

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ ЭСГ

А. Ф. КАЛГАНОВ, В. В. ПАЦЕВИЧ

(Представлена научным семинаром проблемной лаборатории ЭСГ при ТПИ)

Развитие энергетики ближайшего будущего тесно связано с развитием техники производства, передачи и использования электрической энергии высокого и сверхвысокого постоянного напряжения. Это предполагает создание как энергетических, так и маломощных источников высокого и сверхвысокого постоянного напряжения. Последние необходимы для испытаний основного энергетического оборудования и проведения научных исследований, связанных с разработкой и эксплуатацией этого оборудования. В настоящее время источники высокого постоянного напряжения начинают выступать и как элементы технологического оборудования (например, в электронно-ионной технологии).

В ряду различных источников высокого постоянного напряжения особое место занимают так называемые электростатические генераторы, работающие по принципу преобразования механической энергии в электрическую при перемещении зарядов (заряженных тел или частиц) механическими силами против действия сил электрического поля [1]. Их особое место определяется тем, что они, соответственно принципу действия, наиболее приспособлены для непосредственного получения сверхвысокого постоянного напряжения и теоретически могут быть выполнены на энергетические мощности с удельными параметрами, лучшими удельных параметров других источников. С другой стороны, практическая задача создания мощных ЭСГ до сих пор не нашла своего удовлетворительного решения. В настоящее время к отработанным типам генераторов можно отнести лишь ленточный ЭСГ и роторный ЭСГ с транспортером-диэлектриком (ЭСГД). С помощью первого получают напряжения в миллионы вольт, но с токами лишь в сотни микроампер. Вторые развивают до 750 кВ, но мощность их не превышает нескольких киловатт, и по прогнозам не ожидается получения более одного-двух десятков киловатт [2].

Сложившееся положение объясняется тем, что, хотя теоретические и экспериментальные данные и позволяют сформулировать основные требования, которым должен удовлетворять энергетически эффективный ЭСГ, способы одновременного и полного удовлетворения этих требований еще не разработаны. Это связано не только с трудностями технологического порядка, с которыми сталкиваются разработчики ЭСГ, но и с тем, что, несмотря на кажущуюся простоту принципа действия ЭСГ, многие процессы и явления, сопровождающие функционирование ЭСГ, еще не до конца поняты или раскрыты.

Из анализа опубликованных результатов исследований ЭСГ, обобщенных в [1], и результатов наших начальных работ [3] вытекало, что оптимальное решение вопроса следует искать на пути разработки ЭСГ

со стержневыми транспортерами-проводниками, расположенными в диэлектрическом теле ротора (ЭСГС). Как было показано расчетами, при достаточно большом числе транспортеров-стержней удельная «поверхностная» мощность ЭСГС приближается к удельной «поверхностной» мощности ЭСГД в сопоставимых условиях [4]. Вместе с тем благодаря использованию сосредоточенной коммутации появляется возможность удвоения активной поверхности применением двойного статора, что уже существенно, с точки зрения увеличения удельной «объемной» мощности. Наконец, по тем же причинам ЭСГС оказывается наиболее приспособленным для многодискового исполнения, и это является определяющим фактором в решении проблемы увеличения активной поверхности в единице объема.

Аналогичные соображения в наиболее обобщенном виде были высказаны проф. Фелиси в 1960 г. [2]. При этом в качестве основной ставилась задача разработки систем коммутации. Очевидно, что решение этой задачи будет более эффективным, если оно будет связано с исследованием явлений, сопровождающих работу ЭСГС.

Проведенные в ТПИ исследования ЭСГС включали в себя разработку методики расчета линейных участков характеристик генераторов с контактной коммутацией, проверку этой методики на экспериментальных образцах ЭСГС, работавших как в свободной атмосфере, так и в сжатом газе, осциллографические исследования процессов в различных цепях ЭСГС, фотографическую и визуальную регистрацию световых процессов в зонах коммутации и в зазоре ротор—статор, экспериментальное исследование характеристик ЭСГС в режимах глубокого насыщения, моделирование электрических полей в системе электродов ЭСГС и т. п.

