



КУЗЬМИН В.В.

УДК 021.313.322

КУЗЬМИН В.В., докт. техн. наук,
ШПАТЕНКО Т.В., канд. техн. наук
ООО "Элта-Инжиниринг" г. Харьков

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ-ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОПЫТА РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ-ДВИГАТЕЛЕЙ



ШПАТЕНКО Т.В.

В статье рассмотрены перспективы создания асинхронизированных гидрогенераторов-двигателей на базе более, чем 40-летнего опыта разработки, изготовления и эксплуатации синхронных гидрогенераторов-двигателей для гидроаккумулирующих электростанций.

Выполненный в послевоенный период анализ вариантов создания мощных аккумуляторов электроэнергии, к числу которых относились

- сверхпроводниковые индуктивные накопители,

- пневмоаккумулирующие установки,

- гидроаккумулирующие электростанции,

показал безусловное преимущество последнего варианта как по экономическим, так и экологическим показателям.

Вопрос о необходимости разработки и изготовления синхронных генераторов-двигателей (СГД) для ГАЭС в СССР был поставлен в конце 60-х годов.

Впервые в СССР СГД мощностью 40 МВт для Киевской ГАЭС были разработаны и изготовлены на Харьковском заводе "Электротяжмаш". Первый блок этой ГАЭС был введен в эксплуатацию в 1970 г.

К настоящему времени "Электротяжмаш" обладает наиболее весомым референц-листом в сфере поставки СГД для ГАЭС в Украине, Литве и Польше. Успешно эксплуатируются 11 СГД мощностью свыше 200 МВт, в том числе головной образец СГД мощностью 421 МВт для Днестровской ГАЭС (см. табл. 1).

В 70-х годах мы разрабатывали СГД для ряда отечественных и зарубежных ГАЭС (табл. 2). Хотя эти разработки и не удалось воплотить в металле, они оказались полезными для дальнейшего прогресса в рассматриваемом направлении.

Следует отметить, что на первом этапе освоения производства СГД ведущие заводы СССР ("Электросила", "Уралэлектротяжмаш", "Сибэлектротяжмаш") не принимали участия в этой работе, скептически оценивая ее перспективность.

В отличие от традиционных исполнений синхронных гидрогенераторов (СГ) специфика конструирования СГД заключалась в необходимости решения ряда новых технических задач, в том числе (в порядке понижения сложности):

1. Обеспечения тяжелых условий прямого пуска от сети СГД в двигательном режиме,

2. Принятия мер по обеспечению заданного срока службы СГД в условиях повышенного числа пусков-остановов в сравнении с СГ.

3. Создание конструкции, способной работать с переменным направлением вращения ротора.

Наиболее сложной представлялась первая проблема. Так для обеспечения этого условия в СГД для Киевской ГАЭС была спроектирована специальная мощная пусковая обмотка, расположенная в полюсных наконечниках, для увеличения рассеяния при пуске, что также создавало максимальный пусковой момент, было рассчитано оптимальное заглубление зубцовой зоны статора.

Аналогичные решения плюс применение кованных сердечников полюсов ротора были использованы в СГД Круонисской и Загорской ГАЭС.

Параллельно в мировой практике разрабатывались способы более "мягких" (для СГД) и "щадящих" (для энергосистемы) способов пуска в на-сосном режиме.

Вначале использовался специальный пусковой двигатель. Такая система была реализована на нашем СГД мощностью 210 МВт для ГАЭС "Жарновец" (Польша), где пусковой асинхронный двигатель и насос-турбина были поставлены чехословацкими заводами ("Шкода-Пльзень" и "ЧКД-Бланско").

Затем на базе прогресса, достигнутого в силовой полупроводниковой технике повсеместно стали применяться устройства частотного пуска двигателя СГД.

Таким образом, первая проблема в настоящее время снята с повестки дня.

