

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ОПОРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ 10-35 КВ ПО ИХ ТОКАМ УТЕЧКИ

Плешков П.Г., к.т.н., доц., Котыш А.И., к.т.н., доц.  
Кировоградский национальный технический университет (Украина)

Одной из самых распространенных причин, по которой изоляторы теряют свои изолирующие способности, является природное загрязнение их поверхности до критической точки, когда любое повышение приложенного к изолятору напряжения вызывает лавинообразное увеличение тока утечки.

В целом механизм перекрытия изолятора, возможно представить таким образом. Под действием приложенного к изолятору напряжения на увлажненном слое загрязнения происходит непрерывный процесс установления тока утечки. При увеличении напряжения на 10...70%, что в эксплуатации может быть связано с регулированием напряжения в сети или с замыканием на землю, ток утечки растет. Поскольку изоляторы вдоль пути утечки имеют переменный диаметр, а также неравномерную плотность загрязнения, то плотность токов утечки в отдельных зонах не одинакова. В местах с большей плотностью сопротивление слоя загрязнения вследствие наиболее интенсивного подсушивания увеличивается. Падение напряжения и выделение тепла на этих участках растут, что приводит к последующему увеличению сопротивления слоя загрязнения. В результате этого линейность распределения напряжения по загрязненной поверхности изолятора резко нарушается.

Значительное повышение напряжения на подсушенных участках вызывает возникновение частичных разрядов. При этом на поверхности изолятора заметно большое количество разрядов синего цвета. При последующем увеличении напряжения приложенного к изолятору в 2...3,5 раза, что в реальных условиях может быть обусловлено дугowymi или коммутационными перенапряжениями в сети, частичные разряды шунтируют подсушенные зоны и приобретают дуговой характер. В этом случае наблюдаются значительные скачки токов утечки, которые являются причиной образования стойких частичных дуг. Дуга растягивается вплоть до полного перекрытия изолятора.

В свою очередь, электропроводность слоя загрязнения определяется его толщиной, химическим составом, текстурой, влажностью и температурой. Так, летом в воздухе всегда находится минеральная пыль, органические частицы, продукты выбросов промышленных предприятий – размером  $10^{-9} \dots 10^{-3}$  м., частые туманы и дожди. Зимой преобладают дым, сажа, топочные уносы. Сезонные колебания химического состава загрязнений, периодическое влияние погодных факторов обуславливают наслоение цементированных пленок, толщина и проводимость которых варьируется из года в год.

При приложении напряжения к изолятору через него начинает протекать ток утечки. Его условно можно разделить на несколько составляющих (см. рис. 1).

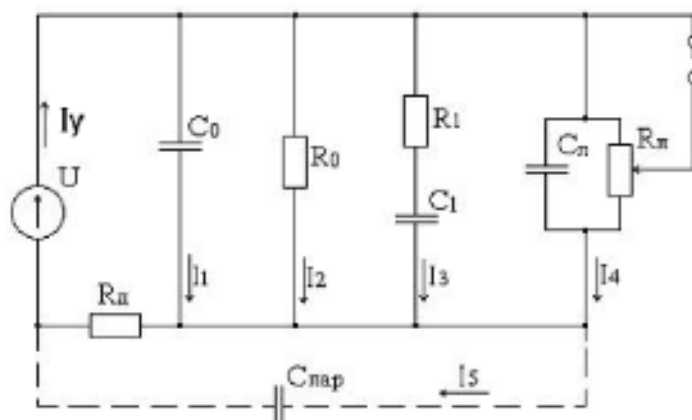


Рис. 1. Схема замещения контура с контролируемым изолятором

Суммарный ток утечки изолятора для данной модели определяется следующими составляющими:

$I_1$  – емкостной ток;

$I_2$  – сквозной ток;

$I_3$  – ток абсорбции;

$I_4$  – поверхностный ток;

$I_5$  – ток обусловленный паразитной емкостью  $C_{\text{пар}}$ , которая может возникать между нижним фланцем изолятора и землей.

Фактически через делитель  $R_d$  протекает не полный ток утечки  $I_y$ , однако с целью упрощения модели влиянием  $C_{\text{пар}}$  можно пренебречь. Поэтому можно записать:

$$I_y = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

(1)

Далее считаем, что емкостная составляющая тока утечки (ток  $I_1$ ) остается практически неизменной в процессе эксплуатации [1] и определяется следующим образом:

$$I_1 = \omega C_0 U$$

(2)

где  $\omega$  - угловая частота;

$C_0$  – емкость опорного изолятора;

$U$  – значение приложенного напряжения.

