_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ____ ТЕХНИКА ____

УДК 621.31+533.9.07

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОЙ ГАЗОВОЙ ИНЖЕКЦИИ НА ГАШЕНИЕ МОЩНОЙ ДУГИ

© 2022 г. А. В. Будин^{*a*}, А. А. Богомаз^{*a*}, М. Э. Пинчук^{*a*,*}

^а Институт электрофизики и электроэнергетики РАН Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18 *e-mail: pinchme@mail.ru Поступила в редакцию 05.11.2021 г. После доработки 26.11.2021 г. Принята к публикации 28.11.2021 г.

Представлено описание экспериментального стенда для исследования воздействия синхронной газовой инжекции на гашение мощной дуги, приведены некоторые полученные на нем результаты. В состав стенда входят электроразрядная экспериментальная установка, позволяющая моделировать процесс впрыска холодного газа высокого давления в область горения дуги в заданный момент времени, конденсаторная батарея емкостью 38 мФ, а также различные системы измерений и диагностики. Эксперименты проводились с дугами с амплитудой тока 3–25 кА при длительности полупериода тока 10 мс и зарядном напряжении батареи 0.8–4.5 кВ.

DOI: 10.31857/S0032816222020112

1. ВВЕДЕНИЕ

Увеличивающаяся сложность энергетических систем при одновременном повышении требований к их безопасности и экологичности требует непрерывного развития конструкций и принципов построения отключающих защитных устройств [1, 2]. Компонентами, обеспечивающими защиту линий передачи электрической энергии от грозовых и коммутационных перенапряжений, являются системы грозозащитных тросов, газовые разрядники и нелинейные ограничители перенапряжения [3–5].

В настоящее время производятся и широко используются коммерческие защитные устройства мультикамерные разрядники, работа которых основана на пробое серии последовательных газовых зазоров между электродами в открытых в атмосферу разрядных камерах [5, 6]. Такие разрядники при прохождении сильного тока испытывают критический уровень нагрузок с большим износом элементов конструкции [7–11]. Для уменьшения износа и повышения отключающей способности простую конструкцию разрядников различным образом модифицируют [5, 6, 10, 12, 13] для минимизации времени горения дуги и предотвращения повторного пробоя после нуля тока. В частности, добавление вблизи электродов дополнительных газовых объемов приводит к улучшению

отключающей способности таких разрядников [14]. Предполагается, что поток газа из этих объемов после прохождения импульса тока обеспечивает дополнительное охлаждение остаточного канала [15].

Развитие данного способа повышения отключающей способности защитных разрядников может быть сопряжено с использованием метода синхронной газовой инжекции (с.г.и.) в мощных выключателях тока [16, 17], т.е. с впрыском холодного газа в область горения дуги в период прохождения тока через ноль. При импульсном впрыске в строго определенный момент времени [18] холодный газ, взаимодействуя с остаточным следом плазмы, поглощает энергию дуги, выделяемую в межконтактном промежутке, способствует деформации дуг отключения, повышает турбулизацию потока и ускоряет процесс деионизации и восстановления электрической прочности между дугогасительными контактами.

Описанный ниже экспериментальный стенд предназначен для исследования эффективности дугогашения с помощью с.г.и. и определения оптимальных параметров воздействия на дугу. Стенд построен на основе существующей инфраструктуры стендов для испытания молниезащитных устройств [19] и мощных коммутаторов тока [20–22].



Рис. 1. Схема испытательного стенда. C_1 – конденсаторная батарея; X_1 – токовый коллектор; L_1 – индуктивный реактор; R_1 – C_2 – схема формирования переходного восстанавливающегося напряжения; Q_1 – нагрузка; K_1 – воздушный разрядник (тригатрон); F_1 – проволочка; K_2 – тиристорный ключ; C_3 – конденсаторная батарея для взрыва проволочки.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для исследования дугогасительных процессов включает в себя разрядную камеру, рассчитанную на токи амплитудой до 500 кА и импульсное давление до 10 МПа, разрядный контур и систему газоподачи, обеспечивающую впрыск холодного газа в камеру в заданное время. Электрическая схема стенда показана на рис. 1. Основной разрядный контур состоит из конденсаторной батареи C_1 емкостью 38 м Φ , индуктивности L_1 250 мкГн и схемы $R_1 - C_2$ формирования переходного восстанавливающегося напряжения. При таких значениях емкости и индуктивности длительность первого полупериода тока составляет 10 мс, т.е. моделируется промышленная частота 50 Гц. Батарея С1 соединена с остальными элементами комплекса через токовый коллектор X_1 . Она коммутируется на нагрузку Q_1 при помощи двух воздушных разрядников (тригатронов) K₁. Параметры разрядной цепи рассчитаны так, чтобы удовлетворить требованиям, предъявляемым к испытаниям выключающих аппаратов переменного тока [23, 24].