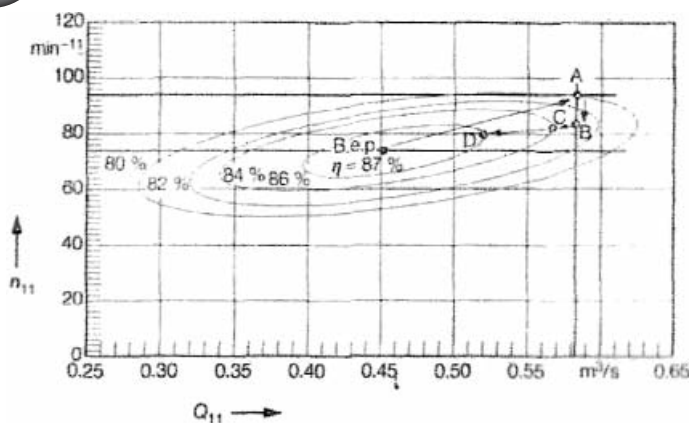


Рис. 1. Диаграмма "холма" представляет топографические линии эффективности для управления насос-турбиной в режиме турбины. Перемещение точки управления к А (расход и частота вращения — неизменны, напор — 60 % первоначальной величины) вызывает падение КПД от 87 до 80 %. Повышение КПД до 83 % (В) возможно путем понижения скорости до 88 %, с последующим улучшением (достижение С, D) путем снижения расхода. n_{11} — частота вращения, Q_{11} — расход, В.е.р. — точка наибольшего КПД, η — КПД.

В части повышения надежности СГД в маневренных режимах нами был введен ряд конструктивных усовершенствований, наиболее существенными из которых являются:

- шихтовка сердечника статора в кольцо с его предварительной растяжкой;
- новая технология горячей перекалиновки обода ротора с восстановлением его формы при капитальном ремонте.

Реверсивность направления вращения СГД была обеспечена, в основном, за счет совершенствования конструкции подпятника с использованием ряда собственных изобретений.

Эффективность и надежность работы СГД нашего производства подтверждена положительными отзывами руководства ГАЭС "Жарновец" (с 1981 г.) и ГАЭС "Круонио" (с 1985 г.).

Уже в начале освоения СГД на ГАЭС в мировой практике сформировалось понимание того, что СГД не лучший вариант привода насос-турбины. Назрел переход к использованию более совершенного привода — на базе, так называемых, асинхронизированных электрических машин (машин "двойного питания"), позволяющих эксплуатировать агрегаты ГАЭС в более гибких и широких регулируемых диапазонах благодаря векторному управлению возбуждением СТД, включая и допустимость их работы с несинхронной частотой вращения.

Теоретические и практические основы такого решения были заложены в СССР в 50–60 годах прошлого столетия [1, 2]. Так, в России в 1963 г. на Иовской ГЭС были внедрены 2 асинхронизиро-

ванных гидрогенератора мощностью по 40 МВт, допускавшие регулирование частоты вращения в диапазоне $\pm 1\%$, а в 1968 г. на Кислогубской приливной электростанции — АСТД мощностью 400 кВт с диапазоном регулирования частоты вращения $\pm 30\%$.

Работы по созданию АСГД большой мощности планировалось реализовать на Пана-Ярвинской ГАЭС. Но Чернобыльская авария в 1986 г. перечеркнула не только планы форсированного строительства АЭС, но и заморозила сооружение связанных с ними ГАЭС (призванных держать АЭС в базовом режиме).

Вследствие изложенного СССР потерял лидерство в освоении этого важного направления в энергомашиностроении.

Первые публикации о практических результатах, достигнутых в области разработки и внедрения АСГД, принадлежат японской фирме Toshiba Corp. [3] успешно внедрившей АСГД мощностью 85 МВА с частотой вращения 130 — 156 об/мин.

В дальнейшем АСГД получили широкое распространение на ГАЭС Японии, а затем и в Европе.

АСГД представляет собой машину "двойного питания", у которой энергия подводится (отводится) не только к трехфазной обмотке статора из сети, но и к такого же типа обмотке ротора, соединенной с сетью через преобразователь частоты (циклоконвертор).