Было показано, что для расчета характеристик ЭСГС вполне применим метод, основанный на использовании уравнений электростатики с частичными емкостями [5]. Весьма плодотворным оказалось применение этого метода на основе метода электростатической аналогии [6]. Расчеты по [6] с большой точностью согласуются с экспериментальными данными [7]. Из проведенных расчетов и экспериментов выяснилось, что стержневым ЭСГ свойственно явление, аналогичное явлению дополнительного естественного самовозбуждения в ЭСГД [8], названное применительно в ЭСГС естественной перезарядкой [7].

В дальнейшем было показано [9], что в ЭСГС, как и в ЭСГД, имеет место явление двойного естественного переноса зарядов. Сущность его заключается в следующем. При определенных условиях электрическое поле в разрядной системе изменяет направление, и преобразование энергии при этом будет происходить как при прямом ходе транспортера (от зарядной системы к разрядной), так и при его обратном ходе. В результате этого максимальная мощность генератора в пределе возрастает в два раза вследствие соответствующего увеличения тока генератора без принудительной перезарядки транспортера в высоковольтной системе.

При высокой электрической прочности диэлектрического тела ротора ЭСГС электрический разряд возникает в газовом зазоре ротор—статор, если напряженность поля в зазоре, пропорциональная заряду транспортеров, превысит электрическую прочность среды. Наличие диэлектрического покрытия транспортеров приводит к тому, что в процессе горения разряда между промежутками транспортер—поверхность диэлектрика и поверхность диэлектрика—статор произойдет перераспределение напряженности электрического поля за счет осаждения зарядов на поверхность диэлектрика. При постоянной величине заряда транспортера напряженность электрического поля в зазоре уменьшится,

так как часть этого заряда будет «связана» зарядом, осажденным на поверхность диэлектрика. В установившемся режиме величина «связанного» заряда будет равна разности фактического заряда транспортера и «свободного» заряда, соответствующего максимальному значению напряженности электрического поля в зазоре на поверхности диэлектрика.

При соединении транспортера с высоковольтной щеткой его заряд, связанный с зарядом поверхности ротора, перераспределится между транспортером и индуктором. В зазоре между поверхностью диэлектрика и статором появится электрическое поле обратного направления. Перераспределившийся на индуктор заряд будет передаваться в нагрузку при обратном ходе транспортера, когда совершается работа против сил электрического поля, действующих не на заряды транспортеров, а на заряды обратного знака диэлектрического покрытия транспортеров. С ростом величины заряда транспортеров (например, при увеличении напряжения возбуждения) будет увеличиваться «связанный» заряд и, соответственно, величина напряженности электрического поля в области обратного хода транспортера. При полной симметрии зарядной и разрядной систем величина отношения тока нагрузки к напряжению возбуждения с появлением «связанного» заряда не изменится. Очевидно, что увеличение тока генератора за счет перераспределения связанного заряда возможно лишь тогда, когда в обусловленном им поле в области обратного хода транспортера напряженность поля будет меньше электрической прочности среды. Когда критические градиенты будут достигнуты и в области обратного хода транспортеров, здесь также возникает электрический разряд, который ограничивает величину заряда на поверхности диэлектрика, переносимого от системы нагрузки к системе возбуждения. Таким образом, ток генератора достигает своего максимального значения.

Используя теорему Гаусса для соответствующим образом выбранных поверхностей, охватывающих транспортеры и диэлектрик ротора, можно определить величину максимального заряда, передаваемого одним транспортером за один оборот ротора при одной паре полюсов:

$$Q_m = \frac{1}{m} \varepsilon_0 (\oint \bar{E}_1 \bar{ds} - \oint \bar{E}_2 \bar{ds}) = \frac{1}{m} \varepsilon_0 (E_{1n} \cdot S_1 + E_{2n} \cdot S_2),$$

где \bar{E}_1 и \bar{E}_2 — векторы напряженности электрического поля в газовом зазоре в области прямого и обратного хода транспортеров, соответственно;

E_{1n} и E_{2n} — максимальные средние значения нормальных составляющих полей \bar{E}_1 и \bar{E}_2 ;

m — половина числа транспортеров ротора.