На рис. 2 представлена общая схема разрядной камеры, а на рис. 3 – разрядная камера на испытательном стенде. Корпус разрядной камеры (1 на рис. 2) выполнен из нержавеющей стали, внутри камеры находится подвижный поршень 2 из полиацетали, который позволяет моделировать расхождение контактов. К поршню крепится держатель электродов 3, который соединен с земляной шиной при помощи гибких медных проводов, проложенных в поликарбонатовой трубке 5, проходящей через поршень. На противоположный конец держателя электродов навинчен стрежневой электрод 4. Второй электрод 6 имеет форму кольца и крепится на токовводе 7, изолированном от корпуса камеры. К токовводу подключена

шина высокого напряжения. Токоввод полый, с внутренним диаметром 25 мм, через отверстие в токовводе газ, нагретый дугой, истекает из камеры. Стержневой электрод изготовлен из псевдосплава МВД (50% Мо, 40% W, 10% Си), кольцевой электрод — из МВД или меди.

Перпендикулярно оси камеры расположены два диагностических окна, через которые может проводиться высокоскоростная съемка. В корпусе камеры также имеется отверстие для измерения импульсного давления в разрядном объеме.

Система газоподачи включает в себя 50-литровый баллон со сжатым газом (азот, воздух), который при помощи гальванически развязанной от установки газовой магистрали соединен с литровым объемом 8 для впрыска газа. Между литровым баллоном и разрядной камерой размещен диафрагменный узел 9, изготовленный из ударопрочного поликарбоната. Лиафрагма 10 составлена из 2–4 слоев лавсановой пленки толщиной 75 мкм. Давление разрыва диафрагмы из одного слоя пленки составляет примерно 1.2 МПа, из 4-х слоев – примерно 4.8 МПа. Между слоями пленки проложена медная проволочка (11 на рис. 2 и F_1 на рис. 1), подключенная к схеме поджига, которая может запускаться с регулируемой задержкой. Взрыв проволочки вызывает разрыв диафрагмы, что позволяет обеспечить нужный момент впрыска газа в камеру. Продув газа из объема 8 через разрядную камеру осуществляется через трубку 12 с внутренним диаметром 12 мм на выходе из диафрагменного узла; ее конец расположен между электродами на расстоянии примерно 3 см от оси камеры.

Электрическая схема поджига проволочки в диафрагменном узле показана на общей схеме на рис. 1. Взрыв проволочки F_1 происходит при разряде конденсатора C_3 через тиристорный ключ K_2 . Времена начала разряда основного контура и



Рис. 2. Разрядная камера. *1* – корпус разрядной камеры; *2* – подвижный поршень; *3* – держатель электродов; *4* – стержневой электрод; *5* – трубка с токопроводом; *6* – кольцевой электрод; *7* – токоввод; *8* – газовый объем; *9* – диафрагменный узел; *10* – диафрагма; *11* – взрывающаяся проволочка; *12* – газовое сопло.

взрыва проволочки в диафрагменном узле задавались синхроимпульсами *sync1* и *sync2* с генератора задержанных импульсов.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Описание методов диагностики и системы измерений, реализованных на стенде и использовавшихся при проведении экспериментов, представлено в работе [21]. Разрядный ток измеряли поясом Роговского. Для измерения падения напряжения на дуге использовались два высокоомных резистивных делителя 1:1000 с емкостной развязкой. Первый подключался к токовводу (7 на рис. 2), а второй – к месту соединения идущих от держателя электродов 3 гибких медных проводов с токоведущей земляной шиной. Величина падения напряжения на дуге определялась как разность между сигналами делителей. Для регистрации импульсного давления в разрядной камере использовался пьезоэлектрический датчик мембранного типа Т-500 (ФКП НИИМ, Нижний Тагил, Россия). В проведенных экспериментах межэлектродное расстояние составляло 2.5 см, разрядный объем был примерно равен 0.5 дм³. Разряд инициировался при помощи медной проволочки диаметром 0.3 мм, соединяющей в начальный момент электроды. Кольцевой электрод в начальный момент при инициировании дуги служил анодом.

