

Количественная оценка уменьшения эрозионного износа контактов в вакууме при синхронном отключении

А. А. Гилёв, В. С. Миронов

Севастопольский национальный технический университет, Украина vovamir@gmail.com

Приведено аналитическое выражение зависимости коэффициента снижения эрозионного износа контактов вакуумных дугогасительных камер при синхронной коммутации от времени упреждения разведения контактов относительно нуля отключаемого тока и его действующего значения.

Ключевые слова: дуга в вакууме, эрозионный износ контактов, синхронная коммутация.

Введение

В настоящее время в промышленности и на транспорте широкое применение получили вакуумные выключатели, в которых гашение дуги происходит внутри вакуумной камеры с вакуумом порядка 10^{-2} — 10^{-5} Па (рис. 1). Контакты камеры изготавливаются из композиции Cu—Сг в различных пропорциях. Износ контактов внутри вакуумной камеры определяется в основном электрической эрозией их поверхностей под действием протекающего там дугового разряда. При этом износ из-за механического многократного срабатывания обесточенного выключателя незначителен.

Большой коммутационный ресурс является одним из основных достоинств вакуумных выключателей. Это обусловлено тем, что в вакууме при коммутациях тока не образуются оксиды и другие химические соединения материалов контактов, а энергия, выделяемая в вакуумной дуге, мала и определяется при фиксированном токе падением напряжения на дуге. При номинальных токах это падение не превышает нескольких десятков вольт, а при токах короткого замыкания — нескольких сотен вольт.

Потеря материала с поверхности разрывных контактов происходит по трем причинам:

из-за образования и последующего разрыва жидких контактных слоёв, в результате чего с поверхности контактов уносятся капли расплавленного металла;

из-за эмиссии паров металла из горячих катодных пятен с последующей конденсацией этих паров на противоположном контакте и защитных экранах; из-за пленок расплавленного металла, которые могут образовываться под действием сильноточного дугового разряда на поверхности контактов и привести к формированию капель, срываемых с контактов магнито-гидродинамическими силами.

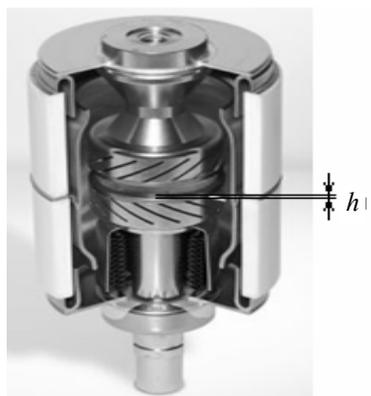


Рис. 1. Вакуумная дугогасительная камера: h — расстояние между контактами.

Допустимый износ серийно выпускаемых вакуумных камер составляет 3—5 мм. В номинальных режимах работы этот износ наступает после $(25—50) \cdot 10^3$ циклов срабатывания, что является высоким показателем для такого рода коммутационных устройств. При граничных режимах этот показатель падает на 3 порядка. Для уменьшения эрозионного износа контактов в тяжёлых и граничных режимах предлагается синхронное отключение коммутационных токов, то есть разведение контактов непосредственно перед переходом тока через нуль. При этом разогрев поверхности контакта уменьшается, а вместе с этим снижается его износ. Этот эффект зависит от времени упреждения разведения контактов и величины тока, проходящего через контакты.

Предмет и методы исследования

Коммутационный ресурс вакуумных выключателей определяется их главным элементом — вакуумной дугогасительной камерой (ВДК). К числу основных критериев годности при испытании вакуумных выключателей на ресурс при коммутационной стойкости относится износ контактов ВДК [1]. Износ (электрическая эрозия) контактов зависит от свойств вакуумной дуги (ВД), на которые, в свою очередь, влияют коммутируемый ток и следующие конструктивные факторы [2]: материал контактов, конфигурация и размер контактных систем, расстояние между контактами, скорость хода подвижного контакта при включении и отключении тока.

Износ контактов можно определить двумя способами: по провалу контактов и по уменьшению массы контактов. Для вакуумных дугогасительных камер предпочтительнее первый способ, хотя они функционально связаны друг с другом. Для большинства серийно выпускаемых вакуумных камер допустимая величина провала контактов составляет 3—4 мм.

По первому способу обширное исследование было проведено Броном. Он установил следующие положения.

1. Износ контактов пропорционален числу их срабатываний.
2. При наличии магнитного дутья износ контактов зависит от напряженности магнитного поля.
3. Износ контактов обратно пропорционален их площади.
4. Износ контактов пропорционален току, а не квадрату тока, как можно было бы ожидать. Износ больше при включении вследствие вибрации и повторных зажиганий дуги.

