

РАСЧЕТ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАЗОМКНУТЫХ КОНТАКТАХ ДВУХКАМЕРНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

АВТОРЫ:

Д.С. ЯРОШЕНКО,
ЗАО «ЗЭТО»

В.Н. ОСТРЕЙКО,
К.Т.Н.,
ЗАО «ЗЭТО»

Автоматический выключатель высоковольтной сети должен обеспечивать гашение дуги при всех возможных режимах сети. Предельный ток автоматического

выключателя не должен превышать 50 кА. При токах 100 кА и выше в автоматических выключателях применяются камеры открытого исполнения с большой зоной выброса.

Ключевые слова: высоковольтные выключатели; дугогасительные камеры; двойной разрыв электрической цепи; напряжения и электрическая прочность разрыва цепи; электрические емкости; сопротивления утечки изоляторов; сопротивления отключаемой цепи.



Высоковольтные выключатели на подстанции

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтные выключатели на напряжение 330 кВ и выше, как правило, содержат две дугогасительные камеры, которые осуществляют близкий к одновременному двойной разрыв электрической цепи. Однако из-за наличия опорного изолятора и паразитных емкостей, действующие значения напряжений U_1 и U_2 на разрывах контактов двух практически одинаковых дугогасительных камер выключателя оказываются разными. Это может сильно снижать электрическую прочность общего разрыва цепи, приводя его к электрическому пробою. Для повышения равномерности распределения напряжения между указанными разрывами применяются дополнительные конденсаторы или резисторы, подключаемые параллельно к каждой дугогасительной камере [1, с. 154].

Известна упрощенная емкостная электрическая схема двухразрывного выключателя (рис. 1). Согласно этой схеме коэффициент K указанной неравномерности распределения напряжения определяется формулой [1, с. 153]:

$$K = U_1 / U_2 = 1 + C_0 / C > 1, \quad (1)$$

где C — емкость между разомкнутыми контактами дугогасительных камер,

а C_0 — емкость опорного изолятора относительно земли.

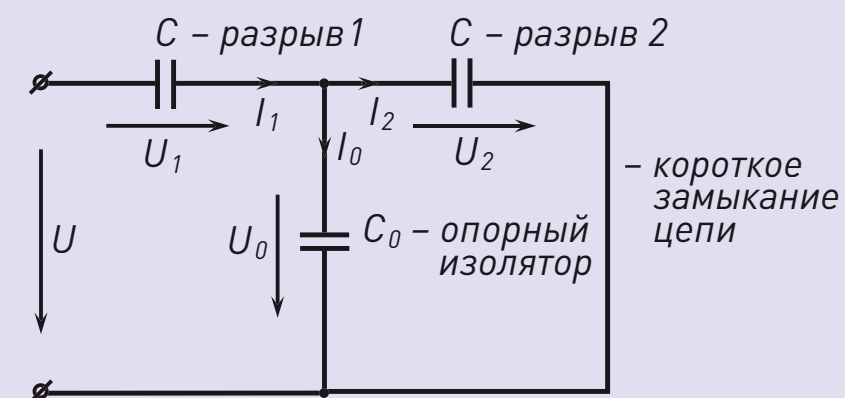
Поскольку схема рис. 1 содержит только емкости, то справедливо уравнение для действующих значений напряжений: $U_1 + U_2 = U$. Отсюда с учетом (1) получаем:

$$U_1 = U(1 + C_0 / C) / (2 + C_0 / C), \quad (2)$$

$$U_2 = U / (2 + C_0 / C)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что по мере увеличения емкости C ,

МАКСИМАЛЬНО УПРОЩЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ДВУХРАЗРЫВНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ДЕЙСТВУЮЩИМ ЗНАЧЕНИЕМ U ОТ ЗАКОРОЧЕННОЙ ЦЕПИ



Разомкнутые дугогасительные камеры 1 и 2 выключателя имеют одинаковые емкости C

Рис. 1

например, за счет упомянутых дополнительных конденсаторов, величина K приближается к 1, а напряжение $U_1 \rightarrow U_2 \rightarrow U/2$, что повышает электрическую прочность выключателя.