Эксперименты на установке проводились следующим образом. В баллон 8 закачивался газ до давления 3 МПа. Затем конденсаторная батарея заряжалась до необходимого напряжения, и осуществлялся запуск тригатронов, регистрирующей аппаратуры и, с необходимой задержкой, схемы разрыва диафрагм.

Давление в объеме 8 выбиралось на основе оценочных расчетов [18], которые показали, что для эффективного локального охлаждения канала разряда на нашей установке необходимо, чтобы впрыск холодного газа в область горения дуги начинался за 2-3 мс до прохождения тока через ноль, а давление на срезе инжекционной трубки превышало давление в разрядном объеме не менее чем в два раза. Согласно данным отладочных экспериментов, при зарядном напряжении батареи 1.5–2.5 кВ в указанный промежуток времени давление в разрядной камере составляет 0.5–1 МПа. Таким образом, при начальном давлении в инжекторном объеме примерно 3 МПа указанное выше условие должно выполняться.



Рис. 3. Разрядная камера на испытательном стенде.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 4 представлены осциллограммы падения напряжения на разрядном промежутке и тока в цепи при зарядном напряжении батареи 2 кВ, а на рис. 5 показаны соответствующие сигналы давления в разрядной камере при формировании с.г.и. на 6-й, 8-й и 10-й миллисекунде от начала тока (т.е. за 4 и 2 мс до и в момент перехода тока через ноль). При подаче холодного газа в разрядный промежуток регистрировались соответствующее повышение давления в разрядной камере и синхронный с ним рост падения напряжения на дуге.

Действие с.г.и. на область горения дуги длится ~1.5-2 мс. После разрыва диафрагмы за время ~300 мкс формируется квазистационарная сверхзвуковая газовая струя, продувающая область разрядного канала в течение ~1.5 мс до соответствующего снижения давления в литровом объеме. Теневые изображения формирования струи после разрыва диафрагмы показаны на рис. 6.

Процесс деформации и гашения дуги под действием с.г.и. при газовой инжекции начиная с 8 мс от начала разряда показан на скоростных фотографиях на рис. 7, которые соответствуют эксперименту, показанному на рис. 4 и 5 семейством кривых 2.

При слишком ранней и поздней организации газового дутья происходит повторное зажигание дуги после прохождения нуля тока. На рис. 4 на кривой *3* присутствует обратная полуволна тока, что свидетельствует о повторном зажигании дуги при поздней организации газового дутья с 10-й миллисекунды. При оптимальном выборе време-



Рис. 4. Разрядный ток и напряжение на разрядном промежутке при начале газовой инжекции начиная с: 6-й (1), 8-й (2), 10-й миллисекунды (3).



Рис. 5. Давление в разрядной камере при начале газовой инжекции начиная с: 6-й (*1*), 8-й (*2*), 10-й миллисекунды (*3*). Ток и напряжение показаны на рис. 4.

ни с.г.и. происходит гашение дуги, и на осциллограмме отсутствует обратная полуволна тока.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана экспериментальная установка для моделирования и исследования воздействия с.г.и. на гашение мощной дуги в защитных выключающих устройствах. Параметры экспериментов были близки к характерным для газоразрядных молниезащитных устройств. Предварительные результаты, полученные на установке, показали, что использование с.г.и. повышает отключающую способность таких устройств. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию реализации метода с.г.и. с целью повышения от-



Рис. 6. Теневые фотографии формирования струи холодного газа в разрядной камере после разрыва диафрагмы: *1* – кольцевой электрод, *2* – стержневой электрод, *3* – торец газового сопла. Стрелками показаны скачки плотности на фронте и границе импульсной струи. Время между кадрами 100 мкс.



