

---

---

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

---

---

УДК 621.316

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЗЕМЛЕ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ 6—35 кВ ПО РЕЖИМНЫМ ПАРАМЕТРАМ

А.И. Сидоров, Н.А. Хусаинова, А.Л. Шестаков

e-mail: sai@bgd.tu-chel.ac.ru

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Надежность систем электроснабжения во многом определяется безаварийной работой линий электропередачи, значительную часть которых составляют распределительные сети напряжением 6—35 кВ. Известно, что большая часть повреждений в системах электроснабжения (примерно до 80% от общего числа повреждений) приходится именно на распределительные сети.

Наиболее распространенным видом повреждения в этих сетях являются однофазные замыкания на землю, которые заканчиваются пробоем изоляции в ее ослабленных местах. Подобные повреждения происходят из-за старения изоляции, поэтому до сих пор остается актуальной задача обеспечения эффективного непрерывного контроля состояния изоляции и на его основе своевременного обнаружения и устранения дефектов изоляции.

Большинство существующих методов и средств контроля изоляции реагируют на состоявшееся повреждение и не позволяют выявить наметившееся снижение уровня изоляции и определить место этого снижения. Кроме того, для реализации каждого метода требуется или установка дополнительного оборудования, или введение при некоторых схемах измерения оперативного тока, ухудшающего качество электроснабжения потребителей.

Принципиально новым является определение параметров изоляции распределительной сети относительно земли по результатам измерения текущих значений режимных параметров (напряжения фазы относительно земли, тока фазы и угла сдвига между вектором напряжения фазы относительно земли и тока фазы), измеренных как в начале, так и в конце линии [1, 2]. Этот способ позволяет произвести определение параметров изоляции фаз сетей относительно земли и места ее локального повреждения под рабочим напряжением, при включенных токоприемниках, и ориентирован на использование для измерения режимных параметров штатного оборудования, уже имеющегося в распределительных сетях. В работах [1, 2] рассмотрен частный и наиболее простой вид распределительной сети, а именно симметричная линия электропередачи между двумя подстанциями. Поэтому необходимо этот метод развить и выявить наиболее общие закономерности взаимосвязи параметров изоляции с режимными параметрами с учетом влияния статических источников компенсации реактивной мощности, несимметрии сетей и исследовать чувствительность метода к выбору расчетных формул и точности измерения режимных параметров.

Для вывода расчетных формул были использованы два типа схем замещения линии электропередачи: П-образная (Рис. 1,а) и Т-образная (рис. 1,б).