Постановка задачи

В серийно выпускаемых выключателях момент начала расхождения контактов относительно нуля коммутируемого тока является случайной величиной, подчиняющейся равномерному закону распределения. Среднее значение времени горения дуги t_{cp} при $f = 50$ Гц будет составлять 5 мс при допущении отсутствия её повторного зажигания. В синхронных выключателях этот момент строго фиксирован и составляет 0,5—3 мс. Этот интервал времени обозначается Δt , а его величина будет всегда меньше t_{cp} . Таким образом, статистически при синхронном отключении термическое воздействие дуги на контакты камеры всегда меньше, чем при обычном отключении.

За счет сокращения энергии дуги и энергии, выделяемой на электродах, примерно в той же степени уменьшается изнашиваемость контактов аппарата.

Энергия дуги может быть оценена по формуле

$$A_{д} = \int_0^{\tau} U_{д} i dt,$$

где $U_{д}$ — напряжение на дуге; i — мгновенное значение тока в цепи. Для упрощения анализа количественной стороны можно принять $U_{д} = \text{const}$, то есть равным некоторому среднему постоянному значению. Это допущение особенно справедливо, когда время полного расхождения контактов малó по сравнению со временем горения дуги. В таком случае энергию дуги при синусоидальном токе можно представить следующим образом:

$$A_{д} = \frac{U_{д} I_{м}}{\omega} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{д} I_{м}}{\omega} (\cos \omega t_2 - \cos \omega t_1),$$

где $I_{м}$ — амплитуда тока короткого замыкания; ω — угловая частота тока.

Если время горения дуги в выключателе составляет один полупериод, то можно положить $\omega t_1 = 0$ и $\omega t_2 = \pi$ и, следовательно,

$$A_{д} = \frac{U_{д} I_{м}}{\omega} 2.$$

При времени упреждения Δt синхронного выключателя, равном 2 мс, получим соответственно $\omega t_1 = 0,8\pi$ и $\omega t_2 = \pi$. Энергия дуги станет равной

$$A_{д} = \frac{U_{д} I_{м}}{\omega} (-0,809 + 1) = A_{д} = \frac{U_{д} I_{м}}{\omega} 0,191.$$

Таким образом, при времени горения дуги, равном 2 мс, её энергия будет составлять 9,5% энергии дуги за полупериод. Данный пример справедлив лишь для случая расхождения контактов

в нуле коммутируемого тока. Поскольку реальный момент отключения является случайной величиной, распределённой по равномерному закону и лежащей в пределах $0 \leq t_{\text{откл}} \leq \pi$, процент энергии дуги при синхронном отключении будет вдвое большим и составит 19% от энергии дуги при обычном размыкании контактов.

В действительности, величина энергии дуги составит в синхронном случае несколько меньший процент из-за того, что напряжение на дуге в течение времени Δt будет продолжать нарастать и его средняя величина окажется меньше $U_{\text{д}}$. В результате при всех прочих равных условиях в таком быстродействующем синхронизированном выключателе износ контактов может быть уменьшен в 10—50 раз по сравнению с несинхронизированным, а следовательно, примерно во столько же раз может быть повышен коммутационный ресурс дугогасительной камеры и всего аппарата в целом.

Цель данной работы — выбор методики численной оценки увеличения коммутационного ресурса при синхронном отключении по сравнению с несинхронным.

Материалы исследования

В работе [3] в качестве обобщенного показателя эрозионного износа контактов используют удельный износ контактов

$$\alpha = \frac{\Delta h_{\text{доп}} \cdot S \rho}{IN_{\text{ном}}},$$

где α — удельный износ контактов; г/кА·цикл ВО; $\Delta h_{\text{доп}}$ — предельно допустимое значение линейного износа контактов ВДК, см; S — площадь поверхности контактирования, см²; ρ — плотность контактного материала, г/см³; I — действующее значение тока, при котором проводилось отключение, кА; $N_{\text{ном}}$ — номинальный коммутационный ресурс камеры, число циклов включения-отключения.

Средняя скорость хода подвижного контакта камеры серийно выпускаемых выключателей при включениях и отключениях составляет 0,6—0,9 и 1,4—2 м/с соответственно. Ход контактов составляет 4—14 мм в зависимости от типа камеры. Испытаниями установлено, что в случае вибраций или отброса контактов, когда дуга в вакууме горит при малых расстояниях между контактами, износ возрастает в несколько раз. Сопоставление износа контактов при номинальных токах отключения в операциях включения и отключения показало их незначительное отличие. Для всех типов камер с одинаковым контактным материалом удельный износ контактов α (г/кА·цикл ВО) оказывается индифферентным относительно их диаметра.

