

УДК 537.22

Особенности выбора допустимых напряженностей электрического поля в элегазовой изоляции аппаратов сверхвысокого и ультравысокого напряжения

В. Н. Вариводов

ГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина», Москва, Россия

Рассмотрены вопросы выбора рабочих напряженностей электрического поля в элегазовой изоляции оборудования сверхвысокого и ультравысокого напряжения. На основе проведенного анализа влияния на электрическую прочность элегазовых промежутков таких факторов как площадь электродов, степень обработки их поверхности, присутствие в промежутке металлических и диэлектрических частиц, давление газа даны рекомендации по выбору рабочих напряженностей электрического поля.

Известно, что электрическая прочность элегаза зависит от давления, степени неоднородности электрического поля, площади поверхности электродов и степени их обработки, формы воздействующего напряжения и, в некоторой степени, времени воздействия напряжения [1—3].

Обычно, если не предпринимаются специальные меры по обработке поверхности электродов (например используются диэлектрические покрытия), то в области значений произведения межэлектродного расстояния на давление газа менее чем примерно 10^{-2} МПа·м, зависимость электрической прочности от давления газа и степени неоднородности электрического поля может быть выражена в следующем виде:

$$E_0 = \left(\frac{E}{P}\right)_{кр} P \left[1 + \frac{a}{(Pr_0)^m}\right], \quad (1)$$

где $\left(\frac{E}{P}\right)_{кр}$ — критическая напряженность электрического поля при возникновении разряда $\left(\frac{E}{P}\right)_{кр} = 89$ В/Па·м;

P — давление газа;

a, m — коэффициенты, зависящие от характера изменения напряженности электрического поля в промежутке;

r_0 — радиус кривизны электрода.

Однако при значительном увеличении давления газа, площади электродов и изоляционных промежутков наблюдается отклонение от данных, рассчитанных по указанному соотношению, в сторону уменьшения электрической прочности из-за физических процессов, происходящих вблизи микронеоднородностей поверхности высоковольтных электродов.

В результате в реальных элегазовых аппаратах сверхвысокого и ультравысокого напряжения напряженности электрического поля при возникновении разряда примерно в два раза ниже расчетных значений.

Уровень электрической прочности элегазовой изоляции в слабонеоднородных электрических полях также зависит от формы воздействующего напряжения: при грозových импульсах положительной полярности электрическая прочность максимальна и превышает прочность при статическом воздействии примерно в 1,3—1,5 раз, при отрицательной полярности грозových импульсов — прочность несколько ниже. Коэффициент импульса при коммутационных перенапряжениях существенно ниже, и в области больших площадей токоведущих элементов составляет 1,05—1,1 [3].

Как следствие, в элегазовом оборудовании сверхвысокого напряжения при номинальном напряжении 500 кВ и выше определяющими при выборе газовых изоляционных промежутков, как правило, являются импульсные коммутационные перенапряжения (в отличие от элегазового оборудования на номинальное напряжение 110—330 кВ, где для расчета необходимо использовать нормированные воздействия грозových импульсов).

В результате анализа характеристик различных типовых промежутков в [1] предлагается рассчитывать размеры элегазовых аппаратов на основе пробивного напряжения изоляционного узла «экран—заземленная плоскость»:

$$U = \frac{E d \ln \frac{D}{d}}{2K_{yc}}, \quad (2)$$

где E — напряженность электрического поля при пробое, определяемая по известным графическим зависимостям этой напряженности от площади электродов и давления газа;

D, d — внешний и внутренний диаметры электродной системы, соответственно;

$K_{ус}$ — относительный коэффициент усиления электрического поля на торцевой поверхности экрана, определяемый как отношение максимальной напряженности электрического поля на экране к максимальной напряженности поля на внутреннем цилиндрическом электроде.

Однако при значительном увеличении площади электродов, что характерно для оборудования ультравысокого напряжения, использование зависимостей электрической прочности от площади поверхности электродов практически теряет смысл вследствие их насыщения. Более критичным становится корректное определение нижних предельных значений электрической прочности.

Действительно, например, для подстанции 1150 кВ, в которой используются КРУЭ, только элегазовые шинопроводы имеют длину около 2 км. Это значит, что высоковольтных экранов типа «экран—заземленный корпус» необходимо не менее 300—400. Суммарная «напряженная» площадь электродов в этом случае составит более $3 \cdot 10^5$ см². При такой площади электродов электрическая прочность элегаза действительно достигает минимальных предельных значений и, соответственно, сама зависимость электрической прочности от площади электродов исчезает (рис. 1).



