УДК 621.311.17

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ РАЗРЯДНИКА ДЛЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 6-35 КВ ПРИ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Р.А.БЕЛЬСКИЙ¹, В.Я.ФРОЛОВ¹, Г.В.ПОДПОРКИН²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² АО «НПО «Стример», Санкт-Петербург, Россия

Наиболее распространенным устройством для защиты от перенапряжений является вентильный разрядник. Из-за морального устаревания предлагается заменить вентильные разрядники на нелинейные ограничители перенапряжений или мультикамерные разрядники. Современные рекомендации по выбору средств для защиты от перенапряжений учитывают не все факторы при размещении устройств защиты. Например, при замене вентильных разрядников на нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) нередко происходят аварии. Часто из-за замены защитных устройств возникают нарушения условий эксплуатации новых приборов, поскольку при проекте ОПН устанавливаются на место вентильных разрядников. Нелинейные ограничители перенапряжений имеют ряд проблем, связанных с надежностью, например, из-за частых однофазных замыканий на землю возникают проблемы с термической нестабильностью. Поэтому в качестве альтернативы ОПН в городских распределительных сетях предлагается использовать мультикамерные разрядники – устройства, представляющие собой ряд разрядных камер в силиконовой резине. Цель данной работы – вычисление напряженности электрического поля и проводимости на выходе из разрядной камеры мультикамерного разрядника, исследование воздействия мультикамерных разрядников на распределительные сети, построение зависимости от напряжения и проводимости выхлопных газов плазмы в зависимости от расстояния до мультикамерного разрядника.

Ключевые слова: мультикамерный разрядник; защита от перенапряжения; электрической пробой; распространение плазмы; городские распределительные сети

Как цитировать эту статью: Бельский Р.А. Электрическая прочность разрядника для молниезащиты линий 6-35 кВ при грозовых перенапряжениях / Р.А.Бельский, В.Я.Фролов, Г.В.Подпоркин // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 401-406. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.401

Введение. Надежность высоковольтного оборудования – один из факторов нормальной работы приемников городских распределительных сетей 6-35 кВ. В связи с плотностью застройки и большим количеством компаний, занимающихся проектированием сетей, электросети, находящиеся рядом, могут иметь индивидуальные проекты – с различным материалом в жилах кабелей, различным сечением, со своей изоляцией, а также защитными аппаратами, отличающимися не только номинальными характеристиками, но и типом исполнения дугогашения [5, 8].

В настоящее время для защиты от перенапряжений в городских распределительных сетях используются вентильные разрядники, от которых необходимо отказаться по следующим причинам [4]:

- промышленность приостанавливает выпуск разрядников по ГОСТ 16357-83;
- большая металлоемкость приводит к удорожанию защитных аппаратов, а также увеличению массы и габаритов защитного устройства;
- низкий по сравнению с современными средствами срок службы в пределах 25 лет, в то время как для нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) срок службы 30 лет;
- вентильные разрядники не всегда обеспечивают необходимые технико-экономические показатели;
- вольтамперная характеристика у вентильных разрядников за 20 лет эксплуатации поднимается на 10-15 %.

Вентильные разрядники еще используются во многих распределительных сетях, поэтому их повсеместная замена на нелинейные ограничители перенапряжений могут вызвать серьезные проектные и строительные расходы. Необходим пересмотр нормативной документации, касающейся устройств для защиты от перенапряжений. Для замены вентильных разрядников предполагается использование ОПН, но при работе ОПН в городских распределительных сетях есть ряд проблем.

Постановка проблемы. В качестве альтернативы ОПН в городских распределительных сетях предлагается использование мультикамерных разрядников (МКС) [3, 10, 13]. Эти устройства представляют собой многокамерные разрядники со стержневыми или трубчатыми электродами, помещенными в силиконовую резину. Принцип их работы: при прохождении волны перенапря-

Рис.1. Мультикамерная система

1 – силиконовая резина; 2 – электрод; 3 – воздушный промежуток;
4 – канал разряда

Рис.2. Экспериментальная установка

Рис.3. Импульс тока 20 кА

жения каждая из камер пробивается, дуга нагревает ячейку, горячий воздух уводит дугу из ячейки, дуга увеличивает длину и со временем разрывается. Мультикамерная система и ее устройство представлены на рис.1.

Мультикамерные разрядники обладают рядом преимуществ:

- отсутствие необходимости в устройствах сброса давления воздуха; высокое давление может образовываться из-за дуги замыкания при прохождении тока во время перенапряжения; чаще всего повышение давления проявляется при однофазных замыканиях на землю;
- взрывобезопасность; одна из проблем эксплуатации ОПН – это разлетающиеся осколки при взрыве во время перенапряжения [14];
- высокая стоимость при установке и эксплуатации;
- варисторы подвержены процессам окисления, что приводит устройство к деградации;
- внешнее загрязнение не влияет на качество работы защитного устройства.

