

Определение параметров изоляции относительно земли и токов утечки с помощью вольтметра в сетях постоянного и переменного тока под рабочим напряжением

Ольшовец П., инж. (Польша)

Рассмотрены методы определения сопротивления изоляции в сетях постоянного тока с помощью вольтметра. Для сетей переменного тока с произвольным числом фаз описан процесс вычисления значений эквивалентного сопротивления и суммарной емкости изоляции путем трехкратного измерения фазного напряжения. Приведен также расчет токов утечки и КЗ в сетях постоянного и переменного тока с использованием результатов измерений. С целью оценки угрозы пожара даны выражения для вычисления максимального значения активной составляющей тока утечки в отдельных фазах сети.

Ключевые слова: сети, изолированные относительно земли, эквивалентное сопротивление изоляции, теорема Тевенена, токи утечки и КЗ.

Контроль состояния изоляции сетей относительно земли необходим для обеспечения их правильной эксплуатации. В настоящее время существуют разные способы определения сопротивления изоляции в сетях постоянного тока под рабочим напряжением, в том числе с помощью вольтметра. Следует отметить, что вследствие широкого распространения различных устройств контроля изоляции традиционные методы определения ее сопротивления теряют свою значимость. Тем не менее при отсутствии указанных устройств или для быстрой проверки состояния изоляции в месте работы приходится исполь-

зовать простейшие методы периодического измерения и вычисления этого параметра.

Основным показателем состояния изоляции сети относительно земли является эквивалентное сопротивление — результирующее сопротивление всех элементов между гальванически соединенными точками сети и землей. Его рассчитывают как сопротивление всех элементов, параллельно включенных между сетью и землей, при закороченных источниках напряжения и разомкнутых источниках тока, используя при этом теорему Тевенена. Зная данный параметр, можно вычислить, например, токи утечки и КЗ на землю.

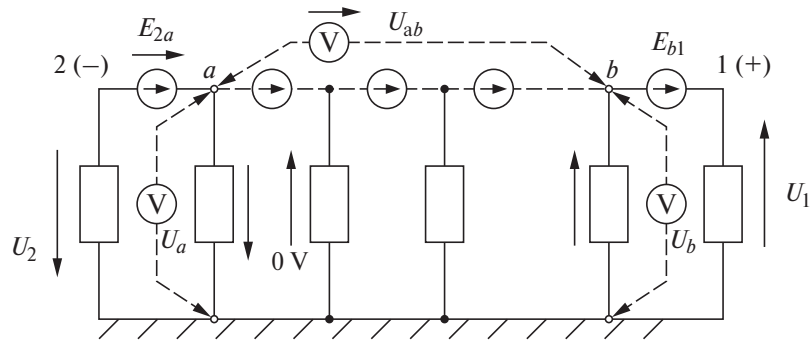


Рис. 1

Определение сопротивления изоляции в сетях постоянного тока с помощью вольтметра

Наиболее часто для определения эквивалентного сопротивления изоляции относительно земли R_i в сетях постоянного тока применяют метод [1] последовательного измерения вольтметром с известным внутренним сопротивлением R_V трех напряжений: между полюсами сети (E); между положительным полюсом и землей (U_1); между отрицательным полюсом и землей (U_2). Тогда

$$R_i = R_V \frac{E - U_1 - U_2}{U_1 + U_2}. \quad (1)$$

При этом сопротивления изоляции отдельных полюсов сети R_1 и R_2 находят из выражений:

$$R_1 = R_V \frac{E - U_1 - U_2}{U_2}; \quad (2)$$

$$R_2 = R_V \frac{E - U_1 - U_2}{U_1}. \quad (3)$$

Формула (1) справедлива и в случае, если полюсы сети заменить любыми двумя точками, находящимися на противоположных сторонах от так называемой нулевой точки батареи (т.е. точки с нулевым потенциалом относительно земли).

Ниже показан пример вывода формулы (1) в наиболее общем случае **неравномерного распределения** изоляции внутри самой батареи (рис. 1). Применяв теорему Тевенена при расчете напряжений U_a и U_b , получим:

$$U_a = R_V \frac{U_{aj}}{R_V + R_i};$$

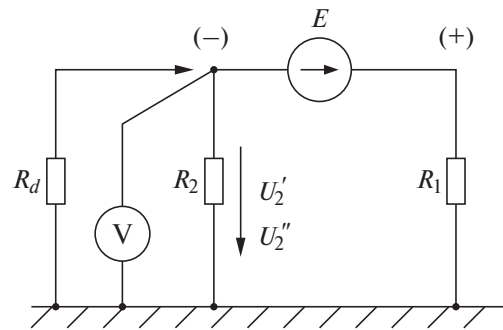


Рис. 2

$$U_b = R_V \frac{U_{bj}}{R_V + R_i},$$

где U_{aj} и U_{bj} — напряжения в точках a и b относительно земли до включения вольтметра.