Рис. 1. Зависимость электрической прочности элегаза от «напряженной» площади электродов (50 Гц, плавный подъем напряжения, средние значения):

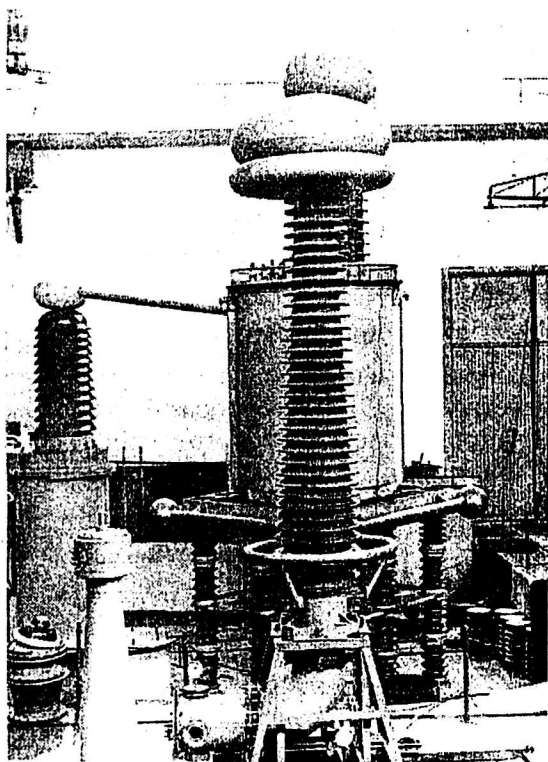
○ — полировка поверхности электродов (эксперимент); □ — шлифовка поверхности электродов (эксперимент)

Были проведены исследования электрической прочности элегаза при кратковременном воздействии напряжения промышленной частоты в системе протяженных коаксиальных электродов, помещенных в герметичную трубу и соединенных с испытательной камерой (рис. 2) при различной степени обработки поверхности электродов, наличии или отсутствии металлических и диэлектрических частиц. Напряжение при пробое изоляции определялось путем плавного подъема напряжения со скоростью около 3 кВ/с, что близко моделирует воздействующие коммутационные перенапряжения.

Полученные данные экспериментальных исследований позволяют оценить минимальные предельные значения электрической прочности при различных давлениях газа:

давление элегаза, МПа	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
нижний предел электрической прочности, кВ/см	48	97	132	166	194	220

Рис. 2. Базовая испытательная камера для проведения исследований элегазовой изоляции сверхвысокого и ультравысокого напряжения



Эти значения электрической прочности были выбраны как минимум из трех полученных из анализа величин электрической прочности: электрической прочности, определенной в результате экстраполяции зависимости электрической прочности от площади электродов в область значений «напряженной площади» около 10^6 см^2 ; минимальных значений функции распределения электрической прочности в «чистом» промежутке с «напряженной» площадью электродов $2 \cdot 10^4 \text{ см}^2$, а также электрической прочности промежутка со специально помещенными металлическими частицами размером не более 300 мкм (после кондиционирования таких промежутков путем 10-кратного приложения напряжения до пробоя).

Следует отметить, что все три значения оказались достаточно близки к друг другу (рис. 3). Данный факт подтверждает существующие представления о том, что снижение электрической прочности элегазовой изоляции при воздействии различных эксплуатационных факторов обусловлено увеличением вероятности появления наиболее опасных металлических микрон неоднородностей.

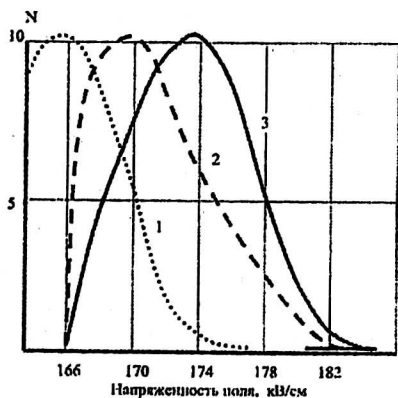


Рис. 3. Функции распределения электрической прочности элегазовой изоляции при различной степени чистоты промежутка («напряженная» площадь, шлифованные электроды, давление элегаза 0,4 МПа):
 1 — промежуток с металлическими частицами (после кондиционирования);
 2 — промежуток с кварцевым песком;
 3 — «чистые» условия

Таким образом, приведенные выше значения электрической прочности являются определяющими для выбора рабочих напряженностей электрического поля в элегазовой изоляции, если «напряженная» площадь электродов превышает примерно 10^5 см² или в процессе эксплуатации велика вероятность появления металлических частиц (например, в результате износа контактов коммутационных аппаратов).

