

* * *

Применение систем резервного электропитания на основе маховичных агрегатов переменного тока и газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов для стабилизации режимов энергосистем

ГОНЧАРЕНКО Р.Б., КИСЕЛЕВ А.А., ПОПОВ В.Е., РУТБЕРГ Ф.Г.

В последние десятилетия участились крупные системные аварии. Предотвращение таких аварий требует наличия резервных источников мощности, а также стабилизации напряжения и частоты в энергосистемах. Удачное решение многих проблем, возникающих при этом, обеспечивается при использовании газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов совместно с маховичными генераторами переменного тока и полупроводниковыми преобразователями частоты. Как известно, в энергосистемах стабилизация напряжения обеспечивается за счет регулирования значения реактивной мощности генераторов, электромашинных и статических компенсаторов реактивной мощности и путем подключения и отключения реактивных нагрузок (реакторов). Стабилизация частоты энергосистемы обеспечивается за счет регулирования активной мощности электростанций. В настоящее время регулирование реактивной мощности в энергосистемах осуществляется со скоростью до 20–50% ее номинального значения в секунду и даже быстрее (последнее для статических компенсаторов). Такая скорость регулирования напряжения является в большинстве случаев достаточной для обеспечения качественной стабилизации напряжения в энергосистемах. Рассмотрены возможности применения газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов совместно с маховичными генераторами переменного тока и полупроводниковыми преобразователями частоты в качестве резервных источников мощности и для стабилизации режимов в энергосистемах. Показано, что целесообразно выполнять такие источники резервного электропитания на мощность 10–20 МВт для установки на местных подстанциях с напряжением 10 кВ и на мощность 100–200 МВт для установки на крупных подстанциях с напряжением 100–500 кВ.

Ключевые слова: энергосистемы, устойчивость, накопитель энергии, резервный источник мощности, плазменная газификация отходов

В последние десятилетия участились крупные системные аварии, такие как аварии в энергосистемах Нью-Йорка (1965, 1997, 2003 гг.), Италии (2003 г.), Москвы (2005 г.) и многие другие. Предотвращение таких аварий требует наличия резервных источников мощности, а также стабилизации напряжения и частоты в энергосистемах. Удачное решение многих проблем, возникающих при этом, обеспечивается при использовании газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов совместно с маховичными генераторами переменного тока и полупроводниковыми преобразователями частоты [1].

Как известно, в энергосистемах стабилизация напряжения обеспечивается за счет регулирования значения реактивной мощности генераторов, электромашинных и статических компенсаторов реактивной мощности и путем подключения и отключения реактивных нагрузок (реакторов). Стабилизация частоты энергосистемы обеспечивается за счет регулирования активной мощности электростанций. В настоящее время регулирование реактивной мощности в энергосистемах осуществляется со скоростью до 20–50% номинального ее значения в секунду и даже быстрее (последнее для статических компенсаторов). Такая скорость регу-

лирования напряжения является в большинстве случаев достаточной для обеспечения качественной стабилизации напряжения в энергосистемах.

Регулирование активной мощности электростанций в энергосистемах возможно только с существенно меньшей скоростью. Так, регулирование активной мощности тепловых электростанций обычно проводится со скоростью не более 15% значения номинальной мощности электростанции в минуту. Для АЭС возможно регулировать активную мощность примерно на 5% ее номинального значения в минуту. Для гидроэлектростанций допустимо изменение активной мощности до 5–10% номинального ее значения в секунду. Примерно такими же являются допустимые скорости изменения активной мощности для дизельных и газотурбинных электростанций [2]. В настоящее время более быстрые колебания активной мощности в энергосистемах могут быть покрыты только за счет энергии маховых масс вращающихся агрегатов энергосистемы, при этом допустимый уровень отбора этой энергии ограничен возможным снижением качества электроэнергии в системе. По ГОСТ Р 54149–2010 отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Даже при максимально допустимом снижении частоты на 0,4 Гц энергосистемы могут кратковременно за счет энергии маховых масс агрегатов генерировать сравнительно небольшое количество энергии. Так от ОЭС Центр при снижении частоты на 0,4 Гц можно дополнительно получить 2610 МДж. При этом дополнительная мощность, которую можно получить от энергосистемы Центра в течение 20 с, будет равна всего лишь 130,5 МВт [3].

Быстрые колебания активной мощности в энергосистемах возможны, прежде всего, при аварийных отключениях линий электропередачи и генерирующих агрегатов. Быстрые колебания активной мощности возможны и в местах присоединения различного рода энергоемких, например металлургических, производств. Возможность быстрого колебания активной мощности в энергосистеме заставляет иметь в ней определенный резерв по активной мощности, что приводит к недогрузке генераторов и снижению КПД электростанций. Недогрузка генерирующего агрегата электростанции на 50% приводит к увеличению удельного расхода топлива примерно на 10% [4].

Из требований автоматического ограничения снижения частоты (АОСЧ) [5] следует, что в изолированно работающей энергосистеме мощность

источника резервного электропитания (ИРЭ) должна быть достаточной для компенсации отключения наиболее мощной электростанции и для части ЭЭС мощность ИРЭ должна быть достаточной для компенсации аварийного отключения питающих связей и/или генерирующей мощности. Расчеты, проведенные под руководством ИЭЭ РАН (до 1992 г. – филиал ВНИИЭлектромаш), показали, что целесообразно устанавливать во многих энергосистемах ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «Россети» источники резервного электропитания на основе использования маховичных генераторов и газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов мощностью 10–20 МВт для установки на местных подстанциях с напряжением 10 кВ и 100–200 МВт для установки на крупных подстанциях с напряжением 100–500 кВ. Энергоемкость маховика источника резервного электропитания должна быть достаточной для покрытия дефицита активной мощности на время пуска привода синхронного генератора газоаккумулирующей установки.