Недостатками электрической схемы рис. 1 являются:

- отсутствие электрических параметров отключаемой цепи (они полностью закорочены, что в большинстве случаев не соответствует реальным условиям);
- отсутствие учета обычно имеющихся место в опорном изоляторе и в изоляторах дугогасительных камер утечек тока, обусловленных загрязнениями изоляторов.

Задача настоящей работы — получить алгоритм расчета действующих значений восстанавливающихся напряжений на обеих дугогасительных

камерах выключателя с учетом двух указанных факторов, т.е. с учетом не только емкостей, но и сопротивлений отключаемой электрической цепи и сопротивлений утечки изоляторов.

УТОЧНЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА РАЗМЫКАНИЯ ЦЕПИ

Эта схема, частично рассмотренная в [2], представлена в комплексной форме на рис. 2 на с. 40, где Z_{nn} , I_n и U_n — соответственно, комплексные сопротивления, токи и напряжения опорного изолятора ($n = 0$), первой ($n = 1$) и второй ($n = 2$) дугогасительных камер, U_λ — комплексное напряжение на сопротивлении Z_λ

размыкаемой цепи, а U — действующее значение отключаемого синусоидального напряжения с угловой частотой ω .

В общем случае

$$Z_\lambda = R_\lambda + jX_\lambda, \quad (3)$$

где реактивное сопротивление X_λ размыкаемой цепи может быть положительным, отрицательным или равным нулю, а ее активное сопротивление $R_\lambda \geq 0$.

Указанные комплексные сопротивления Z_{nn} определяются согласно схеме рис. 3 с учетом соответствующих емкостей C_n и сопротивлений R_n , т. е.

$$Z_{nn} = -jX_n R_n (R_n - jX_n)^{-1}, \quad (4)$$

$$X_n = (\omega C_n)^{-1},$$

или, после разделения вещественной и мнимой частей —

$$Z_{nn} = R_{nn} - jX_{nn}, \quad n = 0, 1, 2, \quad (5)$$

где, следовательно,

$$R_{nn} = R_n (X_n / z_n)^2, \quad (6)$$

$$X_{nn} = X_n (R_n / z_n)^2, \quad z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2}$$

Ниже будут использоваться также модули сопротивлений (5) при $n = 0$ и $n = 2$:

$$z_{00} = \sqrt{R_{00}^2 + X_{00}^2}, \quad z_{22} = \sqrt{R_{22}^2 + X_{22}^2} \quad (7)$$

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ УТОЧНЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Уравнения, соответствующие первому и второму законам Кирхгофа для схемы рис. 2, имеют вид:

УТОЧНЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ДВУХРАЗРЫВНОГО РАЗМЫКАНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ ЦЕПИ С КОМПЛЕКСНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ Z_λ

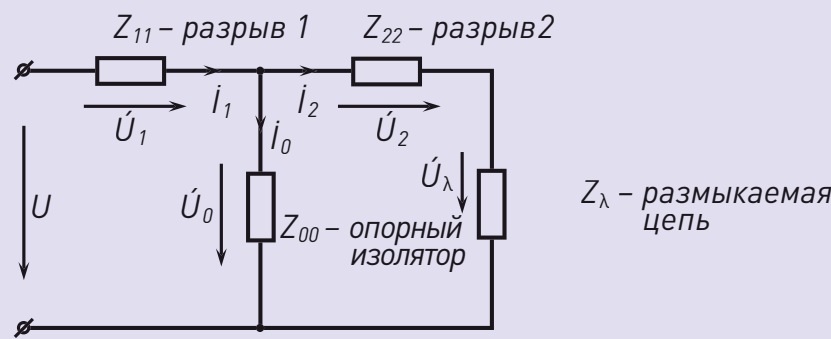


Рис. 2

$$i_0 = i_1 - i_2, \quad (8)$$

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_0 = U, \quad \dot{U}_0 = \dot{U}_2 + \dot{U}_\lambda, \quad (9)$$