Это решение позволяет гидроагрегату работать в любом режиме с частотой, которая на $+10\%$ отличается от синхронной.

На базе существующей конструкции статора СГД с номинальной мощностью P_n в случае замены явнополюсного ротора на трехфазный реализуется возможность повышения мощности до $1,1 P_n$, т. к. в любом режиме работы 10% мощности может быть добавлена за счет ее передачи в обмотку ротора через циклоконвертор.

По данным японских и европейских источников основными преимуществами АСГД являются:

- повышение КПД агрегата в турбинном режиме на 3–4 % и даже на более значительную величину за счет перехода на такую скорость вращения, при которой достигается максимум КПД (см. Рис. 1, [4]);
- продление срока службы и межремонтного периода по насос-турбине за счет маневра по ско-



рости вращения в насосном режиме с целью выхода из зон кавитации и повышенной вибрации;

- расширение диапазона допустимых нагрузок АСГД по реактивной мощности, особенно в режиме синхронного компенсатора, когда машина способна потребить до 240 МВАр (не более 60 МВАр для обычного СГД) (Рис. 2);

- повышение надежности агрегата за счет обеспечения возможности длительной работы АСГД в чисто асинхронном режиме (при отказе циклоконвертора). При соблюдении ограничений по току статора АСГД в чисто асинхронном режиме может длительно нести нагрузку 170 МВт при потреблении из сети реактивной мощности около 200 МВАр, а в режиме СК – 120 МВАр;

- новые возможности по регулированию частоты в энергосистеме, существенно повышающие ее устойчивость и живучесть. По данным японских фирм АСГД обеспечивает отдачу в сеть "минутной" пиковой мощности со скоростью импульсного набора нагрузки порядка 150 МВт/с за счет преобразования накопленной кинетической энергии ротора в процессе незначительного снижения скорости агрегата;

- возможность применения электрического

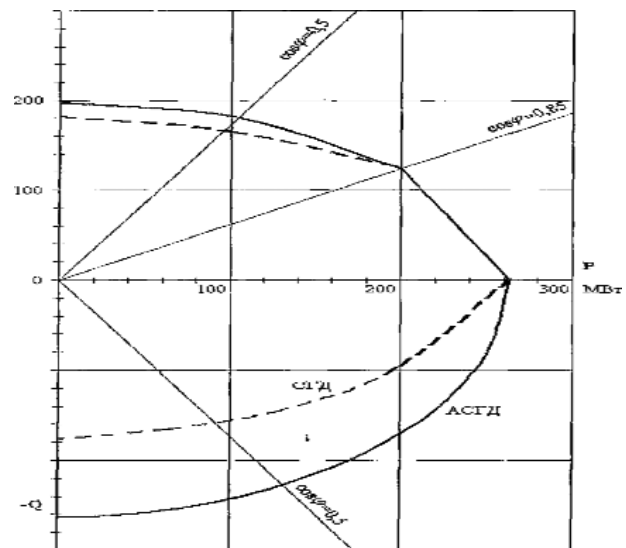


Рис. 2. Диаграмма допустимой нагрузки СГД и АСГД

торможения агрегата с выдачей в сеть дополнительной энергии за счет преобразования запаса механической энергии в электрическую (процесс "рекуперации") через циклоконвертор.

Проработка создания АСГД на базе серийных СГД типа ВТД 1025/245-40 (Загорская и Круонисская ГАЭС) показали, что исполнение собственно АСГД отличается от СГД только конструкцией активной зоны ротора и щеточно-контактного аппарата.

