы по установке агрегата АСЭМПЧ мощностью 200 МВт на ПС «Саларьево».

АСЭМПЧ состоит из двух асинхронизированных машин, валы которых жестко соединены (рис. 5). Первая машина включается в один из объединяемых участков сети, а вторая — в другой. Если первая машина работает в генераторном режиме, то вторая — в двигательном. При изменении потока мощности в силу обратимости электрических машин первая машина перейдет в двигательный режим, а вторая — в генераторный.

Применение АСЭМПЧ на ПС «Саларьево» позволяет получить следующие технические эффекты:

- 1) происходит эффективное ограничение ТКЗ. С точки зрения ограничения ТКЗ, устройство АСЭМПЧ является альтернативой секционирования сети, но с сохранением перетока мощности;
- 2) АСЭМПЧ, являющееся устройством FACTS второго поколения [8], позволяет поддерживать заданный переток активной мощности в обоих направлениях;
- 3) происходит независимое регулирование реактивной мощности (напряжения) с двух сторон от включения устройства в сеть;
- 4) обеспечивается высокое качество генерируемого напряжения, что исключает необходимость установки фильтрокомпенсирующих устройств;
- 5) осуществляются эффективное демпфирование электромеханических колебаний в энергосистеме и локализация кратковре-

менных возмущений в пределах одной энергосистемы;

- 6) за счет активного управления режимом обеспечивается исключение режимов перегрузки в послеаварийных режимах на параллельных линиях электропередачи в условиях разветвленной сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенный прогресс, достигнутый в последние годы в области элементной базы силовой электроники, появление полностью управляемых приборов (IGBT, IGCT и др.) создают впечатление, что другой альтернативы создания устройств FACTS нет. Однако, не отрицая настоящего и большого будущего статических устройств FACTS на основе силовой электроники, можно сказать, что электромашинные устройства еще не проявили все свои преимущества. Более того, в определенных случаях электромашинные устройства FACTS по своим показателям могут быть более предпочтительны, нежели статические. Интересной областью изучения является анализ возможностей совместного использования статических и электромашинных устройств FACTS, основу которых составляют асинхронизированные машины, созданные впервые в нашей стране.

На последних сессиях СИГРЭ все активнее идет обсуждение целесообразности установки в сетях синхронных компенсаторов реактивной мощности с целью увеличения надежности работы в условиях растущей доли источников возобновляемой энергии и линий (вставок) постоянного тока [9, 10]. В нашей стране разработаны АСК, которые обладают лучшими техническими характеристиками по сравнению с традиционными синхронными компенсаторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина. М.: Л.: ГТЭ, 1960.
2. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоиздат, 1984.
3. Operation experience of asynchronous turbo-generators in the Moscow power system / Yu.G. Shakarian, P.V. Sokur, Yu.K. Petrenya, N.D. Pinchuk, M.B. Roytgartz, S.N. Lenyov, A.D. Gritsenko, F.A. Polyakov, D.V. Kuznetsov // CIGRE Session 47, A1-304, 26–31 August 2018, Paris.
4. Воротицкий В.Э., Жабин К.В., Колибаба В.И. Сравнительный анализ управления реактивной мощностью на электроэнергетических рынках зарубежных стран и России // Электрические станции. 2020. № 5 (1066). С. 8–19.
5. Володарский Л.Г., Довганюк И.Я., Мнев Р.Д., Плотникова Т.В., Сокур П.В., Тузов П.Ю. Результаты испытаний асинхронизированных компенсаторов типа АСК-100-4УХЛ4 на ПС 500 кВ Бескудниково // Электрические станции. 2013. № 7 (984). С. 43–52.
6. Шакарян Ю.Г., Сокур П.В., Плотникова Т.В., Довганюк И.Я., Мнев Р.Д., Пинчук Н.Д., Антонюк О.В., Ройтгарц М.Б., Жуков Д.В., Коркунов А.А. Опыт эксплуатации асинхронизированного компенсатора мощностью 100 МВА // Новое в российской электроэнергетике. 2013. № 12. С. 28–36.
7. Дементьев Ю.А., Сокур П.В., Шакарян Ю.Г., Майоров А.В., Шабаш А.М., Ярош Д.Н., Пинчук Н.Д., Третьяков В.С. Электромеханическая вставка переменного тока для ограничения токов короткого замыкания // Энергия единой сети. 2017. № 4 (33). С. 18–27.
8. Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л., Сокур П.В., Новиков А.Н. Классификация и характеристика устройств управляемых систем электропередачи переменного тока // Электрические станции. 2018. № 9 (1046). С. 30–36.
9. The benefits of implementing Synchronous Compensators in Grids with high penetration of renewables / H. Biellmann // CIGRE Session 48, A1-102, 23–28 August 2020, Paris.
10. The Design and Application of New Fast-response Large-scaled Rotary Condensers in UHV Power Grid / Y. Jin, J. Zhang, F. He, J. He // CIGRE Session 48, A1-310, 23–28 August 2020, Paris.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

АЛЕКСАНДР ХРЕННИКОВ, ВАЛЕРИЙ ТОЧИЛКИН



https://www.directmedia.ru/book_614678_ekspluatatsiya_releynoy_zaschity_i_avtomatiki/

Изложены вопросы организации и производства работ при выполнении работ в действующих устройствах РЗА, в цепях вторичной коммутации на основе действующих документов Министерства энергетики РФ, стандартов и распорядительных документов ПАО «Россети». Даны требования к персоналу, занимающемуся эксплуатацией устройств РЗА, большое внимание уделено проверке устройств первичным током и напряжением, снятию векторных диаграмм, объемам испытаний при различных видах технического обслуживания устройств РЗА (УРЗА), технологическим нарушениям, связанным с отказом или неправильной работой УРЗА.

Учебное пособие предназначено для руководителей и специалистов служб предприятий энергетических систем, электрических и распределительных сетей и электрических станций, филиалов ПАО «Россети», ПАО «ФСК ЕЭС», слушателей курсов повышения квалификации, студентов магистратуры электроэнергетических специальностей, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и магистрантов направления «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Релейная защита и автоматизация энергосистем» при изучении профессиональной дисциплины «Наладка и эксплуатация релейной защиты и автоматики» в соответствии с утвержденной рабочей программой дисциплины.