Резервные источники питания. Работа резервного или аварийного источника связана с необходимостью иметь запас энергии, который может храниться сколь угодно долго и может быть задействован в сжатые сроки. Электроэнергия в том виде, в каком она распространяется по сетям, накапливаться или храниться не может, поэтому резервирование этой энергии возможно лишь в преобразованном виде. Способы хранения энергии делятся на:

электрические (конденсаторы);

химические (аккумуляторные батареи, жидкое и газообразное топливо);

механические (потенциальная энергия в поле силы тяжести, энергия вращающихся масс, энергия сжатого газа).

Электрохимические конденсаторы (суперконденсаторы) – новый класс накопителей энергии, который занимает функциональную нишу между традиционными конденсаторами и аккумуляторными батареями. В качестве существенного недостатка следует отметить гораздо меньшую энергоемкость по сравнению с аккумуляторами.

Максимальная энергоемкость современных аккумуляторных батарей достигает 100–200 кДж/кг. Известен проект аккумуляторной батареи мощностью 32 МВт для использования в энергосистеме [6]. Аккумуляторные батареи дороги, имеют срок службы примерно 3 года и сложны в эксплуатации.

В качестве резервной мощности также используют электростанции на основе авиационных турбин [7]. В частности, несколько таких установок

использует Мосэнерго, в том числе и для покрытия суточных максимумов [8].

Известно о резервировании энергии в виде сжатого природного газа [9].

Среди механических способов накопления энергии достаточно давно применяются гидроаккумулирующие электростанции. Предлагаются и другие типы накопителей, например хранение сжатого воздуха в подземных хранилищах [10].

К наиболее распространенным резервным источникам питания относятся дизель-генераторы. Они характеризуются достаточно широким диапазоном мощностей (0,01–5 МВт и более) и высоким КПД выработки электроэнергии (до 40%) [11]. Время запуска дизель-генераторов большой мощности из холодного состояния может достигать 20–30 мин. Хранилище жидкого топлива для работы дизель-генератора, как правило, подземное, может быть достаточно большим.

Альтернатива природному газу. Достаточно широко распространены электростанции на основе газопоршневых двигателей [12] или газовых турбин [24]. Они применяются как основные и резервные источники при наличии подключения к магистрали природного газа либо при наличии газогенерирующих мощностей (например при производстве биогаза из коровьего или свиного навоза).

Как альтернативу можно предложить снабжение такой системы газом, получаемым из местного органического сырья: древесины, торфа, угля. В этом случае сырьё должно быть подвергнуто процессу газификации, позволяющему преобразовывать энергию сгорания твердого топлива в энергию сгорания искусственного газа – сингаза – смеси CO и H₂. В качестве органического сырья также могут фигурировать и различного рода отходы (твердые бытовые, сельскохозяйственные), проблема переработки которых становится год от года всё более актуальной. Наибольшей эффективности процесса газификации удастся достичь при использовании в качестве дутьевого агента низкотемпературной плазмы, являющейся одновременно теплоносителем, поставляющим энергию для эндотермических процессов восстановления [13].

Установка по газификации, например твёрдых бытовых отходов (ТБО), состоит из следующих подсистем:

для сортировки поступающих ТБО и подготовки их к процессу газификации;

для производства из топлива сингаза методом плазменной газификации с последующим охлаждением и очисткой;

утилизации энергии сингаза.

Из бытовых отходов, поступающих на переработку, отбираются вторичные ресурсы (бумага, картон, стекло, металлы, пластмасса) и крупные включения неорганической природы (камни, строительные отходы). Оставшаяся после сортировки масса отходов измельчается и высушивается до влажности 20–30%. Затем, в случае использования слоевого газификатора из измельченной массы отходов, необходимо сформировать брикеты или пеллеты заданного размера. В газификатор кипящего слоя отходы можно подавать не брикетировав.

Поступающая в газификатор масса отходов подвергается воздействию высокой температуры и дутьевых агентов и последовательно проходит стадии нагрева, сушки, пиролиза и газификации, в результате чего органическая составляющая отходов преобразуется в сингаз, а минеральная – в золу или шлак. В составе сингаза также может присутствовать азот (при использовании в качестве дутьевого агента воздушной плазмы), углекислый газ, метан, пары воды (от неполноты превращений внутри газификатора), другие примеси (поскольку в исходном сырье помимо углерода и водорода содержатся прочие химические элементы). Кроме того, сингаз после выхода из плазменного газификатора имеет высокую температуру (около 1200 °С, что позволяет исключить присутствие в сингазе опасных соединений типа диоксинов). Поэтому перед дальнейшим использованием сингаз необходимо охладить (его теплоту можно использовать для производства водяного пара либо подогрева воздуха для сушки отходов) и очистить от вредных и нежелательных компонентов. Здесь используются отработанные в промышленности технологические приёмы, реализованные в различных аппаратах (циклоны, квенчеры, теплообменники, котлы-утилизаторы, скрубберы, фильтры и т.п.). Далее сингаз направляется в хранилище. Для хранения сингаза при давлении около атмосферного можно использовать газгольдеры переменного объёма (по типу вышедших из употребления хранилищ светильного газа), либо сингаз можно хранить в газгольдере постоянного объёма, но здесь потребуются дополнительные затраты энергии на его сжатие. Оптимальным давлением сжатия сингаза является рабочее давление газовой турбины.