Таблица 1. Гидрогенераторы - двигатели производства ГП завод "Электротряжмаш"

Тип машины	Наименование ГАЭС	Количество машин на ГАЭС	Номинальная мощность, МВт	Напряжение, кВ	Номинальная частота вращения, об/мин	Исполнение	Год поставки
СВО 733/130-36	Киевская, Украина	6	40	10,5	166,7	подвесное	1970-1971
СВО 1170/190-36	Жарновец, Польша	4	210	15,75	166,7	зонтичное	1978-1979
ВГДС 1025/245-40	Круонисская, Литва	4	220	15,75	150	зонтичное	1985-1986
СВО 1190/210-44	Ташлыкская, Украина	6	211	15,75	136,4	зонтичное	2005(№1), 2006(№2)
СВО 1255/255-40	Днестровская, Украина	7	421	15,75	150	зонтичное	2008(№1)

Таблица 2. Проекты гидрогенераторов-двигателей ГП завод "Электротряжмаш"

Наименование ГАЭС (ПЭС)	Страна	Номинальная мощность, МВА	Напряжение, кВ	Частота вращения, об/мин
Млоты	Польша	282	15,75	300
Голдисталь	Германия	310	15,75	300
Предиколосек	Венгрия	305	20	375
Кольская ПЭС	Россия	21	6,3	40/41,7
Тугурская ПЭС	Россия	17	6,3	40/41,7



Все прочие узлы имеют ту же конструкцию (например, статор и ванна масляная), либо подвергаются незначительной переделке (в частности, несколько другую конструкцию имеют воздушоразделяющие щиты и тормозной трубопровод).

Ротор безвального исполнения состоит из литой втулки, спиц, шихтованого сердечника с пазами и уложенной в пазы трехфазной обмотки.

Обод шихтуется из штампованных сегментов из электротехнической стали и закрепляется на спицах встречными клиньями. По высоте обод подразделен на пакеты, между которыми установлены вентиляционные распорки.

При оптимальных размерах элементов обода величина махового момента ротора $GD_2 = 22\ 000\ \text{тм}^2$. При необходимости маховый момент может быть увеличен до величины $GD_2 = 32\ 000\ \text{тм}^2$ (из требований к синхронному гидрогенератору-двигателю) путем искусственного утяжеления остова ротора, что приведет к незначительному удорожанию машины.

Обмотка ротора — трехфазная петлевая катушечная двухслойная, с четырьмя параллельными ветвями на фазу. Корпусная изоляция класса нагревостойкости "F" по ГОСТ 8865-93, терморезистивная типа "Изопролент".

Лобовые части обмотки ротора жестко крепятся к бандажным кольцам.

На лапах остова ротора колодками крепятся кольцевые соединительные шины обмотки. От шин к контактным кольцам выведены три главных и три нейтральных вывода. К верхнему фланцу втулки ротора крепится вал-надставка, с насаженной на него втулкой подшипника. К нижнему фланцу втулки ротора крепится фланец вала насос-турбины. На ободе ротора в нижней части крепится тормозной диск.

Для создания ротором вращающегося с частотой скольжения магнитного поля на нем должно быть установлено шесть контактных колец (три — для главных выводов обмотки ротора, три — для нулевых).

В связи со сравнительно большими величинами тока и напряжения ротора необходима дополнительная вентиляция узла контактных колец. Система вентиляции — открытая. Воздух из машинного зала через входной фильтр в верхней части колпака поступает к контактным кольцам и

траверсе щеткодержателей, и далее при помощи трех (или более) вытяжных вентиляторов, расположенных на лапах верхней крестовины, проходит через фильтры (для отбора угольной пыли) и выбрасывается обратно в машинный зал станции.

Колпак — герметичный, установлен на ванне верхнего направляющего подшипника.

Все присоединительные размеры АСГД по строительной части унифицированы с СГД.

Экономическая эффективность внедрения АСГД сводится к следующему:

- удорожание собственно АСГД не превысит 20 % от цены СГД, т. е. составит порядка \$ 2 млн.;

- дополнительная закупка циклоконвертора (который выполняет заодно и функции пускового устройства) мощностью 50 МВА обойдется примерно в \$ 4 млн.