Используя условие $U_{aj} + U_{bj} = U_{ab}$ (оно верно, если вольтметр измеряет напряжение U_{ab}), получим формулу (1).

Если сопротивление изоляции значительно меньше внутреннего сопротивления вольтметра R_V , то в этом случае его можно определить по схеме с применением добавочного резистора R_d (рис. 2).

Тогда сопротивление изоляции находят из выражения

$$R_i = \frac{R_V R_d (U_2' - U_2'')}{U_2'' (R_d + R_V) - U_2' R_d}, \quad (4)$$

где U_2' и U_2'' — напряжение отрицательного полюса до и после включения добавочного резистора.

Оценка возможных погрешностей результатов определения сопротивления изоляции, полученных разными методами, в частности, в [2], позволила сделать вывод о необходимости применения вольтметра **без добавочного резистора** лишь для уровней изоляции, срав-

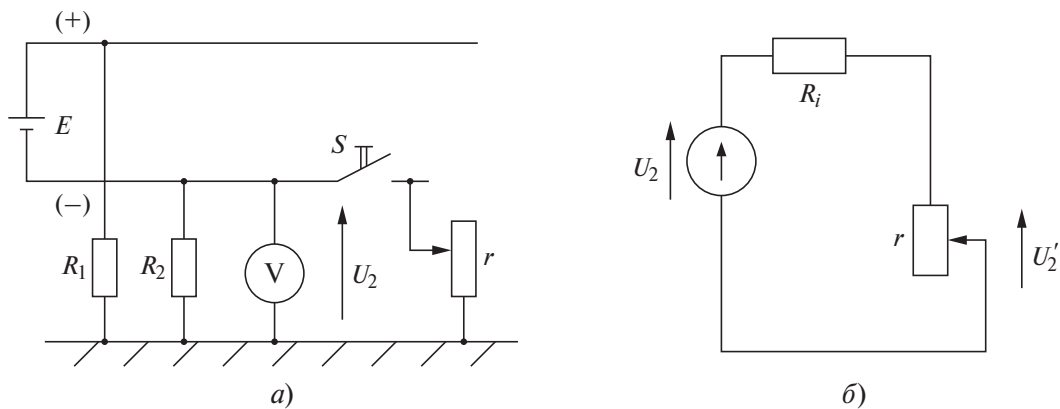


Рис. 3

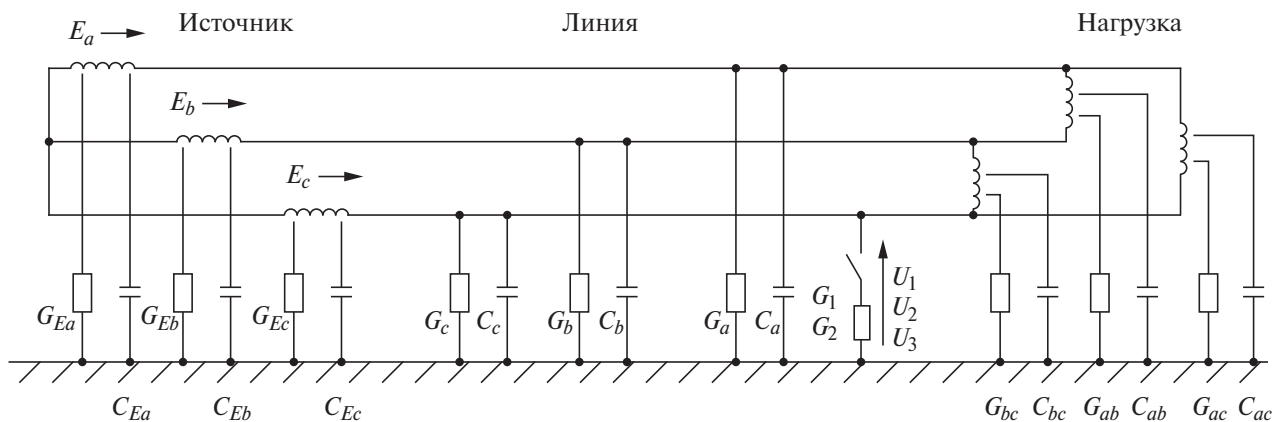


Рис. 4

нимых с внутренним сопротивлением R_V прибора.