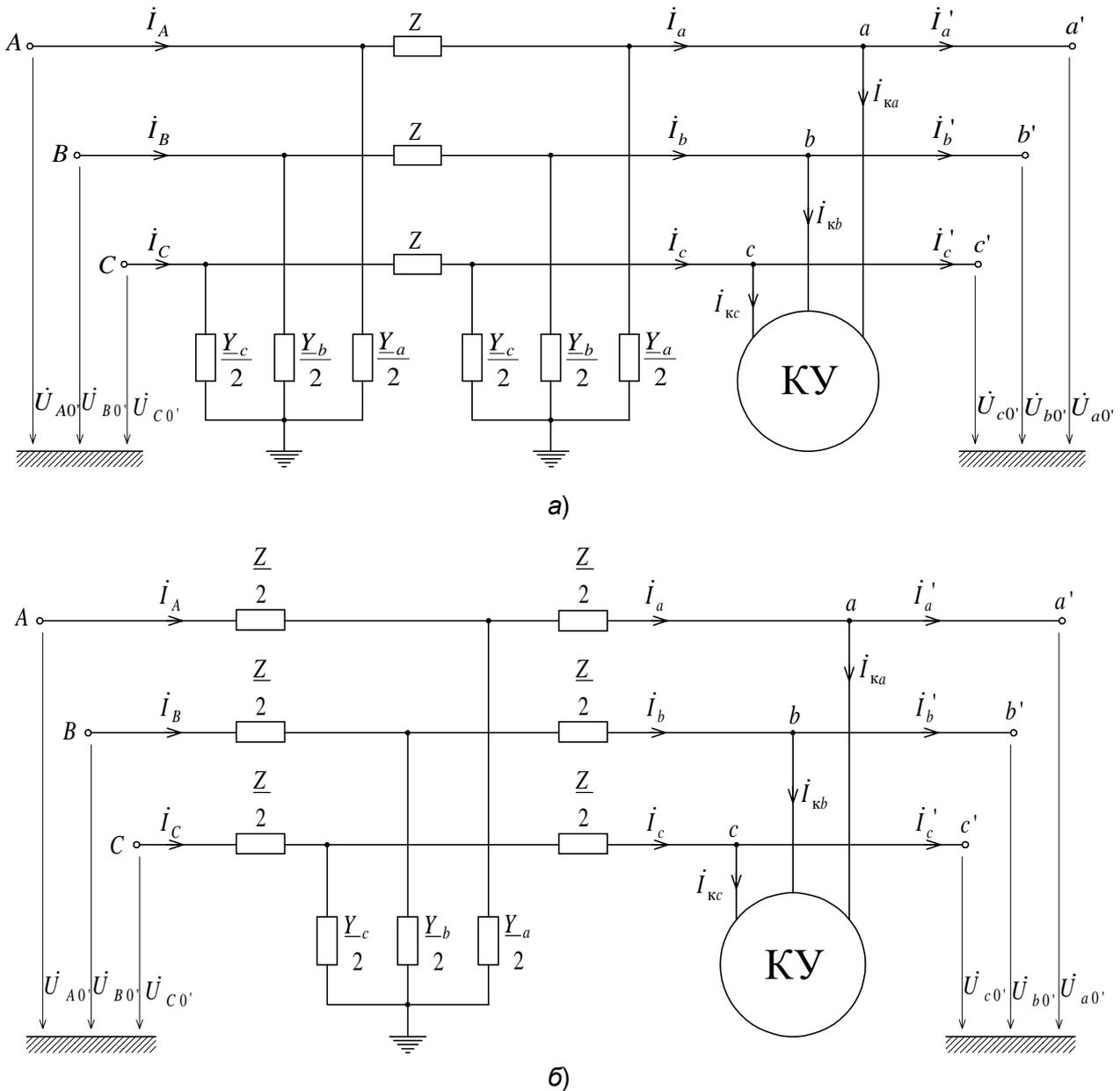


Рис. 1. Схемы замещения трехфазной линии электропередачи  
 а) П-образная; б) Т-образная.

На рис. 1 введены следующие обозначения:

$I_A, I_B, I_C$  — токи в начале линии, А;

$I_a, I_b, I_c$  — токи в конце линии, А;

$\underline{Z}$  — продольное комплексное сопротивление линии, Ом;

$\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$  — комплексные проводимости изоляции фаз  $a, b$ , и  $c$ , см;

$I_{ka}, I_{kb}, I_{kc}$  — токи компенсирующего устройства, А;

$I'_a, I'_b, I'_c$  — токи в нагрузках потребителей, А;

$U_{A0'}, U_{B0'}, U_{C0'}$  — напряжения на входе линии по отношению к земле, В;

$U_{a0'}, U_{b0'}, U_{c0'}$  — напряжения на выходе линии по отношению к земле, В;

На участке линии от начала до компенсирующего устройства нет связи между фазами линии, кроме емкостной проводимости. Эти проводимости можно учесть путем соответствующих преобразований в проводимости изоляции относительно земли, поэтому для анализа можно выделить одну фазу  $A$ , схемы замещения которой представлены на рис. 2.