- цена новой системы совмещенного управления АСГД и насос-турбины не превысит \$1 млн.

Итого дополнительные затраты на одну машину АСГД не превысят \$7 млн., что при расчетной цене капложений в строительство 1 блока ГАЭС (по данным Укрэнергопроекта — порядка \$1000/кВт) порядка \$ 250 млн. составят лишь 3 %.

Если бы наши проектанты ГАЭС и энергетики выполняли корректные расчеты экономического эффекта от перечисленных выше преимуществ, то несомненно можно было показать, что дополнительные капложения окупятся за 1—2 года (поэтому за рубежом резко нарастает количество блоков ГАЭС, оснащённых АСГД).

Актуальность решения проблемы перехода на комплектацию вновь вводимых блоков ГАЭС новыми типами АСГД непрерывно возрастает. В частности, заинтересованность в реализации такого решения высказывают Россия — при вводе новых блоков ГАЭС, мощность которых планируется увеличить на 10—11 ГВт, Украина — для строительства новой Каневской ГАЭС, а также для комплектации второй очереди достройки Ташлыкской и Днестровской ГАЭС, Литва — для достройки второй очереди Круонисской ГАЭС, Польша — для реконструкции нескольких СГД на ГАЭС "Жарновец".

Нельзя не учитывать и все возрастающий интерес к использованию гидроагрегатов с переменной частотой вращения (АСГ) на обычных гидростанциях [5].



Наиболее предпочтительными объектами для внедрения АСГД в настоящее время являются Загорская и Круонисская ГАЭС, где в эксплуатации находятся 10 однотипных гидроагрегатов, а в перспективе намечается достройка еще восьми.

С учетом отмеченной выше высокой степени унификации АСГД и СГД возможны следующие варианты решения проблемы.

Первый, наиболее быстрый и менее затратный – модернизация любого из действующих блоков путем поставки нового ротора и комплектующего электротехнического оборудования.

Для последующих блоков возможна заводская модернизация роторов СГД с переделкой их в АСГД с использованием вала, спиц и, возможно, даже доработкой сегментов старого обода. Полюса СГД демонтируются и сдаются на склад запасных частей.

Второй – более долгосрочный – использование АСГД на ЗаГАЭС-2 и (или) при достройке второй очереди Круонисской ГАЭС.

В связи с отмеченной выше заинтересованностью энергетических компаний и энергомашиностроительных заводов стран СНГ в решении рассматриваемой проблемы на НТС ОЕС РФ, которое состоялось в 2007 г. в С.-Петербурге, мы предложили рассмотреть возможные варианты кооперации, в первую очередь в создании комплексов АСГД мощностью 210 – 250 МВт.

К сожалению, несмотря на то, что такое предложение нашло положительную оценку и отражено в решении НТС, процесс его реализации с места не сдвинулся.

В принципе, эта проблема может быть решена и на базе собственного научно-технического потенциала Украины. Принимая во внимание большое значение решения этой проблемы как для отечественной энергетики, так и промышленности, необходимо ее включить в перечень важнейших НИОКР в процессе проводимой сейчас доработки Стратегии развития энергетики Украины на период до 2030 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемые машины переменного тока. М.: "Наука", 1969.
2. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат. 1984.
3. Furuya S., Fujiki S. et al, Development and achieved commercial operation experience of the world's first commissioned converter-fed variable-speed generator-motor for a pumped storage power plant. CIGRE - 1992 Session, report 11-104, Paris. 1992.
4. Мерано Х., Лонес Л. Повышение КПД и гибкости управления ГАЭС путем применения генераторов с переменной частотой вращения производства АВВ., "Обзор АВВ", – 1996.
5. Федоренко Г.М., Кузьмин В.В. и др. Повышение надежности и эффективности гидрогенераторов ГЭС и ГАЭС при изменяющейся частоте вращения. //Гидроэнергетика Украины. – 2005. – № 2. – С. 41–45.

© Кузьмин В.В., Шпатенко Т.В., 2012