где по закону Ома в комплексной форме:

$$\dot{U}_0 = Z_{00} \dot{i}_0, \quad \dot{U}_1 = Z_{11} \dot{i}_1, \quad (10)$$

$$\dot{U}_2 = Z_{22} \dot{i}_2, \quad \dot{U}_\lambda = Z_\lambda \dot{i}_\lambda$$

Согласно поставленной задаче, искомыми величинами являются:

$$U_1 = |\dot{U}_1| = |Z_{11} \dot{i}_1|, \quad (11)$$

$$U_2 = |\dot{U}_2| = |Z_{22} \dot{i}_2|, \quad K = U_1 / U_2$$

Следовательно, задача сводится к определению комплексных токов \dot{i}_1 и \dot{i}_2 .

С учетом (10) и (8) уравнения (9) принимают вид:

$$Z_{11} \dot{i}_1 + Z_{00} (\dot{i}_1 - \dot{i}_2) = U, \quad (12)$$

$$Z_{00} (\dot{i}_1 - \dot{i}_2) = Z_{22} \dot{i}_2$$

где комплексное сопротивление

$$Z_{2\lambda} = Z_{22} + Z_\lambda = R_{2\lambda} + jX_{2\lambda}, \quad (13)$$

при этом, согласно (5) и (3)

$$R_{2\lambda} = R_{22} + R_\lambda, \quad X_{2\lambda} = -X_{22} + X_\lambda \quad (14)$$

С учетом (5)–(7) и (13) из алгебраической системы (12) находим \dot{i}_1 и \dot{i}_2 :

$$\dot{i}_1 = (1 + Z_{2\lambda} / Z_{00}) \dot{i}_2, \quad (15)$$

$$\dot{i}_2 = U (Z + Z_{2\lambda})^{-1}, \quad Z = R + jX,$$

где использованы обозначения:

$$R = R_{11} + [R_{00} (R_{11} R_{2\lambda} + X_{11} X_{2\lambda}) - X_{00} (R_{11} X_{2\lambda} - X_{11} R_{2\lambda})] z_{00}^{-2}, \quad (16)$$

$$X = -X_{11} + [R_{00} (R_{11} X_{2\lambda} - X_{11} R_{2\lambda}) + X_{00} (R_{11} R_{2\lambda} + X_{11} X_{2\lambda})] z_{00}^{-2}$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ

С учетом (5) и (14)–(16) выражения (11) принимают окончательный вид:

$$U_1 = U \frac{z}{z_q}, \quad U_2 = U \frac{z_{22}}{z_q}, \quad (17)$$

$$K = U_1 / U_2 = \frac{z}{z_{22}},$$

где z_{22} определяется выражением (7), а

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (18)$$

$$z_q = \sqrt{(R + R_{2\lambda})^2 + (X + X_{2\lambda})^2}$$

Вещественные формулы (17) с учетом выражений (18), (16), (14), (7) и (6) позволяют путем расчетов осуществить всесторонний анализ влияния на относительные напряжения U_1 / U , U_2 / U и величину K всех емкостей $[C_0, C_1, C_2]$, всех сопротивлений утечки изоляторов $[R_0,$

$R_1, R_2]$ и параметров размыкаемой цепи $[R_\lambda, X_\lambda]$.

НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ В ЧАСТНЫХ СЛУЧАЯХ

Рассмотрим частный случай, когда токи утечки во всех трех изоляторах отсутствуют ($R_n = \infty$), при этом емкости дугогасительных камер одинаковы $[C_1 = C_2 = C]$, т. е. $X_1 = X_2 = (\omega C)^{-1}$. В данном случае выражения (17) преобразуются к виду:

УЧЕТ В КОМПЛЕКСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ Z_{nn} СХЕМЫ РИС. 2 ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ C_n И СОПРОТИВЛЕНИЙ УТЕЧКИ R_n ОПОРНОГО ИЗОЛЯТОРА ($n = 0$) И ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР ($n = 1$ И 2)