Среди множества известных методов определения эквивалентного сопротивления изоляции сети [2, 3] можно выделить еще один (предложенный автором статьи) — с использованием регулируемого резистора (рис. 3). Он реализуется следующим образом. При разомкнутой кнопке S и максимальном сопротивлении резистора r вольтметром постоянного тока V измеряют напряжение U_2 (см. рис. 3, а). Затем, нажав кнопку S и постепенно уменьшая r , наблюдают за снижением этого напряжения. При достижении им половины исходного значения (т. е. $U'_2 = 0,5U_2$) кнопку отпускают. При сопротивлении изоляции, значительно меньшем, чем внутреннее сопротивление вольтметра, r равно эквивалентному сопротивлению изоляции сети R_i . Это следует непосредственно из теоремы Тевенена и рис. 3, б.

Определение сопротивления изоляции в многофазных сетях переменного тока

В сетях переменного тока параметры изоляции относительно земли также можно оп-

ределять с помощью вольтметра [4] (см. рис. 4). При произвольном числе фаз на основе результатов измерений напряжений на любом проводе относительно земли вычисляют значения эквивалентного сопротивления и суммарной емкости. При выводе формул принято произвольное распределение проводимости и емкости изоляции по отдельным фазам.

В общем случае эквивалентная проводимость изоляции

$$G_i = G_{Ea} + G_{Eb} + G_{Ec} + G_a + G_b + G_c + G_{ab} + G_{bc} + G_{ca},$$

а суммарная емкость

$$C_i = C_{Ea} + C_{Eb} + C_{Ec} + C_a + C_b + C_c + C_{ab} + C_{bc} + C_{ca},$$

где G_{Ea} , G_{Eb} , G_{Ec} и C_{Ea} , C_{Eb} , C_{Ec} ; G_a , G_b , G_c и C_a , C_b , C_c ; G_{ab} , G_{bc} , G_{ca} и C_{ab} , C_{bc} , C_{ca} — соответственно проводимости и емкости источника, линии и нагрузки. Продольные импедансы элементов сети не учитываются, а внутреннее сопротивление вольтметра принимается значи-

тельно большим, чем искомые параметры изоляции.

Среднеквадратичное значение напряжения на выбранной фазе измеряется при трех разных условиях: U_1 — при нормальной работе; U_2 — при включении резистора $R_1 = 1/G_1$ между этой фазой и землей; U_3 — при включении резистора $R_2 = 1/G_2$ вместо R_1 .

Согласно теореме Тевенена имеем

$$U_2 = \frac{U_1}{\left| \frac{1}{G_i + jB_i} + \frac{1}{G_1} \right|} = U_1 \frac{|G_i + jB_i|}{|G_i + G_1 + jB_i|}; \quad (5)$$

$$U_3 = \frac{U_1}{\left| \frac{1}{G_i + jB_i} + \frac{1}{G_2} \right|} = U_1 \frac{|G_i + jB_i|}{|G_i + G_2 + jB_i|}. \quad (6)$$

Подставив в эти выражения $\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = q_1 + 1$ и $\left(\frac{U_1}{U_3}\right)^2 = q_2 + 1$, получим два следующих уравнения, содержащих искомые величины G_i и B_i :

$$R_i = \frac{1}{G_i} = 2 \frac{\frac{q_2 - q_1}{R_1} \frac{R_2}{R_1}}{\frac{q_1 - q_2}{R_2} - \frac{q_2}{R_1^2}}; \quad (7)$$

$$B_i = \sqrt{\frac{G_1^2}{q_1} + \frac{2G_1}{q_1} G_i - G_i^2}. \quad (8)$$

Если резисторы R_1 и R_2 заменить конденсаторами $C_1 = B_1/\omega$ и $C_2 = B_2/\omega$, то

$$R_i = \frac{1}{G_i} = \frac{1}{\sqrt{\frac{B_2^2}{q_2} + \frac{2B_2}{q_2} B_i - B_i^2}}; \quad (9)$$

$$B_i = \frac{1}{2} \frac{B_2^2 q_1 - B_1^2 q_2}{B_1 q_2 - B_2 q_1}. \quad (10)$$

Другие (более сложные) пути определения параметров изоляции в трехфазной сети описаны в [5].

Расчетная оценка токов утечки и КЗ

Токи утечки, протекающие в сетях постоянного напряжения через места ослабленной

изоляции к земле, являются показателем ее состояния относительно земли, хотя эта зависимость неоднозначна.