Согласно экспериментальным данным [14] по параметрам сингаза, получаемого из отходов древесины, с 1 кг можно получить ~2,2 м³ сингаза с теплотворной способностью ~6 МДж/м³. Тогда для снабжения газовой турбины мощностью 10 МВт с электрическим КПД 35% [11] в течение 1 ч потребуются ~17 тыс. м³ сингаза. Для хранения такого количества газа при давлении, например 30 атм, потребуется сферический газгольдер диаметром

Таблица 1

| Мощность генератора, МВт | Необходимая мощность, МВт | Необходимый расход газа, м ³ /с | Время работы генератора, ч | Необходимый запас газа, тыс. м ³ | Химическая энергия, запасенная в газе, ГДж | Объем хранилища, м ³ | Диаметр сферического резервуара, м | Производительность газификатора, кг/ч |
|--------------------------|---------------------------|--|----------------------------|---|--|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 2,86 | 0,48 | 2 | 3,43 | 20,57 | 114,3 | 6,02 | 15,6 |
| 5 | 14,29 | 2,38 | 2 | 17,14 | 102,86 | 571,4 | 10,30 | 77,9 |
| 10 | 28,57 | 4,76 | 1 | 17,14 | 102,86 | 571,4 | 10,30 | 77,9 |
| 20 | 57,14 | 9,52 | 1 | 34,29 | 205,71 | 1142,9 | 12,97 | 155,8 |

~10 м. Для обеспечения периодичности включения генерирующей мощности, например 1 раз в 100 ч, производительность установки газификации должна быть ~78 кг/ч. Оценки параметров установки для разных вариантов представлены в табл. 1 (при этом КПД генератора 35%, низшая теплота сгорания газа 6 МДж/м³, время работы генератора 2 ч, давление хранения 30 атм, удельный выход газа 2,2 м³/кг, время накопления газа 100 ч).

Установка плазменной газификации отходов, производительность которой близка к параметрам, указанным в табл. 1, создана в ИЭЭ РАН (рис. 1) [15].

Установка создавалась для исследований процесса плазменной газификации, и основной ее задачей было получение сингаза из различного рода твердых углеродосодержащих веществ. Основным

элементом установки является реактор-газификатор 1, все процессы в котором инициируются и сопровождаются потоками плазмы от плазмотронов 2–4. Газификатор шахтный слоевой работает по обращенной схеме газификации. Воздушный плазмотрон 4 (рис. 2) небольшой мощности предназначен для разогрева нижней части газификатора на начальной стадии эксперимента с целью сокращения его длительности [16]. С помощью плазмотрона 3 можно подавать плазму водяного пара или углекислого газа в восстановительную зону газификатора [17]. Воздушный плазмотрон 1 обеспечивает проведение процесса воздушно-плазменной газификации.

Сингаз, получаемый из отходов в ходе процесса плазменной газификации, отбирается из нижней части газификатора через газоход 7. На газоходе



Рис. 1. Технологическая схема и общий вид реакторного узла установки плазменной газификации отходов ИЭЭ РАН: 1 – реактор-газификатор; 2 – основной плазмотрон; 3 – плазмотрон для ввода плазмы в зону восстановления; 4 – плазмотрон для предварительного разогрева зоны вывода шлака; 5 – камера загрузки отходов; 6 – устройство для удаления несгораемых остатков; 7 – газоход отвода сингаза; 8 – дожигатель сингаза; 9 – дежурный факел; 10 – циклон; 11 – газоанализатор; 12 – оросительный скруббер; 13 – насадочный скруббер; 14 – выхлопная труба; 15 – вытяжной вентилятор



Рис. 2. Генератор воздушной плазмы переменного тока мощностью 40 кВт

смонтирован комплекс устройств, обеспечивающих отбор пробы сингаза для проведения анализа его состава. Далее сингаз сжигается в дожигателе δ , а продукты его сгорания, пройдя многоступенчатую систему очистки, рассеиваются в атмосфере. Типичный состав сингаза, получаемый из отходов древесины, приведен на рис. 3.

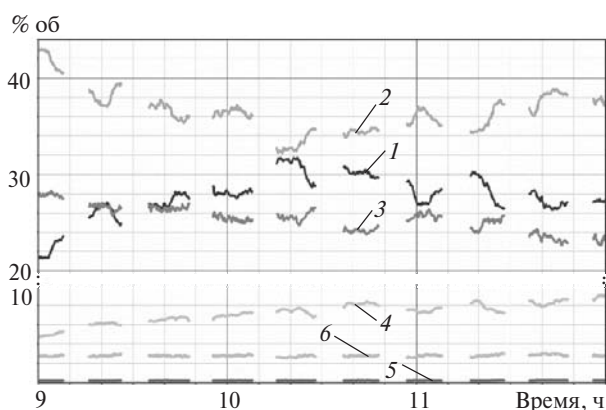


Рис. 3. Изменение состава сингаза в ходе эксперимента по плазменной газификации отходов древесины: 1 – H_2 ; 2 – N_2 ; 3 – CO ; 4 – CO_2 ; 5 – O_2 ; 6 – остальные

Получаемый на установке газ пригоден для использования в газопоршневых двигателях и турбинах, выпускаемых промышленностью [12].

Маховичные накопители энергии. В ряде случаев газоаккумулирующую электростанцию целесообразно использовать совместно с маховичным накопителем энергии, что не исключает возможностей их самостоятельного применения.

Маховичные накопители энергии существенно дешевле, чем аккумуляторные и гидроаккумулирующие накопители энергии, имеют срок службы не менее 25–30 лет [18, 19].

Из табл. 2 видно, что использование маховичных агрегатов для повышения запаса по мощности энергосистем может дать значительный экономический эффект, поскольку в настоящее время средняя стоимость вновь вводимых тепловых электростанций составляет примерно 2000\$ за киловатт установленной мощности, а средняя стоимость киловатта установленной мощности маховичного агрегата (вместе с полупроводниковым преобразователем) не превысит 300–400\$ или 0,1–0,6\$ за килоджоуль накопленной энергии.