Рис. 7. Скоростные изображения (\mathbf{a} – \mathbf{r}) воздействия струи холодного газа на дугу при газовой инжекции начиная с 8-й миллисекунды при времени между кадрами 400 мкс: 1 – кольцевой электрод, 2 – стержневой электрод, 3 – торец газового сопла. Время первого кадра соответствует 8-й миллисекунде эксперимента, представленного семейством кривых 2 на рис. 4 и 5.

ключающей способности и адаптацию метода к технически и экономически оправданному использованию в реальных защитных устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. European Commission. Energy. Roadmap 2050. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.
- Чубраева Л.И., Ронжин Ан.Л., Шишлаков А.В., Ронжин Ал.Л., Шишлаков В.Ф. // Труды СПИИРАН. 2014. № 2 (33). С. 207.
- Александров Г.Н. Молния и молниезащита / Под ред. В.Н. Козлова. М.: Наука, 2008.
- Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines. Working group CIGRE C4.301. 2010. Electra-CIGRE Report № 440.

- Lightning Interaction with Power Systems: Fundamentals and Modelling. V. 1. Energy Engineering / Ed. by A. Piantini. Croydon: Institution of Engineering and Technology, 2020.
- 6. Подпоркин Г.В. Молниезащита воздушных линий электропередачи. СПб.: Родная Ладога, 2015.
- 7. *Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Рутберг Ф.Г. //* Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 23. С. 49.
- Пинчук М.Э., Будин А.В., Кумкова И.И., Чусов А.Н. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 8. С. 10.
- Pinchuk M.E., Budin A.V., Kumkova I.I., Bogomaz A.A., Sivaev A.D., Chusov A.N., Zaynalov R.I. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 774. № 1. P. 012187. https://doi.org/10.1088/1742-6596/774/1/012187

2022

№ 2

- 10. Jia W., Sima W., Yuan T., Yang M., Sun P. // Energies. 2018. V. 11. № 12. P. 3335. https://doi.org/10.3390/en11123335
- 11. *Runge T., Kopp T.H., Kurrat M.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. V. 46. № 8. P. 2935. https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2850364
- Liu Y., Wu G., Liu K., Guo Y., Zhang X., Shi C. // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 90035. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994249
- 13. *Sima W., Jia W., Yuan T., Yang M., Cheng H., Zuo S. //* Physics of Plasmas. 2021. V. 28. № 6. P. 63510. https://doi.org/10.1063/5.0040134
- Chusov A., Rodikova E., Murmann M., Nordborg H., Fuchs R. // Plasma Physics and Technology Journal. 2017. V. 4. P. 273. https://doi.org/10.14311/ppt.2017.3.273
- 15. Подпоркин Г.В. Частное сообщение. НПО ОАО "Стример" (www.streamer.ru).
- 16. Briggs A., King L. // IEE Conf. Dev in Design and Performance. London, 1979. P. 52.
- Briggs A. // Proc. of the 7th International Conference on Gas Discharges and their Applications. London, 1982. P. 28.

- Kurakina N.K., Frolov V.Y., Tonkonogov E.N. // Plasma Physics and Technology. 2019. V. 6. № 2. P. 3. https://doi.org/10.14311/ppt.2019.1.43
- Будин А.В., Пинчук М.Э., Пильщиков В.Е., Лекс А.Г., Леонтьев В.В. // ПТЭ. 2016. № 5. С. 55. https://doi.org/10.7868/S0032816216040200
- Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Леонтьев В.В., Куракина Н.К. // ПТЭ. 2017. № 6. С. 61. https://doi.org/10.7868/S0032816217060039
- Budin A.V., Pinchuk M.E., Leontev V.V., Leks A.G., Kurakina N.K., Kiselev A.A., Simakova J.V., Frolov V.Y. // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc. FSO 2017 (Nové Město na Moravě, Czech Republic, 2017). 2017. P. 120. https://doi.org/10.14311/ppt.2017.2.120

 Pinchuk M.E., Budin A.V., Kurakina N.K., Leks A.G. // 23rd Symposium on Physics of Switching Arc 2019. FSO 2019 (Nové Město na Moravě, Czech Republic, 2019). 2019. P. 227.

https://doi.org/10.14311/ppt.2019.3.227

- 23. ГОСТ16357-83. Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3.8 до 600 кВ. М.: Стандартинформ, 1983.
- 24. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. М.: Стандарт-информ, 2006.