Как видно из выражения (2) емкостная составляющая тока утечки для определенного типа изоляторов практически является константой. Незначительные изменения ее могут быть вызваны лишь изменением напряжения в сети.

Сквозной ток проводимости  $I_2$  определяется как

$$I_2 = \frac{U}{R_0} = U Y_0$$

(3)

Появление тока абсорбции  $I_3$  может быть обусловлена разными причинами.

1. Электронная поляризация, причиной которой является смещение центра тяжести системы электронных оболочек относительно заряда ядра.

2. Ионная поляризация – смещение ионов одного знака относительно ионов другого знака.

3. Дипольная поляризация – происходит за счет ориентации упругих диполей под действием внешнего электрического поля.

4. Структурная поляризация, обусловлена перемещением в небольших объемах, слабо связанных с соседними частицами ионов и диполей.

5. Низкочастотная или внутрислойная поляризация, возникающая вследствие образования объемных зарядов в приэлектродных зонах.

Однако, что касается неполярных диэлектриков, к которым относится фарфор, токи абсорбции можно объяснить неоднородностью электрических свойств изоляторов, появлением под действием внешнего электрического поля объемных зарядов и другими причинами, которые вызваны перераспределением зарядов в объеме диэлектрика [2].

При работе диэлектрика под синусоидальным напряжением ток абсорбции также имеет синусоидальную форму и имеет две составляющие [2].

$$\text{активную } I'_{abc} = U \cdot s \frac{\omega^2 \tau^2}{\omega^2 \tau^2 + 1} \quad (4)$$

$$\text{реактивную } I''_{abc} = U \cdot s \frac{\omega \tau}{\omega^2 \tau^2 + 1} \quad (5)$$

где  $s$  – проводимость, соответствующая току абсорбции;

$\tau$  - время затухания тока абсорбции до  $1/e$  первоначального значения.

Поверхностная составляющая тока утечки  $I_4$  изменяется в очень широких пределах. На ее величину влияют количественный и качественный состав загрязнений, а также факторы, обусловленные состоянием окружающей среды.

Для поверхностного слоя загрязнения (цепь  $R_n$ - $C_n$ ) можно записать сопротивление в комплексной форме

$$Z = \frac{R_n}{1 + jR_n C_n \omega} \quad (6)$$

Тогда ток  $I_4$  будет равен

$$I_4 = U \frac{1 + j\omega R_n C_n}{R_n} \quad (7)$$

Рассмотрим отдельно активную и реактивную составляющие для суммы токов  $I_1+I_2+I_3$ , в результате чего получим

$$I_a = U \left( \frac{1}{R_0} + \frac{s\omega^2 t^2}{\omega^2 t^2 + 1} \right) \quad (8)$$

$$I_p = U\omega \left( C_0 + \frac{st}{\omega^2 t^2 + 1} \right) \quad (9)$$

$$I_y = U \left[ Y_0 + \frac{s\omega^2 t^2}{\omega^2 t^2 + 1} + \frac{1}{R_n} + j\omega \left( C_0 + \frac{st}{\omega^2 t^2 + 1} + C_n \right) \right] \quad (10)$$

Выражение (10) в общем виде дает полное представление о токе утечки изолятора, находящегося под рабочим напряжением  $U$ .

В практических расчетах использование формулы (10) усложняется, поэтому представляется необходимым максимально упростить ее, предварительно приняв следующие допущения.

1. Пренебречь переходным процессом во время включения изолятора на рабочее напряжение. Тогда ток абсорбции как активный, так и реактивный будут равны нулю, особенно это справедливо для неполярных фарфоровых диэлектриков, работающих на частоте 50 Гц.

2. Приняв во внимание, что для фарфора на частоте 50 Гц  $tg\delta=0,25$ , сквозной ток проводимости  $I_2=0,025I_1$ , то есть в 40 раз меньше емкостного тока изолятора ( $I_2=I_{R0}\approx 0$ ).

3. Емкостное сопротивление поверхностного слоя загрязнения в критических предразрядных условиях (роса, дождь, туман, большой процент атмосферной влажности) значительно возрастает по сравнению с активным и на несколько порядков превышает его, то есть  $1/R_n \gg \omega C_n$  [3].

Таким образом, на основании принятых допущений можно записать (10) таким образом:

$$I_y = U \left( \frac{1}{R_n} + j\omega C_0 \right) \quad (11)$$

То есть ток утечки изолятора обусловлен в основном его поверхностной  $I_n$  и емкостной  $I_c$  составляющими.