Маховичный электрический генератор синхронного типа мощностью порядка сотен мегаватт в течение длительного времени использовался в сочетании с полупроводниковыми преобразователями для формирования импульса мощности постоянного тока в системах электропитания крупных физических установок [18]. Такой генератор, будучи подключенным через преобразователь частоты к энергосистеме, может за время порядка 0,2–0,5 с развить свою номинальную мощность и обеспечить стабилизацию частоты в энергосистеме на время,

Таблица 2

| Резервный источник энергии | Эксплуатационные показатели | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| | Удельная энергия (мощность) | Удельная стоимость | Срок службы, лет | Время пуска |
| Маховик из стали 38ХНЗМФА [20] | 65-100 кДж/кг | 0,03-0,08 \$/кДж | 25–30 | Мгновенная готовность |
| Маховик из титана [21] | 110-170 кДж/кг | 0,1-0,3 \$/кДж | 25–30 | То же |
| Маховик из углеродного волокна [22] | 1600 кДж/кг | 0,3-0,6 \$/кДж | 25–30 | –" |
| Литий-ионный аккумулятор [6] | 100-200 кДж/кг | 1,0-1,5 \$/кДж | 2–3 | Быстрая готовность |
| Дизельный электрогенератор [23] | 0,1-0,2 кВт/кг | 250-350 \$/кВт* | 25–30 | От 20 с до 30 мин** |
| Газотурбинный электрогенератор [24] | 0,1-0,2 кВт/кг | 500-850 \$/кВт* | 25–30 | От 5 с до 10 мин** |

* Без учета стоимости помещения и дополнительного оборудования электростанции.

** Больше время для большей мощности.

необходимое для ввода основных генерирующих мощностей энергосистемы [25–29]. Для этой цели могут быть использованы маховичные агрегаты, разработанные для установок питания электрофизической аппаратуры в ИЭЭ РАН. Агрегат 200 МВт при энергоёмкости 1000 МДж изготавливался серийно на заводе «Электросила». В ИЭЭ РАН был разработан ряд проектов маховичных агрегатов с энергоёмкостью от 200 МДж до 4 ГДж и мощностью от 10 до 500 МВт [30]. Маховичный генератор может использоваться для сглаживания колебаний нагрузки на металлургических производствах. Известна маховичная электроустановка, изготовленная фирмой Тошиба и используемая на острове Окинава для стабилизации электропотребления металлургического производства [31].

Энергоёмкость маховичных накопителей энергии весьма велика и достигает 110–170 кДж/кг для маховика из титана и 1600 кДж/кг для маховика из углеродного волокна, что превышает энергоёмкость лучших аккумуляторных батарей.

В маховике при его вращении накапливается удельная кинетическая энергия

$$w = \gamma v^2 / 2, \quad (1)$$

где γ — удельная масса материала маховика; v — линейная скорость соответствующего элемента маховика.

Центробежная сила, отнесенная к единице объема маховика, действующая на его элементы из-за вращения,

$$q = \gamma v^2 / r, \quad (2)$$

где r — радиус, на котором расположен рассматриваемый элемент маховика.

Значительная удельная энергия может быть накоплена в маховике, имеющем форму тонкого кругового кольца, где все элементы маховика имеют практически одинаковую линейную скорость. Будем считать, что s — допустимое механическое напряжение в тонком круговом кольце. Для удельной (отнесенной к единице объема) кинетической энергии выполненного в виде тонкого кругового кольца маховика получим [32]:

$$w = s / 2. \quad (3)$$

В общем случае для маховика любой формы удельная отнесенная к объёму кинетическая энергия маховика

$$w = Ks. \quad (4)$$

Для маховика, имеющего форму тонкого кругового кольца, $K = 0,5$. Максимальное значение $K = 1,0$ получается для маховика, имеющего форму равно-

напряжённого диска, где в любой точке диска тангенциальное напряжение s_c равно радиальному напряжению s_r . Такой диск имеет ширину [33]:

$$h = h_c e^{-\frac{\gamma w^2 r^2}{2s}}, \quad (5)$$

где h_c — ширина диска в центре маховика; w — частота вращения маховика; r — радиус маховика, соответствующий ширине h .

Из (5) следует, что $h = 0$ при $r = \infty$. Практически целесообразно ограничить радиус маховика значением $r = (2, 3)h_c$. При этом для реальных γ , w и s коэффициент K приближается к единице.

Таким образом, максимальная удельная (отнесенная к единице объёма) кинетическая энергия маховика численно равна допускаемому в этом маховике максимальному механическому напряжению от центробежных сил и не зависит от удельной массы материала маховика. Например, для титанового кольца предел прочности на растяжение равен 1,2 ГПа. Принимая допустимое напряжение в кольцевом маховике $s = 1,0$ ГПа, по (4) получим значение энергоёмкости для такого маховика $w = 1000$ МДж/м³ или 222 кДж/кг. Реально выполненные большие маховики обычно имеют значительные запасы прочности и худшее использование материала маховика, чем предполагаемое (4). Например, разработанный и испытанный в ИЭЭ РАН титановый маховик с расчетной энергоёмкостью 208 МДж имел $w = 50$ кДж/кг при частоте вращения 6000 об/мин [30]. На рис. 4 показан испытательный стенд ИЭЭ РАН с установленным на нем маховиком из титана с энергоёмкостью 208 МДж.

Титановые поковки могут быть изготовлены массой примерно до 12 т [20]. На рис. 5 показан профиль титанового маховика, имеющего форму равнонапряжённого диска диаметром 2 м с $s = 0,8$ ГПа, максимальной шириной 1 м, массой 12,58 т и

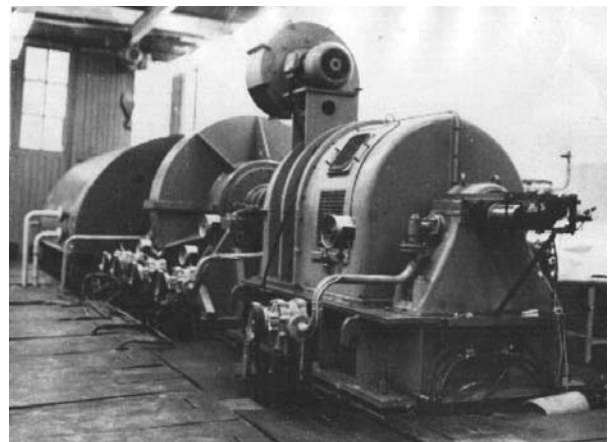


Рис. 4. Испытательный стенд ИЭЭ РАН (слева направо: турбогенератор мощностью 12 МВт, маховик в кожухе, вспомогательный электродвигатель постоянного тока с вентилятором системы независимой вентиляции, находящимся над ним)

