

УДК 621.311

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА УТЕЧКИ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Б.М. Бегентаев

Павлодарский государственный университет

им. С. Торайгырова

В трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью при повреждении изоляции требуется определить величину тока утечки. Для определения величины тока утечки разработан метод основанный на измерении величин модулей линейного напряжения и напряжения фаз А, В и С относительно земли до и после подключения активной дополнительной проводимости g_1 между фазой А электрической сети и землей.

При этом полагается, что имеет место повреждение изоляции между фазой А и землей электрической сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В.

По измеренным величинам модулей $U_{\text{л}}$ – линейного напряжения и напряжения фаз U_A , U_{A1} , $U_{\hat{A}}$, $U_{\hat{A}1}$, $U_{\hat{N}}$, $U_{\hat{N}1}$ относительно земли до и после подключения активной дополнительной проводимости g_1 и с учетом активной дополнительной проводимости производится определение тока утечки в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью по математической формуле

$$I_{\text{ут}} = \frac{\sqrt{3}U_{A1}^2 \sqrt{U_A^2 + 3U_{A1}^2 - \sqrt{3[4U_A^2 U_{A1}^2 - (U_C^2 - U_B^2)^2]}}}{U_A \sqrt{U_A^2 + 3U_{A1}^2 - \sqrt{3[4U_A^2 U_{A1}^2 - (U_{C1}^2 - U_{B1}^2)^2]}} - U_{A1} \sqrt{U_A^2 + 3U_{A1}^2 - \sqrt{3[4U_A^2 U_{A1}^2 - (U_C^2 - U_B^2)^2]}}} g_1. \quad (1)$$

Полученная математическая зависимость определения величины тока утечки по величинам модулей линейного напряжения и напряжения фаз U_A , U_{A1} , $U_{\hat{A}}$, $U_{\hat{A}1}$, $U_{\hat{N}}$, $U_{\hat{N}1}$ относительно земли до и после подключения активной дополнительной проводимости g_1 и с учетом активной дополнительной проводимости должна обеспечить удовлетворительную точность. Для определения изменения погрешности при определении тока утечки от измеряемых величинам линейного напряжения и напряжения фаз U_A ,

$U_{A1}, U_{\hat{A}}, U_{\hat{A}1}, U_{\hat{N}}, U_{\hat{N}1}$ относительно земли до и после подключения активной дополнительной проводимости и с учетом активной дополнительной проводимости исследуем на достоверность путем определения относительной среднеквадратичной погрешности.

Случайная относительная среднеквадратичная погрешность определения тока утечки в сети с изолированной нейтралью определяется из формулы (1)

$$I_{yt} = \frac{\sqrt{3U_{A1}^2 \sqrt{U_n^2 + 3U_A^2} - \sqrt{3[4U_n^2 U_A^2 - (U_C^2 - U_B^2)^2]}}}{U_A \sqrt{U_n^2 + 3U_{A1}^2} - \sqrt{3[4U_n^2 U_{A1}^2 - (U_{C1}^2 - U_{B1}^2)^2]}} g_1, \\ - U_{A1} \sqrt{U_n^2 + 3U_A^2} - \sqrt{3[4U_n^2 U_A^2 - (U_C^2 - U_B^2)^2]}$$

где $U_n, U_A, U_B, U_C, U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}, g_1$ – величины, определяющие ток утечки в сети с изолированной нейтралью, получаемые прямым измерением.

Относительная среднеквадратичная погрешность метода при определении тока утечки в сети с изолированной нейтралью определяется из выражения

$$\Delta I_{yt*} = \frac{1}{I_{yt}} \sqrt{\left(\frac{\partial I_{yt}}{\partial U_n}\right)^2 \Delta U_n^2 + \left(\frac{\partial I_{yt}}{\partial U_A}\right)^2 \Delta U_A^2 + \left(\frac{\partial I_{yt}}{\partial U_{A1}}\right)^2 \Delta U_{A1}^2 + \left(\frac{\partial I_{yt}}{\partial U_B}\right)^2 \Delta U_B^2 + \left(\frac{\partial I_{yt}}{\partial U_{B1}}\right)^2 \Delta U_{B1}^2 + \left(\frac{\partial I_{yt}}{\partial U_C}\right)^2 \Delta U_C^2 + \left(\frac{\partial I_{yt}}{\partial U_{C1}}\right)^2 \Delta U_{C1}^2 + \left(\frac{\partial I_{yt}}{\partial g_1}\right)^2 \Delta g_1^2}, \quad (2)$$

где $\frac{\partial I_{yt}}{\partial U_n}; \frac{\partial I_{yt}}{\partial U_A}; \frac{\partial I_{yt}}{\partial U_{A1}}; \frac{\partial I_{yt}}{\partial U_B}; \frac{\partial I_{yt}}{\partial U_{B1}}; \frac{\partial I_{yt}}{\partial U_C}; \frac{\partial I_{yt}}{\partial U_{C1}}; \frac{\partial I_{yt}}{\partial g_1}$ – частные производные функции $I_0 = f(U_n, U_A, U_B, U_C, U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}, g_1)$.