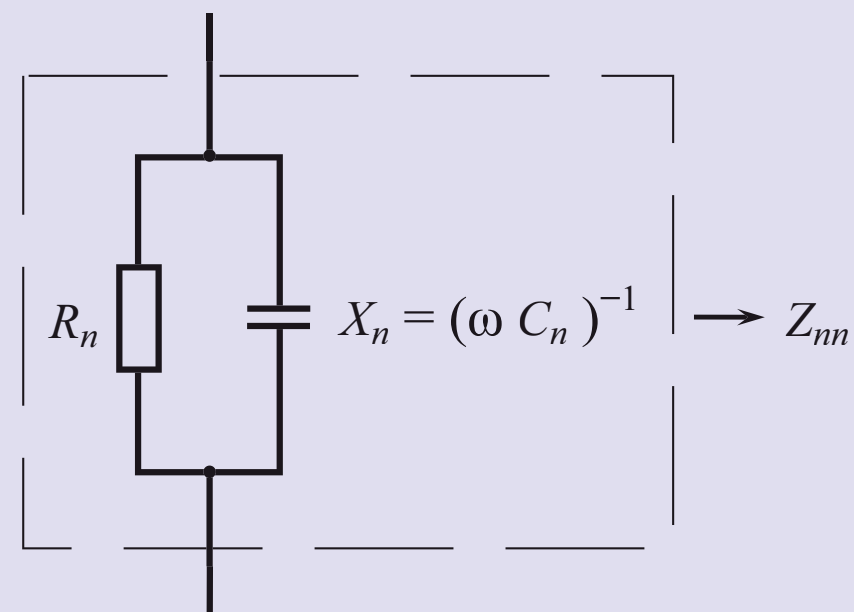


Рис. 3

ИЗ ИСТОРИИ

Высоковольтный выключатель — коммутационный аппарат, предназначенный для включений и отключений отдельных цепей или электрооборудования в энергосистеме.

После создания в 70-х годах XIX века достаточно мощных источников электрической энергии началось создание различных аппаратов управления и регулирования: выключателей, переключателей и др. М.О. Дольво-Добровольский разработал в 1893 г. выключатель-рубильник с пружинными контактами и автоматом, затем, в 1910 г., — дугогасящее устройство с узкими щелями и металлической решеткой, а в 1914 г. решетку с электромагнитами для втягивания электрической дуги в щель. Начиная с 1911–1912 гг. основные усилия изобретателей сконцентрировались на разработке масляных выключателей. Вот что было написано все в том же журнале «Электричество» в № 1 за 1912 г.: «Главное достоинство масляного выключателя заключается в том, что он прерывает цепь тока, не допуская образования большой вольтовой дуги, и требует, в сравнении с выключателями других конструкций, лишь незначительного места».

Первые образцы таких масляных выключателей были продемонстрированы в 1911 г. на выставке в Турине (Италия). Это были трехфазный выключатель на напряжение 25 кВ и однофазный на напряжение 45 кВ мощностью 10 кВА. В этих выключателях дугогасящая система была помещена в заполненный маслом заземленный бак, поэтому они были названы масляными баковыми выключателями.

$$U_1/U = K/q, \quad U_2/U = 1/q, \quad (19)$$

где при этом

$$K = U_1/U_2 = \frac{\sqrt{(\omega C_0 R_\lambda)^2 + (1 - \omega C_0 X_\lambda + C_0/C)^2}}{\sqrt{[\omega(C + C_0)X_\lambda - 2 - C_0/C]^2 + [\omega C R_\lambda(1 + C_0/C)]^2}} \quad (20)$$