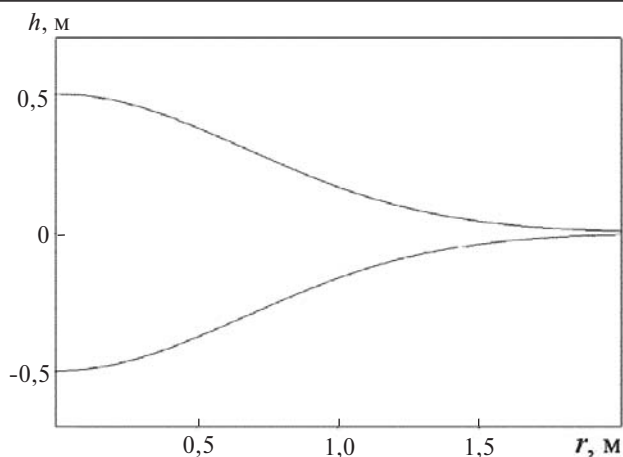


Рис. 5. Профиль равнонапряженного титанового диска

энергоемкостью 2,12 ГДж при частоте вращения 6000 об/мин. Для этого маховика коэффициент $K = 0,95$.

Существенное повышение энергоемкости может быть достигнуто при использовании в маховиках углеродных нитей. В настоящее время фирмой Тога выпускаются в промышленном масштабе углеродные нити с пределом прочности 6,37 ГПа и получены углеродные нити с пределом прочности 7,0 ГПа [22]. Методом осаждения углерода из газовой фазы получены алмазные пленки толщиной 200 мкм с пределом прочности до 2 ГПа [34].

Фирмой Weacon Power Corp. создана экспериментальная маховичная система мощностью 20 МВт с накопленной кинетической энергией 18 ГДж [29]. Маховичная система состоит из 200 маховичных генераторов с максимальной рабочей частотой вращения 16000 об/мин. Минимальная рабочая частота вращения маховиков 8000 об/мин. Маховики маховичных генераторов выполнены композитными из углеродного и стекловолокна. Двигатель-генераторы выполнены с возбуждением от постоянных магнитов. Каждый маховик и вместе с двигатель-генератором находится в индивидуальном вакуумированном кожухе. Маховичная система размещена в Стефентауне и подключена к Нью-Йоркской энергосистеме. Подключение маховичных генераторов к энергосистеме осуществлено через полупроводниковые преобразователи, обеспечивающие также работу в режиме компенсаторов реактивной мощности. Общая стоимость установки в Стефентауне составила 45 млн долл. или 2,5 долл. за килоджоуль накопленной кинетической энергии. К числу недостатков этой установки следует отнести необходимость иметь мощность рабочих преобразователей частоты, равную мощности маховичного генератора, что заметно повышает стоимость установки.

Альтернативой этому решению может быть использование асинхронного генератора, в индукторную обмотку которого включен преобразователь частоты. Асинхронизированный генератор представляет собой асинхронную машину двойного питания с фазовым ротором, у которого обмотки статора и ротора связаны каждая с сетью переменного тока. При этом ток статорной обмотки имеет частоту сети переменного тока, а ток в роторной обмотке, присоединяемой к этой же сети через преобразователь частоты и, если требуется, через трансформатор, имеет частоту скольжения. Мощность, потребляемая от преобразователя частоты, примерно равна мощности статорной цепи, умноженной на значение скольжения [26, 27].

Газоаккумулирующая электростанция. Таким образом, для стабилизации режимов в энергосистеме можно предложить комбинацию источника резервной мощности с длительным сроком работы в виде газопоршневой или газотурбинной энергоустановки, работающей от запаса газа, полученного из местного органического сырья, включая отходы, путем плазменной высокотемпературной газификации, с маховичным генератором переменного тока с полупроводниковым преобразователем частоты. На рис. 6 представлена принципиальная схема такого комплекса.

Накопитель во время стационарной работы запасает механическую энергию во вращающихся массах маховика, которая в случае аварийного отключения сети практически мгновенно может быть преобразована обратно в электрическую. Параметры маховика подбираются таким образом, чтобы обеспечивать работу сети в течение времени, необходимого для запуска резервной генерирующей мощности. В этот же период работает установка плазменной газификации небольшой производительности, создающая запас сингаза для запуска мощного резервного источника электрической энергии.

Создание подобных систем целесообразно при необходимости иметь резервную мощность до 20 МВт на период работы до 1–2 ч.

Выводы. 1. Регулирование активной мощности электростанций в энергосистемах возможно только с небольшой скоростью. Так для тепловых электростанций регулирование активной мощности обычно проводится со скоростью не более 15% номинальной мощности электростанции в минуту. Быстрые колебания активной мощности в энергосистемах могут быть покрыты только за счет энергии маховых масс вращающихся агрегатов энергосистемы или других накопителей энергии.