Здесь $\Delta U_n, \Delta U_A, \Delta U_B, \Delta U_C, \Delta U_{A1}, \Delta U_{B1}, \Delta U_{C1}, \Delta g_1$ – абсолютные погрешности прямых измерений величин $U_n, U_A, U_B, U_C, U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}, g_1$, которые определяются следующими выражениями:

$$\Delta U_n = U_n \Delta U_n^*; \quad \Delta U_A = U_A \Delta U_A^*; \quad \Delta U_B = U_B \Delta U_B^*; \quad \Delta U_C = U_C \Delta U_C^*; \\ \Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1}^*; \quad \Delta U_{B1} = U_{B1} \Delta U_{B1}^*; \quad \Delta U_{C1} = U_{C1} \Delta U_{C1}^*; \\ \Delta g_1 = g_1 \Delta g_1^*. \quad (3)$$

Для определения погрешности измерительных приборов принимаем, что $\Delta U_n^* = \Delta U_A^* = \Delta U_B^* = \Delta U_C^* = \Delta U_{A1}^* = \Delta U_{B1}^* = \Delta U_{C1}^* = \Delta g_1^* = \Delta U^*$,

где ΔU^* – относительная погрешность измерительных цепей напряжений;
 Δg_1^* – относительная погрешность измерительного прибора, измеряющего ток которое подключается между одной из фаз электроустановки и землей.

Для упрощения решения уравнений при определении относительной среднеквадратичной погрешности метода определения тока утечки в сети с изолированной нейтралью вводятся следующие обозначения:

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{U_{\text{л}}^2 + 3U_{\text{А}}^2 - \sqrt{12U_{\text{А}}^2 U_{\text{л}}^2 - 3(U_{\text{С}}^2 - U_{\text{В}}^2)}}; \\ B &= \sqrt{U_{\text{л}}^2 + 3U_{\text{А1}}^2 - \sqrt{12U_{\text{А1}}^2 U_{\text{л}}^2 - 3(U_{\text{С1}}^2 - U_{\text{В1}}^2)}}; \\ C &= \sqrt{12U_{\text{А}}^2 U_{\text{л}}^2 - 3(U_{\text{С}}^2 - U_{\text{В}}^2)}; \\ D &= \sqrt{12U_{\text{А1}}^2 U_{\text{л}}^2 - 3(U_{\text{С1}}^2 - U_{\text{В1}}^2)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Определяем частные производные функции $I_{\text{ут}} = f(U_{\text{л}}, U_{\text{А}}, U_{\text{В}}, U_{\text{С}}, U_{\text{А1}}, U_{\text{В1}}, U_{\text{С1}}, g_1)$ по переменным $U_{\text{л}}, U_{\text{А}}, U_{\text{В}}, U_{\text{С}}, U_{\text{А1}}, U_{\text{В1}}, U_{\text{С1}}, g_1$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{\text{ут}}}{\partial U_{\text{л}}} &= \sqrt{3}U_{\text{А1}}^2 g_1 \left[\frac{U_{\text{А}} U_{\text{л}} (B^2 D - A^2 C) - 6U_{\text{А}}^3 U_{\text{л}} D B^2 + 6U_{\text{А1}}^2 U_{\text{л}} U_{\text{А}} C A^2}{(U_{\text{А}} B - U_{\text{А1}} A)^2 B D A C} \right]; \\ \frac{\partial I_{\text{ут}}}{\partial U_{\text{А}}} &= \sqrt{3}U_{\text{А1}}^2 g_1 \left[\frac{3U_{\text{А}}^2 B (1 - 2U_{\text{л}}^2) - C B A^2}{(U_{\text{А}} B - U_{\text{А1}} A)^2 A C} \right]; \\ &2\sqrt{3}U_{\text{А1}} U_{\text{А}} g_1 A (B)^2 D - 2\sqrt{3}U_{\text{А1}}^2 (A)^2 B D - \\ \frac{\partial I_{\text{ут}}}{\partial U_{\text{А1}}} &= \frac{-3\sqrt{3}U_{\text{А1}}^3 U_{\text{А}} g_1 A + 6\sqrt{3}U_{\text{А1}}^3 U_{\text{А}} g_1 U_{\text{л}}^2 A}{(U_{\text{А}} B - U_{\text{А1}} A)^2 B D}; \\ \frac{\partial I_{\text{ут}}}{\partial U_{\text{В}}} &= \frac{-3\sqrt{3}U_{\text{А1}}^2 U_{\text{А}} U_{\text{В}} g_1 (U_{\text{С}}^2 - U_{\text{В}}^2) B}{(U_{\text{А}} B - U_{\text{А1}} A)^2 A C}; \quad \frac{\partial I_{\text{ут}}}{\partial U_{\text{В1}}} = \frac{3\sqrt{3}U_{\text{А1}}^2 U_{\text{А}} U_{\text{В1}} g_1 (U_{\text{С1}}^2 - U_{\text{В1}}^2) A}{(U_{\text{А}} B - U_{\text{А1}} A)^2 B D}; \\ \frac{\partial I_{\text{ут}}}{\partial U_{\text{С}}} &= \frac{3\sqrt{3}U_{\text{А1}}^2 U_{\text{А}} U_{\text{С}} g_1 (U_{\text{С}}^2 - U_{\text{В}}^2) B}{(U_{\text{А}} B - U_{\text{А1}} A)^2 A C}; \quad \frac{\partial I_{\text{ут}}}{\partial U_{\text{С1}}} = \frac{-3\sqrt{3}U_{\text{А1}}^2 U_{\text{А}} U_{\text{С1}} g_1 (U_{\text{С1}}^2 - U_{\text{В1}}^2) A}{(U_{\text{А}} B - U_{\text{А1}} A)^2 B D}; \\ \frac{\partial I_{\text{ут}}}{\partial g_1} &= \frac{\sqrt{3}U_{\text{А1}}^2 A}{U_{\text{А}} B - U_{\text{А1}} A}. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом принятого упрощения математического описания (4), решаем уравнение (2), подставив в него значения частных производных уравнения (5) и значения частных абсолютных погрешностей (3), при этом, полагая, что $\Delta U^* = \Delta^*$, тогда получим