Мультикамерные разрядники показали эффективность при защите от грозовых перенапряжений в высоковольтных распределительных сетях Индонезии и Китая [11, 15].

Одна из проблем при эксплуатации мультиразрядников – это открытое пламя, возникающее при гашении дуги, что может создать проблемы при их использовании внутри помещений, а также невозможность эксплуатации во взрывоопасных средах. Другой проблемой является сопровождающий ток – это ток из сети, который проходит через разрядник во время прохождения импульса перенапряжения.

Методология. Цель экспериментов заключалась в измерении напряженности электрического поля и проводимости плазмы выхлопа на выходе разрядной камеры мультикамерной системы (МКС), а также в построении зависимости напряженности и проводимости плазменного выхлопа от расстояния до мультикамерной системы. Для опыта использовался образец, который представлял собой участок мультикамерной системы, к которой были подключены электро-

ды, отвечающие за электрическую фазу и землю. Значения напряженности и проводимости измерялись с помощью датчика, представляющего собой конденсатор, подключенный к электродам и размещенный перед выхлопной камерой одной из ячеек МКС. Импульс тока 20 кА, моделирующий удар грозового перенапряжения, был создан с помощью генератора импульсных напряжений (ГИН). МКС вместе с датчиком показаны на рис.2. Осциллограмма грозового импульса представлена на рис.3.

Опыт происходил по следующему алгоритму:

- 1) устанавливается разрядный промежуток между электродами, предел промежутка от 1 до 60 мм;

2) заряжается конденсатор, для опытов конденсатор необходимо зарядить от 250 до 500 В;

3) конденсатор с присоединенным к нему разрядным промежутком устанавливается на заданное расстояние; разрядный промежуток должен располагаться перпендикулярно ячейке МКС; необходимо расположить электроды перед ячейкой МКС, чтобы дуга из ячейки МКС прошла между электродами разрядного промежутка;

4) запускается ГИН;

5) измеряется остаточное напряжение на конденсаторе;

6) устанавливается новый разрядный промежуток или новое расстояние до МКС.

Работа МКС при прохождении импульса представлена на рис.4.

Результаты измерений электрической прочности и электропроводности в зависимости от расстояния до МКС представлены на рис.5, 6.

Все измерения производились по следующим формулам [1].

Пробивная напряженность

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d},$$

где $U_{пр}$ – начальное напряжение, В; d – расстояние между электродами, м.

Остаточный заряд

$$Q = \Delta UC,$$

где ΔU – разность между начальным и конечным напряжением, В; C – емкость конденсатора, Ф.

Ток в воздушном промежутке

$$I = \frac{0,7Q}{t_{0,5}},$$

где Q – электрический заряд, Кл; $t_{0,5}$ – время протекания тока до полуспада, с.

Электрическое сопротивление промежутка

$$R_x = \frac{U}{I},$$

где U – значение зарядного напряжения, В; I – электрический ток в промежутке, А.

Проводимость воздушного промежутка

$$\rho_{уд} = \frac{R_x S}{d},$$

где R_x – сопротивление воздушного промежутка, Ом; S – площадь электрода, м²; d – расстояние между электродами, м.

Удельная проводимость

$$\sigma_{уд} = \frac{1}{\rho_{уд}}.$$

Рис. 4. Плазменная струя на внешней стороне МКС

Рис.5. Зависимость электрической прочности плазмы от расстояния до МКС при импульсном токе 20 кА

Рис.6. Зависимость электропроводности плазмы от расстояния до МКС; ток 3 кА, длительность тока 50 мкс

Рис.7. Модель распределительной системы 10 кВ

Рис.8. Модель трехфазного вакуумного выключателя

Результаты. По результатам эксперимента было получено следующее:

- разработана и экспериментально опробована методика измерения электрической прочности и электропроводности плазмы на выходе выхлопной камеры МКС;
- определен диапазон изменения электрической прочности плазмы выхлопа вблизи МКС от 1 до 500 кВ/м, что во много раз меньше электрической прочности воздуха;
- определен диапазон изменения электропроводности плазмы выхлопа вблизи МКС от 0,0001 до 0,3 1/Ом·м, что во много раз больше электропроводности воздуха;
- значения $E_{пр}$ сильно зависят от амплитуды импульсного тока.

Полученные экспериментальные данные будут полезны для анализа физических процессов, протекающих в МКС, при оценке размеров зоны выхлопа, а также при конструировании отдельных элементов разрядника. Отсутствие замыкания дуги во внешней плазме позволит в будущем проектировать более компактные мультикамерные разрядники.

Следующим этапом работы будет проверка влияния МКС на городскую распределительную сеть при возникновении коммутационного перенапряжения. Для этого необходимо создать ее математическую модель. В качестве среды моделирования использована графическая среда имитационного моделирования SIMULINK (рис.7). Была промоделирована распределительная сеть 10 кВ от распределительного пункта до стороны высокого напряжения трансформаторной подстанции. Моделирование осуществлялось с учетом положений работ [2, 6, 7, 9, 12]. Для простоты расчета были учтены только активные сопротивления кабелей, шин на подстанции, контактов выключателей и межконтактных соединений. В качестве источника перенапряжения был выбран вакуумный выключатель на 10 кВ, модель которого представлена на рис.8. Перенапряжение на выключателе было основано на модели Касси, на рис.9 показана реализации модели в среде SIMULINK. Результаты коммутации вакуумного выключателя представлены на рис.10.