Высоковольтные изоляторы конструктивно выполняются с переменным диаметром, по этому сопротивление поверхности

$$R = \int_0^{L_y} \frac{\gamma_v dl}{\rho D(l)\Delta} \quad (12)$$

где  $l$  – расстояние от электрода до элементарного участка  $dl$ ;

$L_y$  – полная длина утечки по поверхности изолятора;

$D(l)$  – переменный диаметр изолятора;

$\gamma_v$  – удельное объемное сопротивление слоя загрязнения;

$\Delta$  – толщина слоя загрязнения.

При возникновении частичных разрядов полное сопротивление поверхностного слоя уменьшается за счет шунтированных дугой участков

$$R_{ш} = R - (r_n - r_0) \cdot l_0 \quad (13)$$

где  $r_n$  – сопротивление увлажненного и загрязненного слоя на единицу длины;

$r_0$  – сопротивление единицы длины дуги;

$l_0$  – длина дуги.

Для стационарной дуги зависимость между током дуги и напряженностью может быть представлена в виде [4]:

$$E_0 = AI^{-n} \quad (14)$$

где  $A$  и  $n$  – константы зависящие от условий горения дуги.

Тогда согласно (12) и (14) для бесконечно малого участка запишем:

$$r_n = \frac{\gamma_v}{\rho D \Delta} \quad (15)$$

$$r_0 = \frac{AI^n}{I} = AI^{-(n+1)} \quad (16)$$

Очевидно, что если  $r_n < r_0$  то  $R_{ш} > R$  и ток по поверхности изолятора уменьшится по сравнению с первоначальным током (до возникновения частичных разрядов). Уменьшение тока утечки приводит к возрастанию сопротивления дуги, и в свою очередь к дальнейшему уменьшению тока, до полного гашения дуги.

Если же  $r_n > r_0$  то естественно  $R_{ш} < R$  и ток по поверхности изолятора увеличивается. Этот факт приводит к дальнейшему уменьшению сопротивления канала дуги, что в свою очередь способствует увеличению тока. Суммарное сопротивление поверхности изолятора уменьшается, возникают благоприятные условия для дальнейшего продвижения дуги вдоль поверхности изолятора до полного его перекрытия.

Таким образом, условие перекрытия поверхности изолятора можно записать как

$$\frac{\gamma_v}{\rho D \Delta} \geq AI^{-(n+1)} \quad (17)$$

или заменив удельное объемное сопротивление на стандартную единицу (проводимость  $x_v$ ) получим

$$I_{кр} = (A \rho D(I) \Delta x_v)^{\frac{1}{1+n}} \quad (18)$$

Таким образом, из полученной формулы (18) видно, что ток утечки по загрязненной и увлажненной поверхности изолятора зависит от размеров самого изолятора, толщины слоя загрязнения и его проводимости, а также от условий окружающей среды (константы  $A$  и  $n$ ). То есть можно сказать, что на разрядное напряжение изоляторов влияют случайные факторы, связанные с возникновением и развитием разряда [5]. Поэтому разрядное напряжение является случайной величиной, которая подчиняется статистическим законам. Эксперименты показали, что значения разрядных напряжений опорных изоляторов отвечают нормальному закону распределения. Интегральная функция распределения вероятности возникновения разряда при напряжении  $U$  описывается уравнением

$$p(U) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U-\bar{U})^2}{2S^2}} dU \quad (19)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\bar{U} - U)^2}{N-1}} ; \quad (20)$$

$\bar{U}$  – значение разрядного напряжения, что отвечает 50%-ной вероятности, определяется в соответствии ГОСТ 10390-86;

$\sigma$  – среднее квадратичное отклонение разрядных напряжений от 50%-ной величины;

$N$  – количество опытов.

Вероятность того, что отклонение разрядных напряжений от  $\bar{U}$  будет превышать  $bs$

$$p(U - \bar{U}) \geq bs \quad (21)$$

для  $2\sigma$  составляет 0,0455, а для  $3\sigma$  равняется 0,0027. Вероятность того, что разряд произойдет при напряжении  $U \leq (\bar{U} - 2\sigma)$  равняется 0,023, а при напряжении  $U \leq (\bar{U} - 3\sigma)$  составляет 0,00135. В дальнейшем, для оценки наименьшего разрядного напряжения будет использоваться именно это выражение

$$U_{\min} = \bar{U} - 3s \quad (22)$$

ибо вероятность разряда при меньшем напряжении практически равняется нулю.