Значение полного тока утечки можно вычислить по формуле, полученной из схемы замещения сети:

$$I_l = \frac{E}{R_1 + R_2}. \quad (11)$$

На практике известно значение эквивалентного сопротивления изоляции R_i , а не сопротивления изоляции отдельных полюсов относительно земли R_1 и R_2 . Используя формулы

$$U_1 = \frac{ER_1}{R_1 + R_2};$$

$$U_2 = \frac{ER_2}{R_1 + R_2};$$

$$R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

равенство (11) можно представить в виде

$$I_l = \frac{U_1 U_2}{ER_i}. \quad (12)$$

Напряжения полюсов U_1 и U_2 измеряют вольтметром с бесконечно большим внутренним сопротивлением R_V . Если же напряжения U_1 и U_2 измеряют поочередно одним и тем же вольтметром с внутренним сопротивлением R_V , то ток утечки

$$I_l = \frac{E}{R_V} \frac{U_1 U_2}{(U_1 + U_2)(E - U_1 - U_2)}. \quad (13)$$

Используя соотношение средних арифметического и геометрического значений $\frac{R_1 + R_2}{2} \geq \sqrt{R_1 R_2}$, получаем пригодное для практического использования неравенство

$$I_l = \frac{ER_1}{R_1 + R_2} \frac{ER_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{ER_i} = \frac{E}{R_i} \left(\frac{\sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + R_2} \right)^2 \leq \frac{E}{4R_i}. \quad (14)$$

Хотя согласно формуле (11) ток утечки зависит от сопротивлений изоляции отдельных полюсов R_1 и R_2 , его зависимость от эквивалентного сопротивления изоляции R_i

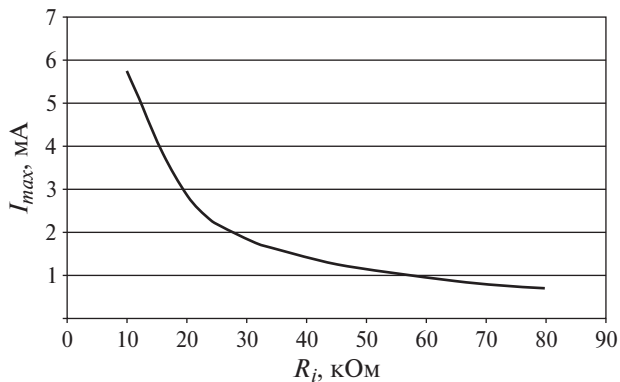


Рис. 5

неоднозначна. На рис. 5 показано максимальное значение этого тока для данного R_i в сети постоянного тока 220 В, определенное по формуле (14). Ток утечки равен нулю, когда сопротивление одного из резисторов R_1 или R_2 равно бесконечности.

Токи КЗ на землю целесообразно рассчитывать с помощью теоремы Тевенена. Например, ток КЗ положительного полюса, протекающий через переходное сопротивление R_{Π} в месте КЗ, вычисляется по формуле

$$I_{КЗ} = \frac{U_1}{R_i + R_{\Pi}}, \quad (15)$$

где U_1 — напряжение на полюсе до замыкания.

Очевидно ток глухого замыкания ($R_{\Pi} = 0$) $I_{КЗ} = U_1/R_i$. В самом неблагоприятном случае (проводимость изоляции $G_i = 1/R_i$ сосредоточена на противоположном полюсе) ток КЗ достигает своего максимума $I_{КЗ max} = E/R_i$.

В сетях переменного напряжения токи утечки замыкаются на землю через проводимости

и емкости изоляции. Для оценки угрозы пожара важно знать значение активной составляющей $I_{акт}$ тока утечки в отдельных фазах сети. Например, в фазе a ее можно оценить по формуле

$$I_{акт} = \frac{U_a}{R_a} \frac{U_{\Phi max}}{R_a} \frac{U_{\Phi max}}{R_i}, \quad (16)$$

где U_a — напряжение фазы a ; $U_{\Phi max}$ — максимальное напряжение любой фазы сети.

Значение тока глухого замыкания на землю I_{fa} в данной фазе a оценивается исходя из неравенства

$$\begin{aligned} \frac{U_{a pref}}{R_i} \leq I_{fa} &= \left| \frac{U_{a pref}}{Z_i} \right| \leq \frac{U_{\Phi max}}{|Z_i|} = \\ &= U_{\Phi max} \sqrt{\frac{1}{R_i^2} + B_i^2}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $U_{a pref}$ — напряжение фазы a до возникновения замыкания на землю.

Список литературы

1. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок. — Новости Электротехники, 2002, № 1.
2. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 167, Springer 2012.
3. Папенко Е. Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В. 2-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1972.
4. Иванов Е., Дьячков А. Как правильно измерить сопротивление изоляции электроустановок. — Новости Электротехники, 2002, № 2.
5. Папенко Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

olpio@o2.pl

ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ предприятий, организаций, НИИ и вузов!

Редакция журнала “Промышленная энергетика”

предлагает услуги по подготовке и выпуску на договорных условиях специальных (тематических) номеров журнала.

Телефоны для справок: (495) 234-74-49, 234-74-18, 234-74-20.