В следующих четырех еще более частных случаях выражения (20) с учетом (3) принимают вид:

$$1. \text{ в случае отключения чисто емкостной цепи } (R_\lambda = 0, X_\lambda = -(\omega C_\lambda)^{-1}) - \\ K = U_1/U_2 = \frac{1 + C_0/C_\lambda + C_0/C}{C + C_0} > 1, \quad (21) \\ q = (C + C_0)/C_\lambda + 2 + C_0/C;$$

$$2. \text{ в случае отключения чисто индуктивной цепи } (R_\lambda = 0, X_\lambda = \omega L_\lambda) - \\ K = U_1/U_2 = \frac{1 - \omega^2 C_0 L_\lambda + C_0/C}{\omega^2(C + C_0)L_\lambda - 2 - C_0/C}; \quad (22) \\ q = \left| \frac{1 - \omega^2 C_0 L_\lambda + C_0/C}{\omega^2(C + C_0)L_\lambda - 2 - C_0/C} \right|;$$

$$3. \text{ в случае отключения чисто активной цепи } (R_\lambda \neq 0, X_\lambda = 0) - \\ K = U_1/U_2 = \frac{\sqrt{(\omega C_0 R_\lambda)^2 + (1 + C_0/C)^2}}{\sqrt{(2 + C_0/C)^2 + [\omega C R_\lambda(1 + C_0/C)]^2}} > 1, \quad (23) \\ q = \sqrt{(2 + C_0/C)^2 + [\omega C R_\lambda(1 + C_0/C)]^2};$$

4. в случае отключения короткозамкнутой цепи ($R_\lambda = X_\lambda = 0$) — выражения (19) и (20) преобразуются в (2) и (1).

Отметим, что согласно (22) в случае отключения чисто индуктивной цепи коэффициент K может быть как больше, так и меньше единицы.

ВЫВОДЫ

Получены вещественные выражения (17)–(23) для восстанавливающих напряжений на разрывах контактов двухкамерного выключателя с учетом его емкостей (C_0, C_1, C_2), сопротивлений утечки

изоляторов (R_0, R_1, R_2), а также активного (R_λ) и реактивного (X_λ) сопротивлений отключаемой цепи. В общем случае эти выражения зависят от восьми указанных параметров и поэтому не могут быть рационально представлены в графической или табличной формах. Вместе с тем, упомянутые выражения легко программируются, что позволяет на этапе разработки соответствующего выключателя оперативно осуществить необходимые многовариантные расчеты и оценить его электрическую прочность.

ЛИТЕРАТУРА

- Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. Л.: Энергия, 1970. 328 с.
- Ярошенко Д.С., Острейко В.Н. Математическая модель расчета неравномерности распределения синусоидального напряжения между разрывами двухкамерного выключателя. Доклады XXIX Международной конференции ТРАВЭК, Москва, июнь 2019.



Рис. 4

Комплексная проверка оборудования ЦПС

НОВИНКА

- поддержка корпоративного профиля МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС»
- поддержка МЭК 61869-9
- программно-технический комплекс анализа сетевого трафика МЭК 61850-8-1 и МЭК 61850-9-2 (МЭК 61869-9)

РЕТОМ-61850

Проверка цифровых измерительных трансформаторов, преобразователей аналоговых сигналов (SAMU) и других элементов цифровой подстанции

- генерация до 80 SV-потоков 80/96/256/288 выборок за период
- регистрация до 10 SV-потоков 80/96/256/288 выборок за период
- режим искажения данных SV-потоков (МЭК 61850-9-2)
- 256 входящих/исходящих GOOSE
- синхронизация PTP, SNTP, 1PPS
- сервер PTP (IEEE 1588v2)
- автоматизированные испытания устройств РЗА при повышенной информационной нагрузке по протоколам МЭК 61850-8-1 и МЭК 61850-9-2 (МЭК 61869-9)



РЕТОМ-71

Проверка автономных преобразователей аналоговых сигналов (SAMU) для РЗА и систем измерения и учёта электроэнергии

- моделирование насыщения электромагнитных ТТ
- 6 источников тока (20 А, 250 В·А)
- 6 источников напряжения (140 В, 35 В·А)
- автоматизированные испытания устройств РЗА с поддержкой протокола МЭК 61850-8-1 (GOOSE)

Межповерочный интервал — 4 года

ГАРАНТИЯ – 5 ЛЕТ