Процесс развития разряда на всех его стадиях, как отмечалось выше, определяется состоянием поверхностного слоя изолятора, но с другой стороны это состояние определяет ток утечки [5]. Поэтому представляется необходимым выведения функциональной зависимости разрядных напряжений от тока утечки опорных изоляторов 10 - 35 кВ, что находятся под рабочим напряжением. Для этого были использованы методы регрессионного и корреляционного анализа.

На основе экспериментальных данных была построена эмпирическая линия регрессии и сделан вывод о том, что искомая зависимость может быть записана в виде полинома

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_kx^k \quad (23)$$

Как критерий при расчете рассматривалась остаточная дисперсия

$$S_k^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - L} \quad (24)$$

где  $y_i$  - экспериментальное значение функции;

$\hat{y}_i$  - теоретическое значение функции;

$N$  - количество опытов;

$L$  - количество коэффициентов регрессии.

Как только при переходе от  $k$ -ой степени полиному к  $(k+1)$ -ой остаточная дисперсия  $S_{k+1}^2$  становилась значительно большей  $S_k^2$ , увеличение степени прекращалось.

Значимость разницы между  $S_k^2$  и  $S_{k+1}^2$  проверялась по критерию Фишера.

В результате проведенных расчетов было получено уравнение регрессии, которое имеет вид

$$Y = 12256 - 60,83X + 149X^2 - 1,28X^3 \quad (25)$$

Для полученного уравнения регрессии (25) на рис.2 изображен график зависимости 50-% разрядных напряжений от тока утечки изолятора, который находится под рабочим напряжением. Зависимость (25) позволяет определить разрядное напряжение по известному току утечки и сравнить ее с величиной перенапряжения, определяя при этом степень опасности состояния поверхностного слоя изолятора.

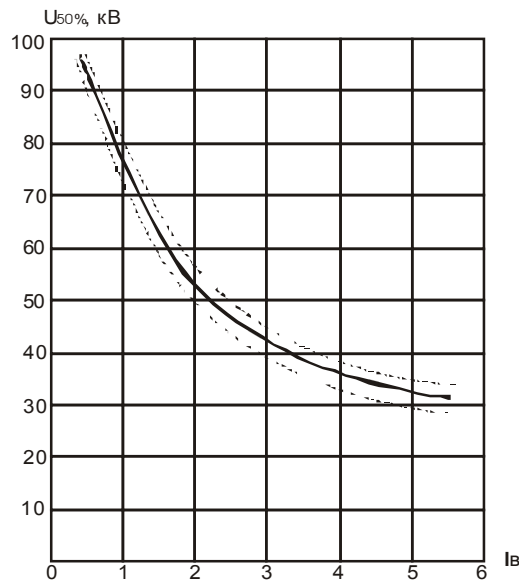


Рис.2. Зависимость разрядных напряжений от тока утечки опорного изолятора ОРУ (пунктиром указаны доверительные интервалы)

Исходя из того, что наиболее распространенным видом повреждения являются однофазные замыкания на землю, 70% которых сопровождаются появлением электрической дуги принимая величину, возникающих при этом перенапряжений в сетях 10-35 кВ -  $3 \dots 3,2 U_{\phi}$ , возможно оценить с точки зрения опасности перекрытия минимальное значение тока утечки изолятора.

Подставляя в уравнение регрессии (25) выражение (22) и значение  $U_{\min} = 3,2 U_{\phi}$   $\sigma = 4,927$  (определено в соответствии (21)) получаем следующее уравнение

$$1,28X^3 - 14,9X^2 + 60,83X - 43,76 = 0$$

(26)

Решая это уравнение получаем, что  $I_{у.мин} = 0,904$  мА.

Используя полученное значение  $I_{у.мин}$  и кривую (рис.2) возможно оценить опасность перекрытия изоляторов 35 кВ в зависимости от влияния факторов окружающей среды. Так например, для изолятора, ток утечки которого составляет 4 мА, значение 50% разрядного напряжения будет составлять приблизительно 33-35 кВ. В этом случае вероятность перекрытия изолятора высокая и принятие мер, относительно предотвращения перекрытия было бы своевременное.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Орлович А.Е., Котыш А.И. Управление автоматизированным обогревом КРУН на основе прогноза выпадения росы на изоляторе // Энергетика и электрификация – 1998. – №6. – С. 46-48.
2. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1973.
3. Нерпин Е.Б., Чудновский Л.В. Физика почвы. – М.: Наука, 1967.
4. Техника высоких напряжений / Под общ. ред. Д.В. Разевига. – М.: Энергия, 1979.
5. Котиш А.І. Автоматизовані засоби технічної діагностики та електричного контролю за станом ізоляції в сільських електричних мережах: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.11.13 / НТУ "ХП" – Харків, 2001. – 17 с.