В случае полной симметрии генератора

$$E_{1n} = E_{2n} = E_n.$$

Полагая в первом приближении, что

$$S_1 = S_2 = \frac{1}{2} S,$$

где S — полная активная поверхность ротора, получаем следующее выражение для максимального тока нагрузки:

$$I_{nm} = 2mnQ_m = 2n\varepsilon_0 E_n \cdot S = 2I'_{nm}, \quad (1)$$

где n — число оборотов ротора в секунду и $I'_{nm} = n \cdot \varepsilon_0 E_n S$ — максимальный ток нагрузки при отсутствии двойного переноса.

В настоящее время физика газового разряда в газовой полости, ограниченной диэлектриком, еще недостаточно изучена. Однако имеющиеся по этому вопросу данные показывают, что величина максимального значения напряженности может быть принята равной величине пробивных градиентов в равномерном поле для соответствующих полостей между металлическими электродами [10, 11]. Тогда величину максимального значения тока генератора, определяемую по (1), можно рассматривать с определенным приближением как физический предел для генератора с заданной величиной зазора и с выбранным составом и давлением газа, заполняющим зазор ротор—статор.

Определяющее влияние величины напряженности электрического поля в зазоре ротор—статор на величину максимального тока генератора подтверждено экспериментально на однодисковом генераторе со стеклянным статором при испытаниях нескольких роторов одинакового габарита, но отличавшихся числом и диаметром транспортеров, их взаимным расположением и глубиной залегания транспортеров в теле ротора. При испытаниях генератора на воздухе получены, в частности, следующие результаты. Минимальное значение тока генератора оставалось примерно одинаковым и равным $100 \div 110$ мка при уменьшении числа транспортеров с 330 до 36 с одновременным увеличением толщины диэлектрического покрытия с 0,8 мм до 3,5 мм. При малом числе транспортеров и постоянном зазоре ротор-статор, равном 0,2 мм, уменьшение толщины диэлектрического покрытия с 3,5 мм до 0,5 мм приводило к снижению максимального значения тока более чем в два раза. С увеличением числа транспортеров изменение тока с изменением толщины диэлектрического покрытия уменьшается. С увеличением величины зазора ротор-статор от 0,2 мм до 1,5 мм максимальное значение тока уменьшается от 100—110 мка до $40 \div 50$ мка, что соответствует уменьшению E_n от 60 кВ/см до 22 кВ/см. Величина напряжения возбуждения, при котором достигалось максимальное значение тока, увеличивалось с $4 \div 5$ кВ (при минимальных величинах воздушного зазора и толщины диэлектрического покрытия и максимальном числе транспортеров) до $20 \div 30$ кВ (при максимальных зазорах и толщине диэлектрического покрытия и максимальном числе транспортеров).

Как уже отмечалось, считается [2], что основная задача в разработке ЭСГС заключается в решении проблемы коммутации. В то же время сколь либо глубокие экспериментальные и теоретические исследования коммутации в генераторах такого типа не проводились. При этом принимался на веру, казалось бы, вполне очевидный факт, заключающийся в том, что протекание тока в нагрузке обусловлено передачей заряда транспортера коллектору (высоковольтному индуктору), к которому присоединена нагрузка, в период соединения щетки с транспортером через газовый разряд или металлический контакт. Данное положение принималось за аксиому и являлось отправным пунктом большинства исследований, связанных с коммутацией в ЭСП.