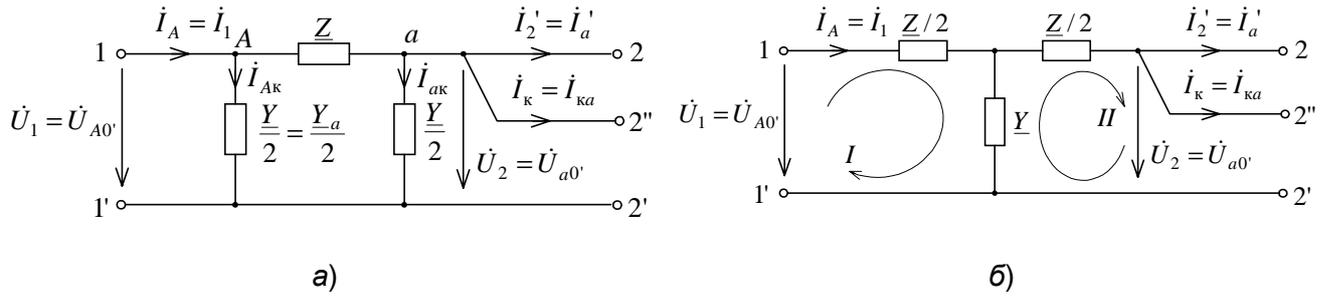


Рис. 2. Схема замещения фазы А

а) П-образная; б) Т-образная

На этой схеме напряжение на входе  $\dot{U}_{A0'}$  обозначено через  $\dot{U}_1$ , а напряжение на выходе  $\dot{U}_{a0'}$  — через  $\dot{U}_2$ . Соответственно ток на входе  $I_A$  обозначим через  $I_1$ , а ток на выходе  $I_a = I_2$ ; ток фазы "а" компенсирующего устройства  $I_{ka}$  через  $I_k$ , а ток в нагрузке  $I_a' = I_2'$ .

Для П-образной схемы замещения возможны три варианта определения проводимости изоляции в зависимости от выбора опорных точек (в начале, конце или в середине линии), режимные параметры которых использованы для определения параметров изоляции. Условно эти формулы были названы формулами "по началу", "по концу" линии и "общей":

1) по началу линии (точка А)

$$\frac{Y}{2} = \frac{I_{Aи}}{\dot{U}_{A0'}} = \frac{I_1 - I}{\dot{U}_1};$$

2) по концу линии (точка а)

$$\frac{Y}{2} = \frac{I_{aи}}{\dot{U}_{a0'}} = \frac{I - I_2}{\dot{U}_2};$$

3) общая формула для сечения, охватывающего узлы а и А,

$$\frac{Y}{2} = \frac{I_{Aи}}{\dot{U}_{A0'}} = \frac{I_1 - I}{\dot{U}_1}.$$

После соответствующих преобразований были получены следующие формулы для определения активной и емкостной проводимостей относительно земли:

1) по началу

$$G_{и} = 2 \frac{z l_1 \cos \varphi_1' - U_1 \cos \varphi + U_2 \cos (\varphi + \psi)}{z U_1};$$

$$B_{и} = 2 \frac{-z l_1 \sin \varphi_1' + U_1 \sin \varphi - U_2 \sin (\varphi + \psi)}{z U_1};$$

2) по концу

$$G_{и} = 2 \frac{(U_1 \cos \psi - U_2) R + X U_1 \sin \psi - z^2 \left[ I_2' \cos (-\varphi_2') + I_k \cos \psi_k \right]}{z^2 U_2};$$

$$B_{и} = 2 \frac{(U_1 \cos \psi - U_2) X - R U_1 \sin \psi + z^2 \left[ I_2' \sin (-\varphi_2') + I_k \sin \psi_k \right]}{z^2 U_2};$$

3) общая

$$G_{и} = \frac{a}{c}, \quad B_{и} = \frac{b}{c},$$

где

$$a = U_1 [I_1 \cos \varphi_1' - I_2 \cos (\varphi_2' + \psi) - I_K \cos (\psi_K + \psi)] + U_2 [I_1 \cos (\psi - \varphi_1') - I_2' \cos \varphi_2' - I_K \cos \psi_K],$$

$$b = U_1 [-I_1 \sin \varphi_1' + I_2 \sin (\varphi_2' + \psi) - I_K \cos (\psi_K - \psi)] + U_2 [I_1 \sin (\psi - \varphi_1') + I_2' \cos \varphi_2' - I_K \cos \psi_K],$$

$$c = U_1^2 + 2U_1U_2 \cos \psi + U_2^2.$$

Для Т-образной схемы замещения также возможны три варианта формул определения проводимости изоляции, одна из которых приведена в работе [2] остальные две приведены ниже:

1) по началу линии

$$\frac{1}{\underline{Y}} = \underline{Z}_{и} = \frac{\dot{U}_1 - \frac{Z}{2} i_1}{(i_1 + i_2)};$$

2) по концу линии

$$\frac{1}{\underline{Y}} = \underline{Z}_{и} = \frac{\dot{U}_2 + \frac{Z}{2} i_2}{i_1 - i_2}.$$

После соответствующих преобразований были получены следующие формулы для определения активной и емкостной проводимостей:

1) по началу линии

$$\underline{Z}_{и} = \frac{a + jb}{c},$$

где

$$a = I_1 U_1 \cos \varphi_1' - \frac{Z}{2} I_1^2 \cos \varphi - U_1 [I_2' \cos (\psi + \varphi_2') + I_K \cos (\psi - \psi_K)] + \frac{Z}{2} I_1 [I_2' \cos (\psi + \varphi - \varphi_1' + \varphi_2') + I_K \cos (\psi + \varphi - \varphi_1' - \psi_K)],$$

$$b = I_1 U_1 \sin \varphi_1' - \frac{Z}{2} I_1^2 \sin \varphi - U_1 [I_2' \sin (\psi + \varphi_2') + I_K \sin (\psi + \psi_K)] + \frac{Z}{2} I_1 [I_2' \sin (\psi + \varphi - \varphi_1' + \varphi_2') + I_K \sin (\psi + \varphi - \varphi_1' - \psi_K)],$$

$$c = I_1^2 + I_1'^2 + I_K^2 - 2I_1 I_1' \cos (\psi - \varphi_1' + \varphi_2') - 2I_1 I_K \cos (\psi - \varphi_1' - \psi_K) + 2I_2' I_K \cos (\varphi_2' + \psi_K).$$

2) по концу линии

$$\underline{Z}_{и} = \frac{a + jb}{c},$$

где

$$a = U_2 (I_1 \cos (\varphi_1' - \psi) - I_2' \cos \varphi_2' - I_K \cos \psi_K) +$$

$$+ \frac{Z}{2} \left\{ I_1 [I_2' \cos (\varphi - \varphi_2' - \psi + \varphi_1') + I_K \cos (\varphi + \psi_K - \psi + \varphi_1')] - [I_2'^2 + I_K^2 + 2I_2' I_K \cos (\varphi_2' + \psi_K)] \cos \varphi \right\};$$

$$\begin{aligned}
 b &= U_2 \left( I_1 \sin(\varphi_1' - \psi) - I_2' \sin \varphi_2' - I_K \sin \psi_K \right) + \\
 &+ \frac{Z}{2} \left\{ I_1 \left[ I_2' \sin(\varphi - \varphi_2' - \psi + \varphi_1') + I_K \sin(\varphi + \psi_K - \psi + \varphi_1') \right] - \left[ I_2'^2 + I_K^2 + 2I_2' I_K \cos(\varphi_2' + \psi_K) \right] \cos \varphi \right\}. \\
 c &= \left( i_1 - i_2' - i_K \right) \left( i_1^* - i_2'^* - i_K^* \right) = i_1^2 + i_2'^2 + i_K^2 + i_2' i_K^* + i_2'^* i_K' - i_1 \left( i_2'^* + i_K^* \right) - i_1^* \left( i_2' + i_K \right) = \\
 &= i_1^2 + i_2'^2 + i_K^2 - 2 \left[ I_1 I_2 \cos(\psi + \varphi_2' - \varphi_1') + I_1 I_K \cos(\psi_K - \psi + \varphi_1') + 2I_2' I_K \cos(\psi_K + \varphi_2') \right].
 \end{aligned}$$

Для выявления преимуществ и недостатков, представленных выше формул, и выбора оптимальных из них было проведено аналитическое исследование. Для этого сначала на цифровой модели участка сети (рис. 1,а или рис. 1,б) определялись измеряемые величины, то есть напряжения, токи и углы сдвига, входящие в рассматриваемые формулы. Затем моделировались погрешности измерений и по формулам определялись проводимости изоляции. Полученные значения сопоставлялись с "действительными значениями", теми, которые использовались в цифровой модели участка сети.

Это исследование показало, что минимальную погрешность дают "общие" формулы для П-образной схемы замещения, которые и рекомендуется использовать для определения параметров изоляции сети относительно земли.

## Заключение

Аналитические исследования сетей 6—35 кВ с изолированной нейтралью позволили установить взаимосвязь параметров изоляции с режимными параметрами и вывести 5 групп формул в зависимости от выбора схемы замещения и опорной точки, относительно которой записываются уравнения. Численные эксперименты, выполненные с помощью цифровой модели, показали, что наиболее качественный результат дают "общие" формулы определения активной и емкостной проводимостей изоляции на основании измерения входных и выходных режимных параметров сети.

## Список литературы

1. Сельницин А.А., Сидоров А.И., Бендяк Н.А. Способ определения сопротивления изоляции сетей с изолированной нейтралью напряжением 6—35 кВ // Контроль изоляции в распределительных сетях: тезисы докладов научно-практической конференции. — Челябинск. — 1992. — С. 13.
2. Лапченков К.В. Управление состоянием изоляции в распределенных электрических сетях: // Дис. канд. техн. наук. — Челябинск, 1998. — 116 с.