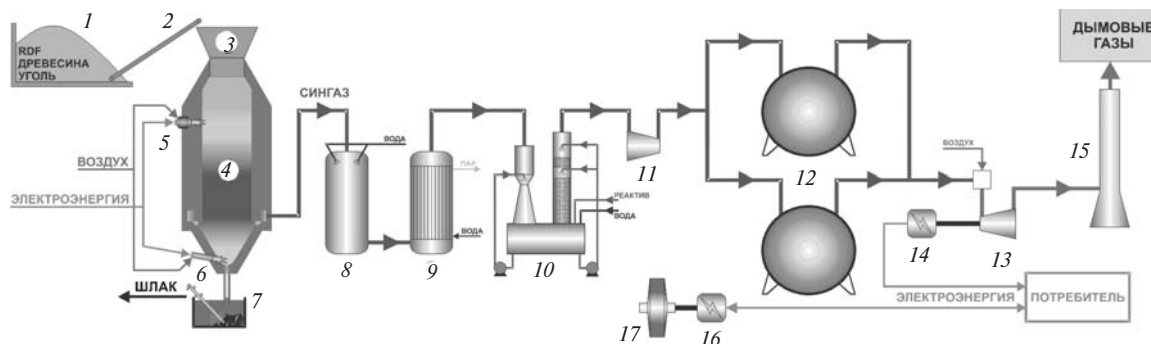


Рис. 6. Принципиальная технологическая схема газоаккумулирующей аварийной электростанции: 1 – приём, хранение и подготовка отходов; 2 – подача отходов; 3 – питатель; 4 – реактор-газификатор; 5 – основной генератор плазмы; 6 – генератор плазмы для жидкого шлакоудаления; 7 – гашение шлака; 8 – закалка сингаза; 9 – рекуперация тепловой энергии сингаза; 10 – очистка сингаза; 11 – сжатие сингаза; 12 – хранение сжатого сингаза; 13 – газовая турбина; 14 – электрогенератор; 15 – выхлопная труба; 16 – электрогенератор; 17 – маховик

2. Для стабилизации режимов в энергосистеме перспективным является использование синхронных генераторов с газопоршневым или газотурбинным приводом, работающим от запасенного резерва сжатого горючего газа, совместно с маховичными генераторами переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты.

3. Для создания запаса горючего газа из местного органического сырья, в том числе из отходов, целесообразно применять процесс плазменной газификации.

4. Целесообразно выполнять источники резервного электропитания на основе использования комбинации газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов с маховичными генераторами мощностью 10–20 МВт для установки на местных подстанциях напряжением 10 кВ и мощностью 100–200 МВт для установки на крупных подстанциях с напряжением 100–500 кВ.

5. Использование маховичных агрегатов для повышения запаса по мощности энергосистем может дать значительный экономический эффект, поскольку в настоящее время средняя стоимость вновь вводимых тепловых электростанций составляет примерно 2000\$ за киловатт установленной мощности, а средняя стоимость установленной мощности маховичного агрегата (вместе с полупроводниковым преобразователем) не превысит 300–400\$ за киловатт установленной мощности или 0,1–0,6\$ за килоджоуль накопленной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаренко Р.Б., Попов В.Е., Рутберг Ф.Г. Устройство для быстросействующего выравнивания активной мощности энергосистем. Патент РФ 2515269. Приоритет от 04.03.2013.
2. Гончаренко Р.Б., Рутберг Ф.Г. Применение маховичных агрегатов параманного тока с целью стабилизации режимов энергосистем. – Известия РАН. Энергетика, 2013, № 5, с. 13–21.
3. Баринов В.А., Гуров А.А., Корчак В.Ю., Маневич А. С., Митин Ю.В. Питание потребителей электроэнергии от электроэнергетических систем. – Электричество, 1990, № 11, с. 1–6.

4. Безлепки В.П., Михайлов С.Я. Регулировочный диапазон тепловых электростанций. – Л.: Энергоатомиздат, 1990, 168 с.

5. Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.240.001–2010. Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности. – М., 2009.

6. The World's Largest Lithium-Ion Battery Farm Comes Online. Forbs 27.10.2011: <http://www.forbes.com/sites/uciliawang/2011/10/27/worlds-largest-lithium-ion-battery-farm/>

7. <http://www.mobilepacusa.com/>

8. <http://www.mobilegtes.ru/>

9. Казарян В.А. Подземное хранение углеводородов в солевых отложениях. – М.: Ижевск: ИКИ, 2006, 464 с.

10. Казарян В.А. Использование крупномасштабных подземных аккумуляторов энергоносителей для регулирования неравномерности энергопотребления. – Изв. Академии наук. Энергетика, 2013, № 3, с. 3–26.

11. Catalog of CHP Technology 2008: http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_full.pdf

12. Сайт компании MWM: <http://www.mwm.net>

13. Rutberg Ph.G., Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimtsev A.A., Shtengel S.V. On efficiency of plasma gasification of wood residues. Biomass and Bioenergy, 2011, 35, pp. 495–504.

14. Братцев А.Н., Кузнецов В.А., Попов В.Е., Уфимцев А.А. Плазменная газификация биомассы на примере отходов древесины. – Теплофизика высоких температур, 2011, т. 49, № 2, с. 251–255.

15. Братцев А.Н., Попов В.Е., Рутберг А.Ф., Штенгель С.В. Установка для плазменной газификации различных видов отходов. – Теплофизика высоких температур, 2006, т. 44, № 6, с. 832–837.

16. Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Popov S.D., Surov A.V., Nakonechny Gh.V. Multiphase stationary plasma generators working on oxidizing media. Plasma Phys Controlled Fusion, 2005, 47, pp. 1681–1698.

17. Rutberg Ph.G., Kuznetsov V.A., Serba E.O., Popov S.D., Surov A.V., Nakonechny G.V., Nikonov A.V. Novel three-phase steam-air plasma torch for gasification of high-caloric waste. – Applied Energy, 2013, vol. 108, pp. 505–514.

18. Glebov I.A., Kasharsky E.G., Rutberg Ph.G. Synchronous Generators in Electrophysical Installations. Lexington Books. – Massachusetts, 1982, 187 p.

19. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. – Л.: Наука, 1985, 224 с.