Осциллографическое исследование токов в генераторе [12] позволило установить, что закон изменения тока нагрузки при индукторах, перекрывающих три и большее число транспортеров, и щетках, расположенных примерно в средней части индукторов, в целом не зависит от условий коммутации (ширины щеток, их исполнения, искровой, коронной или контактной коммутации). Установление металлического контакта или контакта через искру или корону между транспортером и щеткой, соединенной с индуктором, сопровождается в основном лишь протеканием тока в цепи «транспортер—щетка—индуктор», закон изменения которого аналогичен закону изменения тока при коротком замыкании между

пластинами заряженного конденсатора. При этом в цепи разряда выделяется энергия

$$W \leq \frac{1}{2} QU_{\text{в}},$$

где Q — величина заряда, переносимого транспортером за один цикл работы генератора;

$U_{\text{в}}$ — напряжение возбуждения.

Если не приняты специальные меры, эта энергия выделяется в канале разряда между щеткой и транспортером, вызывая разрушения щетки и коллекторной части ротора. Для уменьшения разрушающего действия этих разрядов необходимо, с одной стороны, уменьшить величину выделяющейся энергии и, с другой стороны, рассосредоточить эту энергию по цепи разряда. Для уменьшения выделяемой при этом энергии необходимо уменьшить величину напряжения возбуждения и величину заряда, переносимого одним транспортером, например увеличением числа транспортеров. Рассредоточение энергии можно добиться включением сопротивления в разрядную цепь. Кроме того, длительность и надежность работы коммутирующих систем в значительной степени будет зависеть от конструктивных особенностей их выполнения.

Проведенные исследования показали, что ЭСГС со стержнями, помещенными в диэлектрик, обладают теми же положительными свойствами, связанными с наличием явлений естественной перезарядки и двойного естественного переноса, что в ЭСГД. Более того, ЭСГС в некотором роде является одновременно и генератором с диэлектрическим транспортером, так как при обратном ходе транспортера переносимый заряд располагается на диэлектрической поверхности ротора. Вместе с тем, здесь полностью сохраняются потенциальные преимущества сосредоточенной коммутации, позволяющие достигать более высокие удельные энергетические показатели при многодисковом исполнении, и создаются благоприятные возможности для использования новых средств (например, жидких диэлектриков [13, 14] в случае успешного применения их в других типах ЭСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. Под редакцией проф. А. А. Воробьева, ГЭИ, 1960.
2. Применение сил электрического поля в промышленности и сельском хозяйстве. Под ред. В. И. Левитова и А. Г. Ляпина, Изд-во ВНИИЭМ, стр. 11—17, 1964.
3. А. А. Воробьев, А. Ф. Калганов, Ю. А. Корзенников, В. В. Пацевич, В. П. Щербинин. Электронные ускорители (Труды IV межвузовской конференции по электронным ускорителям), изд-во «Вышая школа», стр. 9—14, 1964.
4. А. Ф. Калганов, В. В. Пацевич. Изв. вузов, «Электромеханика», 1963, № 8, 917.
5. Ю. А. Корзенников, В. В. Пацевич, Ю. Н. Сивков. Электронные ускорители. Атомиздат, стр. 16—21, 1966.
6. В. А. Лукутин, В. Д. Эськов. Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1967, № 2, 94.
7. А. П. Кононов, В. В. Пацевич, В. Д. Эськов. Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», № 4, 52, 1967.
8. N. J. Felici, E. Gartner. Rev. Gén. Electr., **62**, № 2/ №3, 1953.
9. А. М. Купцов, В. В. Пацевич. Изв. ТПИ, 191, 75, 1968.
10. Б. Н. Канонькин. ЖТФ, 9, № 10, 1939.
11. А. В. Дмитриев. ЖТФ, 33, № 9, 1963.
12. А. М. Купцов, В. В. Пацевич. «Электричество», № 7, 1968.
13. N. J. Felici. Франц. пат. № 1430401 от 24.01.66 и № 1431070 от 31.01.66.
14. «Electr. Rev.», **164**, N 5, 159, 1969.