В случае использования не таких многочисленных изоляционных промежутков, как «экран—заземленный корпус», допустимая напряженность поля в элегазе может быть увеличена по сравнению с нижним предельным значением электрической прочности $E_{\text{пр.пред}}^{\text{H}}$. Однако и при этом, как правило, «напряженная» площадь электродов составляет около 10^3 — 10^4 см² и в соответствии с [3] целесообразно использовать для расчета допустимой напряженности электрического поля следующее соотношение с приведенными выше нижними предельными значениями электрической прочности:

$$E_{\text{доп}} = (E_{\text{пр.0}} - E_{\text{пр.пред}}^{\text{H}}) S^{\gamma-1/\beta} [-\ln(1-P)]^{1/\beta} + E_{\text{пр.пред}}^{\text{H}}, \quad (3)$$

- где $E_{\text{пр.0}}$ — электрическая прочность единичного элегазового изоляционного промежутка при вероятности пробоя, равной 0,63;
 S — относительное изменение площади электродов в выбранной конструкции по сравнению с единичным изоляционным промежутком;
 β — мера дисперсии ($\beta = 7,5$ — 9);
 P — вероятность пробоя.

Для определения допустимой электрической прочности межконтактных промежутков коммутационных аппаратов сверхвысокого и ультравысокого напряжения также следует использовать вышеприведенные данные, так как кроме достаточно больших значений площади электродов, для таких изоляционных промежутков весьма вероятно в процессе эксплуатации (из-за механического износа движущихся частей, возникновения дуги между контактами) появление неоднородностей в виде свободных частиц и повреждений электродных поверхностей.

Элегазовая изоляция характеризуется повышенной чувствительностью к микронеоднородностям на поверхности электродов и наличию металлических частиц внутри объема элегазового аппарата. Степень снижения электрической прочности зависит от геометрических параметров неоднородностей и давления элегаза.

Проведенные исследования [4] показывают, что микронеоднородности на поверхности электродов практически не влияют на электрическую прочность элегазовой изоляции, если произведение максимальной высоты микровыступов на давление элегаза не превышает примерно 5 Па·м.

Таким образом, для реальных элегазовых аппаратов, где давление составляет 0,3—0,6 МПа, предельная высота микровыступов составляет около 10—20 мкм. Это позволяет сформулировать основное требование к подготовке изоляционных элегазовых промежутков: степень обработки поверхности электродов и очистки внутреннего объема элегазовых аппаратов должна исключать появление фиксированных или свободных металлических неоднородностей размером более 10—20 мкм. Как было показано выше, практически такие же требования предъявляются к параметрам неоднородностей и на поверхности полимерных изоляторов.

Если требования по чистоте промежутков не выполняются, то следует применять в качестве расчетных значения рабочих напряженностей электрического поля, представленные выше, даже при относительно небольших площадях электродов.

Диэлектрические частицы (такие как, например, кварцевый песок) практически не влияют на электрическую прочность элегазовой изоляции — снижение электрической прочности в этом случае находится практически в пределах разброса экспериментальных данных [2].

Среди важнейших перспективных направлений повышения качества элегазовой изоляции необходимо отметить применение изоляционных покрытий поверхности электродов [4], так как в этом случае значительно нейтрализуется отрицательная роль микронеоднородностей на поверхности электродов. В качестве материала изоляционных покрытий для исключения возможности их повреждения в процессе длительной эксплуатации должны использоваться полимеры, обладающие хорошей адгезией к электродам.

Изоляционные покрытия электродов позволяют значительно увеличить электрическую прочность элегазовой изоляции. Однако широкому применению изоляционных покрытий препятствует сложность надежного обеспечения высокой адгезии материала покрытий и металлических экранов, учитывая их значительные размеры [4].

Литература

1. Бортник И. М., Борин В. Н. Электрическая прочность элегазовой изоляции аппаратов сверхвысокого напряжения// Электричество. 1981, № 3.
2. Бортник И. М., Вариводов В. Н., Панов А. А., Горюнов Б. А. Влияние различных факторов на характеристики зажигания разряда в элегазе// НТС. Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974. Вып. 8(40). С. 3—6.
3. Вариводов В. Н., Демкин А. А., Лисичкин А. С., Панов А. А. Шинопровод с элегазовой изоляцией на ультравысокие классы напряжения// Электрооборудование высокого напряжения и вентильные разрядники: Тр./ВЭИ, 1982. Вып. 91. С. 46—50.
4. Бортник И. М., Борин В. Н., Вертиков В. П., Вариводов В. Н., Иерусалимов М., Ильенков О. С., Кузьмина Е. Г. Оценка требований к состоянию поверхности электродов в элегазовой изоляции// Электричество. — М.: Энергоатомиздат, 1985. № 10. С. 54—56.

The features of permitted electrical field stresses in SF₆ insulation of ehv and uhv apparatus

V. N. Varivodov

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

In the article the aspects of operating electrical field stresses in SF₆ insulation of extra and ultra high voltage equipment are considered. On the base of carried analysis of affect of such factors as electrode area, quality of electrode surface treatment, existence of metal or dielectric particles in the gap, gas pressure on electrical strength — the recommendations on operating electrical stresses choice were given.