В современных вакуумных дугогасительных камерах используются хромомедные контакты с плотностью либо 8 г/см³ (50Cu50Cr) либо 8,3 г/см³ (30Cu70Cr). Такая композиция позволяет решить две задачи:

- обеспечить долговечность работы контактов при высоких температурах горения дуги;
- обеспечить мягкую эмиссионную характеристику контактов при их разведении для исключения больших величин токов среза.

Исследователями получена экспериментальная зависимость α , которая представлена на рис. 2.

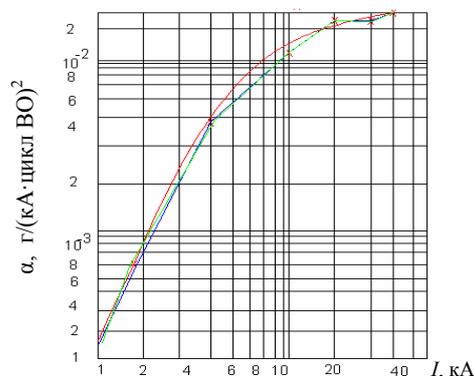


Рис. 2. Зависимость удельного износа α хромомедных контактов от тока в вакуумной дугогасительной камере.

Данная зависимость описывается следующим полиномом:

$$\alpha(I) = 0,030 + 0,232I^2 - 0,010I^3 + 6,003 \cdot 10^{-6}I^5 - 7,266 \cdot 10^{-8}I^6 \quad (1)$$

и справедлива для диапазона токов $5 \leq I \leq 40$ кА.

В практических расчётах разрядность коэффициентов можно уменьшить. Для токов до 5 кА зависимость $\alpha = f(I)$ имеет степенной характер и аппроксимируется формулой

$$\alpha = 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot I^{2,3}. \quad (2)$$

Коммутационный ресурс вакуумной камеры выражается формулой

$$N_{\text{н}} = \frac{\Delta h_{\text{доп}} \cdot S \rho}{\alpha \cdot I}, \quad (3)$$

где $N_{\text{н}}$ — коммутационный ресурс несинхронного выключателя.

Для исключения величин S , ρ , $\Delta h_{\text{доп}}$ будем оценивать увеличение ресурса выключателя при синхронном отключении относительным коэффициентом роста ресурса k [4]:

$$k = \frac{N_{\text{синхр}}}{N_{\text{н}}},$$

где $N_{\text{синхр}}$ — коммутационный ресурс выключателя при синхронном отключении. Раскрывая значения переменных, получим выражение для k

$$k = \frac{\Delta h_{\text{доп}} \cdot S \rho \alpha(I_{\text{н}}) I_{\text{н}}}{\alpha(I_{\text{синхр}}) I_{\text{синхр}} \Delta h_{\text{доп}} \cdot S \rho} = \frac{\alpha(I_{\text{н}}) I_{\text{н}}}{\alpha(I_{\text{синхр}}) I_{\text{синхр}}}.$$

Здесь $\alpha(I_{\text{синхр}})$ и $\alpha(I_{\text{н}})$ — удельный износ контактов, вычисленный при синхронном и несинхронном отключении токов. При заданной величине упреждения синхронного выключателя Ψ эти токи связаны соотношением $I_{\text{синхр}} = I_{\text{н}} \sin \Psi$. Тогда формула для k упростится и примет вид

$$k = \frac{\alpha(I_{\text{н}})}{\alpha(I_{\text{синхр}}) \cdot \sin \Psi}.$$

Значения α в зависимости от величины коммутируемых токов вычисляются по формулам (1) или (2). При больших токах износ контактов по мере увеличения тока замедляется.

Выводы

Количественная оценка увеличения коммутационного ресурса вакуумных камер может быть с достаточной для практики точностью вычислена по формулам для относительного коэффициента роста.

Износ контактов вакуумных камер можно уменьшить, существенно снизив вибрацию и отскок контактов при операции замыкания.

Увеличение скорости подвижных частей выключателя уменьшает износ контактов при операции размыкания.

1. Ромочкин Ю. Г., Лукацкая И. А. Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер с аксиальным магнитным полем // Электротехника. — 2005. — № 2. — С. 9—15.
2. Лукацкая И. А. Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер // Там же. — 1996. — № 8. — С. 53—55.
3. Буткевич Г. В., Клепарская Л. Г., Набатов В. Ф. Синхронизированное отключение цепей переменного тока высокого напряжения // Электричество. — 1969. — № 1. — С. 6—13.
4. Гилёв А. А., Данилов В. Н., Миронов В. С. Оценка роста коммутационного ресурса вакуумных выключателей при синхронном отключении // Светотехника и электротехника. — 2009. — № 4 (57). — С. 68—73.