20. Сайт ООО «ОМЗ-Спецсталь»: <http://omz-specialsteel.com>

21. Сайт «ВСМПО-АВИСМА»: www.vsm-po.ru

22. Сайт фирмы Toray Industries, Inc. of Japan: toraycfa.com/product.html

23. Сайт фирмы «Caterpillar»: <http://www.catpowerplants.com>

24. Сайт фирмы «Capstone Turbine Corporation»: www.capstoneturbine.com

[07.05.14]

25. Рутберг Ф.Г., Гончаренко Р.Б., Кашарский Э.Г. Перспективы энергоснабжения в электрических сетях с пониженной динамической устойчивостью при помощи маховичных агрегатов. — Изв. РАН. Энергетика, 1999, № 3, с. 158–160.

26. Рутберг Ф.Г., Гончаренко Р.Б., Кашарский Э.Г., Ровинский П.А., Шакарян Ю.Г. К вопросу использования маховичного генератора переменного тока как компенсатора колебаний активной мощности в энергосистеме. — В кн.: Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования (вып. 4). — СПб: ОЭЭП РАН, 2002, с. 23–33.

27. Рутберг Ф.Г., Шакарян Ю.Г., Гончаренко Р.Б., Кашарский Э.Г., Лабунец И.А. О перспективных направлениях использования асинхронизированных генераторов в электроэнергетике. — Изв. РАН. Энергетика, 2008, № 1, с. 33–40.

28. Eyer J. Benefits from Flywheel Energy Storage for Area Regulation in California-Demonstration Results. SAND2009-6457, Sandia National Laboratories, 2009: <http://www.sandia.gov/ess/publication/SAND2009-6457.pdf>

29. Сайт фирмы Beacon Power Corp.: <http://www.beaconpower.com>

30. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г., Гончаренко Р.Б., Кашарский Э.Г., Чубраева Л.И. Перспективные системы энергопитания корабельных импульсных и кратковременных нагрузок. — В кн. «Российская наука — Военно-Морскому флоту». — М.: Наука, 1997, с. 269–271.

31. http://www3.toshiba.co.jp/power/english/hydro/products/facts/facts_04.htm

32. Джента Дж. Накопление кинетической энергии. М.: Мир, 1988, 728 с.

33. May P.W. Diamond thin films: a 21st-century material. — Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 2000, 358, pp. 473–495.

А в т о р ы : Гончаренко Роберт Борисович в 1960 г. окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. В 1989 г. в Военноморской академии защитил докторскую диссертацию. Ведущий научный сотрудник Института электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН).

Киселев Александр Александрович в 1961 г. окончил механический факультет Воронежского технологического института. В 1976 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка, создание и исследование серии трехфазных плазматронов возрастающей мощности» в НИИЭФА. Заместитель директора ИЭЭ РАН.

Попов Виктор Евгеньевич в 1997 г. окончил БГТУ «Военмех». В 2007 г. в защитил кандидатскую диссертацию «Исследование, разработка и создание систем плазменной газификации твердых органических отходов на основе мощных электродуговых генераторов плазмы» ИЭЭ РАН. Заведующий лабораторией в ИЭЭ РАН.

Рутберг Филипп Григорьевич в 1954 г. окончил юридический факультет Ленинградского государственного университета, в 1961 г. — Северо-западный политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты». Академик Российской академии наук. Директор ИЭЭ РАН.

Application of Backup Power Systems on the Basis of Flywheel AC Units and Gas Storage Installations for Plasma-Assisted Gasification of Wastes for Stabilizing Power System Operating Modes

R.B. GONCHARENKO, A.A. KISELEV, V.E. POPOV, and Ph.G. RUTBERG

The recent decades have seen more frequent cases of large system-wide failures. Availability of backup power sources and means for stabilizing the voltage and frequency in power systems is the necessary condition for preventing the occurrence of such failures. Many problems arising under such conditions can efficiently be solved through the use of gas-storage installations for plasma-assisted gasification of wastes in combination of flywheel AC generators and semiconductor frequency converters. As is well-known, the voltage in power systems is stabilized by adjusting the reactive power of generators, rotary and static reactive power compensators, as well as by connecting/disconnecting reactive loads (reactors). The power system frequency is stabilized by adjusting the active power output of power stations. At present, reactive power is controlled in power systems at a rate of up to 20–50% of its nominal value per second or even faster (the latter is achieved through the use of static reactive power compensators). In the majority of cases, such voltage control rate is sufficient for achieving good stabilization of voltage in power systems. The possibilities of using gas-storage installations for plasma-assisted gasification of wastes in combination with flywheel AC generators and semiconductor frequency converters as backup power sources and for stabilizing the operating modes in power systems are considered. It is shown that such sources of backup power supply should have capacities equal to 10–20 MW when installed at local 10 kV substations and 100–200 MW when installed at large 100–500 kV substations.

Key words: power systems, stability, energy storage, plasma-assisted gasification of wastes