$$\Delta_{\gamma^*} = \frac{1}{I_{\gamma^*}} \sqrt{3} U_{A1} g_1 \Delta \left| \frac{\begin{aligned} & \left[U_A U_{\beta} (B^2 D - A^2 C) - 6U_A^3 U_{\beta} D B^2 + \right]^2 + \\ & + 6U_{A1}^2 U_{\beta} U_A C A^2 \\ & + \left[2U_A A (B)^2 D - 2U_{A1} (A)^2 B D - \right]^2 \\ & + \left[-3U_{A1}^2 U_A A + 6U_{A1}^2 U_A U_{\beta}^2 A \right] \cdot [AC] + \\ & + [3U_{A1} U_A U_{C1} (U_{C1}^2 - U_{B1}^2) A] [AC] + \\ & + [3U_{A1} U_A U_{B1} (U_{C1}^2 - U_{B1}^2) A] \cdot [AC] + \\ & + [3U_{A1} U_A U_C (U_C^2 - U_B^2) B] \cdot [BD] + \\ & + [3U_{A1} U_A U_B (U_C^2 - U_B^2) B] \cdot [BD] + \\ & + U_{A1}^2 A^4 B^2 (U_A B - U_{A1} A)^2 [C] [D] + \\ & + [3U_A^2 B (1 - 2U_{\beta}^2) - C B A^2] B^2 D \end{aligned}}{\left[(U_A B - U_{A1} A)^2 B D A C \right]} \right|. \quad (6)$$

Для определения среднеквадратичной относительной погрешности подставляем в формулу (6) вместо I_{γ^*} формулу (1) после преобразования получим

$$\varepsilon_{I_{\gamma^*}} = \frac{\Delta I_{\gamma^*}}{\Delta} = \left| \frac{\begin{aligned} & \left[U_A U_{\beta} (B^2 D - A^2 C) - 6U_A^3 U_{\beta} D B^2 + 6U_{A1}^2 U_{\beta} U_A C A^2 \right] + \\ & + \left[2U_A A (B)^2 D - 2U_{A1} (A)^2 B D - 3U_{A1}^2 U_A A + \right]^2 \\ & + 6U_{A1}^2 U_A U_{\beta}^2 A \\ & + [3U_{A1} U_A U_{C1} (U_{C1}^2 - U_{B1}^2) A] [AC] + \\ & + [3U_{A1} U_A U_{B1} (U_{C1}^2 - U_{B1}^2) A] \cdot [AC] + \\ & + [3U_{A1} U_A U_C (U_C^2 - U_B^2) B] \cdot [BD] + \\ & + [3U_{A1} U_A U_B (U_C^2 - U_B^2) B] \cdot [BD] + \\ & + U_{A1}^2 A^4 B^2 (U_A B - U_{A1} A)^2 [C] [D] + \\ & + [3U_A^2 B (1 - 2U_{\beta}^2) - C B A^2] B^2 D \end{aligned}}{\left[(U_A B - U_{A1} A)^2 B D A C \right]} \right|. \quad (7)$$