При работе сети с МКС можно увидеть заметное снижение волны перенапряжения. МКС был установлен в входе в трансформаторную подстанцию, осциллограмма данного процесса представлена на рис.11.

Полученные расчеты для МКС будут использованы в представленной модели распределительной сети, также будут разработаны рекомендации для размещения мультикамерных разрядников.

Рис.9. Напряжение дуги выключателя по модели Касси

Рис.10. Осциллограмма напряжения и тока на потребителе при коммутации выключателя

Рис.11. Осциллограмма напряжения и тока на потребителе при использовании мультикамерного разрядника

ЛИТЕРАТУРА

1. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники / К.С.Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин. СПб: Питер, 2003. 463 с.
2. Иванов Д.В. Моделирование нестационарных плазменных процессов в разрядной камере мультикамерного разрядника для молниезащиты линий электропередачи / Д.В.Иванов, Г.В.Подпоркин, В.Я.Фролов // Известия НТЦ единой энергетической системы. 2016. № 2(75). С. 128-133.
3. Казаков Ю.Б. Статистический метод оценки энергетической эффективности работы трансформаторов городских сетей / Ю.Б.Казаков, А.В.Коротков, В.Я.Фролов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 5. С. 51-53.
4. Колычев А.В. Современное состояние и перспективы развития производства нелинейных ограничителей перенапряжений / А.В.Колычев, Ю.С.Попова, Ф.Х.Халилов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 5. С. 20-23.
5. Кузьмин С.В. Анализ аварийности в системе электроснабжения 6-10 кВ горно-металлургических предприятий Сибири / С.В.Кузьмин, И.С.Зыков // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 3. С. 23-25.
6. Куликовский В.С. Моделирование коммутационных перенапряжений с учетом повторных зажиганий дуги в межконтактном промежутке вакуумного выключателя / В.С.Куликовский, О.А.Ковалева // Вестник КрасГАУ. 2015. № 2. С. 67-71.
7. Моделирование разряда в мультикамерных системах / А.Н.Чусов, Г.В.Подпоркин, М.Э.Пинчук, Д.В.Иванов, Ю.В.Мурашов, В.Я.Фролов // V Российская конференция по молниезащите: Сборник докладов. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2016. С. 351-357.
8. Подпоркин Г.В. Грозозащита ВЛ 10-35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников / Г.В.Подпоркин, В.Е.Пильщиков, А.Д.Сиваев // Электричество. 2010. № 10. С. 11-16.
9. Расчет состава плазмы дугового импульсного разряда в мультикамерном разряднике / В.Я.Фролов, Д.В.Иванов, Ю.В.Мурашов, А.Д.Сиваев // Письма в Журнал технической физики. 2015. № 7(41). С. 8-15.
10. Численное моделирование плазменных процессов в разрядной камере мультикамерного разрядника для молниезащиты / В.Я.Фролов, А.Н.Чусов, Д.В.Иванов, Ю.В.Мурашов // V Российская конференция по молниезащите: Сборник докладов. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2016. С. 334-337.
11. Erlangga P. Lightning protection system on overhead distribution line using Multi Chamber Arrester / P.Erlangga, H.Syarif, Z.Reynaldo // The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE); IEEE, 2014. P. 197-201. DOI: 10.1109/ICPERE.2014.7067246
12. Laughton M.A. Electrical Engineer's Reference Book / M.A.Laughton, D.F.Warne. Boston: Newnes, 2002. 1504 p.
13. Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters / G.V.Podporkin, E.Y.Enkin, E.S.Kalakutsky, V.E.Pilshikov, A.D.Sivaev // IEEE transactions on power delivery. 2011. № 4 (26). P. 214-221.
14. Sergio R.S. Surge protection for explosion hazard areas: Principles for ex-proof device // International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA); IEEE, 2013. P.365-368, DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729241
15. 1 Year report & results on 10kV multi-chamber arresters field test in Guangdong Province. China / Liu Yu, Li Junhua., He Yifeng, Zeng Rong, Yu Zhanqing, Pierre He // China International Conference on Electricity Distribution (CICED); IEEE, 2016. P. 1-5. DOI: 10.1109/CICED.2016.7576414

Авторы: **Р.А.Бельский**, ассистент, zero19@mail.ru (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), **В.Я.Фролов**, д-р техн. наук, профессор, frolov.eed@gmail.com (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия), **Г.В.Подпоркин**, д-р техн. наук, старший научный сотрудник (АО «НПО «Стример», Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 30.03.2017.

Статья принята к публикации 02.04.2018.