REFERENCES

1. Patent RF № 2515269/ R.B. Goncharenko, V.E. Popov, G.F. Rutberg. *Ustroistvo dlya bustrodeistvuyushchego vyvaznivaniya aktivnoi moshchnosti energosistem* (A device for quick balancing of active power in power systems). With a priority date 04.03.2013.
2. Goncharenko R.B., Rutberg Ph.G. *Izvestia Rossiiskoi Akademii nauk. Energetika* (News of the Russian Academy of Sciences. Power engineering), 2012, No 5, pp. 13–21.
3. Barinov V.A., Gurov A.A., Korchak V.Yu., Manevich A.S., Mitin Yu.V. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1990, № 11, pp. 1–6.
4. Bezlepkin V.P., Mikhailov S.Ya. *Regulirovochnyi diapason teplovykh elektrostantsii* (Adjusting range of the thermal power stations). Leningrad. Publ. «Energoatomizdat», 1990, 168 p.
5. Standart OAO «SO EES» STO 59012820.29.240.001–2010 «*Technicheskiye pravila organizatsii v EES Rossii avtomaticheskogo ogranicheniya snizheniya chastoty pri avariinom defetsite aktivnoi moshchnosti* (Technical regulations for organizing automatic limitation of frequency decrease under the conditions of emergency shortage of active power in the UES of Russia). Moscow, 2009.
6. The World's Largest Lithium-Ion Battery Farm Comes Online. Forbs 27.10.2011: <http://www.forbes.com/sites/uciliawang/2011/10/27/worlds-largest-lithium-ion-battery-farm/>
7. <http://www.mobilepacusa.com>
8. <http://www.mobilegtes.ru/>
9. Kazariyan V.A. *Podzemnoye khraneniya uglevodorodov v soleyvkh otlozheniyakh* (Underground storage of hydrocarbons in salt deposits). Moscow, Izhevsk. Publ. IKI, 2006, 464 p.
10. Kazariyan V.A. *Izvestiya Akademii nauk Rossii. Energetika* (News of Russian Academy of Sciences. Energetics), 2013, № 3, pp. 3–26.
11. Catalog of CHP Technology 2008: http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_full.pdf
12. <http://www.mwm.net>
13. Rutberg Ph.G., Bratsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimtsev A.A., Shtengel S.V. On efficiency of plasma gasification of wood residues. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35, pp. 495–504.
14. Brattsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimtsev A.A. (Thermal Physics of High Temperatures), 2011, vol. 49, № 2, pp. 251–255.
15. Brattsev A.N., Popov V.E., Rutberg A.Ph., Shtengel' S.V. (Thermal Physics of High Temperatures), 2006, vol. 44, № 6, pp. 832–837.
16. Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Popov S.D., Surov A.V., Nakonechny Gh.V. Multiphase stationary plasma generators working on oxidizing media. *Plasma Phys Controlled Fusion*, 2005, 47, pp. 1687–1698.
17. Rutberg Ph.G., Kuznetsov V.A., Serba E.O., Popov S.D., Surov A.V., Nakonechny G.V., Nikonov A.V. Novel three-phase steam-air plasma torch for gasification of high-caloric waste. – *Applied Energy*, 2013, vol. 108, pp. 505–514.
18. Glebov I.A., Kasharsky E.G., Rutberg Ph.G. *Synchronous Generators in Electrophysical Installations*. Lexington Books. – Massachusetts, 1982, 187 p.
19. Glebov I.A., Kasharskii E.G., Rutberg Ph.G.. *Synchronous generators with the shortnd shock action*. Leningrad. Publ. "Nauka", 1958, 224 p.
20. Сайт ООО «ОМЗ-Спецсталь»: <http://omz-specialsteel.com>
21. Сайт «ВСМПО-АВИСМА»: www.vsmmpo.ru
22. Сайт фирмы Toray Industries, Inc. of Japan: toraycfa.com/product.html.
23. Сайт фирмы «Caterpillar»: <http://www.catpowerplants.com>
24. Сайт фирмы «Capstone Turbine Corporation»: www.capstoneturbine.com
25. Rutberg Ph.G. Goncharenko R.B., Kasharskii E.G. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. nenergetika* (News of Russian Academy of Sciences. Energetics), 1999, No 3, pp. 158–160.
26. Rutberg Ph.G., Goncharenko R.B., Kasharskii E.G., Rovinskii P.A., Shakariyan Yu.G. *Voprosu ispol'zovaniya makhovichnogo generatora peremennogo toka kak kompensatora kolebanii aktivnoi moshchnosti v energosistem. V khige «Problemy sozdaniya i ekspluatatsii novykh tipov elektroenergeticheskogo oborudovaniya* (On using a flywheel AC generator to compensate active power fluctuations in a power system. In: Problems Pertinent to Construction and Use of New Types of Electric Power Equipment). St. Peterburg. Russian Academy of Sciences, 2002, issue 4, pp. 23–33.
27. Rutberg Ph.G., Shakariyan Yu.G., Goncharenko R.B., Kasharskii E.G., Labunets I.A *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Energetika* (News of Russian Academy of Sciences. Energetics), 2008, No 1, pp. 33–40.
28. Eyer J. Benefits from Flywheel Energy Storage for Area Regulation in California-Demonstration Results. SAND2009-6457, Sandia National Laboratories, 2009: <http://www.sandia.gov/ess/publication/SAND2009-6457.pdf>
29. Beacon Power Corp.: http://www.beaconpower.com/files/SEM_20MW_2010.pdf
30. Glebov I.A., Rutberg Ph.G., Goncharenko R.B., Kasharskii E.G., Chubrayeva L.T. *Perspektivnye sistemy energopitaniya korabel'nykh impul'snykh i kratkovremennykh nagruzok/ V knige «Rossiiskaya nauka – voenno-morskomu floutu* (Advanced systems for supplying power to impulse and short-term ship loads. In: Russian Science for the Navy). Moscow. Publ. «Nauka», 1997, pp. 269–272.
31. http://www3.toshiba.co.jp/power/english/hydro/products/facts/facts_04.htm
32. Genta G. *Kinetic Energy Storage*. Batterworths. – Moscow. Publ. "Mir", 1988, 428 p.
33. May P.W. Diamond thin films: a 21st-century material. – *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2000, 358, pp. 473–495.

Authors: Goncharenko Robert Borisovich (St. Petersburg, Russia) – Doctor Techn. Sci. He is leading scientific researcher at Institute of electrophysics and electric power Russian Academy of sciences (IEEP RAS).

Kiselev Aleksandr Aleksandrovich (St. Petersburg, Russia) – Cand. Techn. Sci. He is Deputy Director of the IEEP RAS.

Popov Victor Yevgen'yevich (St. Petersburg, Russia) – Cand. Techn. Sci. from the IEEP RAS. He is Head of the Laboratory of the IEEP RAS.

Rutberg Philipp Grigor'yevich (St. Petersburg, Russia) – Academician of the RAS and Director of the IEEP RAS.