Полученное уравнение (7) выразим в относительных единицах

$$\varepsilon_{I_{\gamma^*}} = \Delta \left| \frac{\begin{aligned} & \left[0,57U_* b^2 d - 1,55U_*^3 b^2 d - 0,57U_* a^2 c + 1,57U_{1*}^2 U_* a^2 c \right] + \\ & + \left[1,15U_* a (b)^2 d - 1,15U_{1*} (a)^2 b d - 0,57U_{1*}^2 U_* a + \right]^2 \\ & + 1,57U_{1*}^2 U_* a \\ & + 0,33U_{1*}^2 (a)^4 (b)^2 (0,57U_* b - 0,57U_{1*} a)^2 [c] [d] + \\ & + [0,57U_*^3 b + (a)^2 c b] (b)^2 d \end{aligned}}{(U_* b - U_{1*} a)^2 (b d a d)^2} \right|, \quad (8)$$

где $\dot{a} = 1 - U_*$; $\dot{b} = 1 - U_{1*}$; $c = 2U_*$; $d = 2U_{1*}$; $U_* = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}U_{\phi}}$;
 $U_{1*} = \frac{U_{\Delta 1}}{\sqrt{3}U_{\phi}}$

На основе полученного результата случайной относительной среднеквадратичной погрешности определения тока утечки в несимметричной сети изолированной нейтралью строим зависимости

$$\varepsilon_{I_{ym}} = \frac{\Delta I_{ym*}}{\Delta} = f(U_*; U_{1*}),$$

представленные на рис. 1.

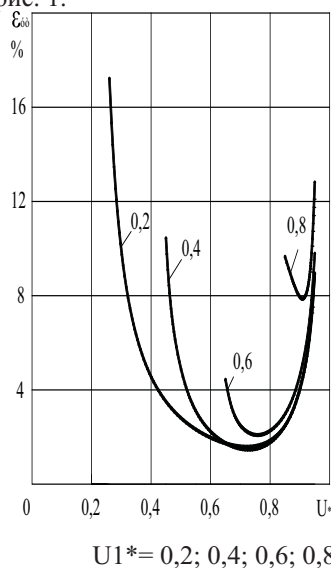


Рисунок 1 - Анализ погрешности метода определения тока утечки в сети с изолированной нейтралью

Математическая зависимость относительной среднеквадратичной погрешности приведенной на рис. 1 характеризует изменение погрешности в зависимости от величины активной дополнительной проводимости, которая вводится между фазой электрической сети и землей.

При определении тока утечки в сети с изолированной нейтралью подбор активной дополнительной проводимости производится на основе графической иллюстрации

рис. 1 таким образом, чтобы $U_* = 0,3 - 0,9$, при $U_{1*} = 0,2 - 0,8$, для обеспечения погрешности до 10 % при использовании измерительных приборов с кл. точности 1.0. При использовании измерительных приборов с кл. точности 0,5 погрешность метода не превышает 5 %.

На основе вышеизложенного следует, что разработанный метод определения тока утечки в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В при повреждении изоляции одной из фаз электрической сети относительно земли обеспечивает удовлетворительную точность. Следует отметить, метод прост и безопасен

при производстве работ по измерению величин модулей линейного напряжения и напряжения фаз U_A , U_{A1} , $U_{\hat{A}}$, $U_{\hat{A}1}$, U_N , U_{N1} относительно земли до и после подключения активной дополнительной проводимости. Для подключения активной дополнительной проводимости между фазой электрической сети и землей используется фаза резервного выключателя нагрузки распределительного устройства 0,4 кВ.

Түйіндеме

Осы жұмыста кернеуі 1000 В дейін бейтарабы оқшауланған тарапта кему тогының анықтау әдісінің қателік талдауы көрсетілген. Кернеуі 1000 В дейін бейтарабы оқшауланған үш фазалы электрлік тарапта оңашалау зақым келуі жанында біреудің электр торабы фазаларынан жер салыстырмалы кему тогының анықтау әдіс орташа дәлдікті қамсыздандырады.

Resume

*In work presented analysis of inaccuracy of method of determination of current of drain in electrical network with insulated neutral. On the base which follows that designed method of determination of current of drain in **трехфазной to electrical network** with insulated neutral by the voltage before 1000 V when damaging an insulating one of the phases to electrical network for land ensures satisfactory accuracy.*