

**ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

ГРЕБЧЕНКО Н.В.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ
КОМПЛЕКСНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ФАЗ ПО
ОТНОШЕНИЮ К ЗЕМЛЕ**

ДОНЕЦК - 2005

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Непрерывная оценка состояния изоляции по отношению к земле путем анализа ее комплексной проводимости является более полной по сравнению с анализом только активной составляющей этой проводимости.

В отличие от известных разработанная методика определения комплексной проводимости изоляции в рабочих режимах присоединений применяется без отключения присоединений и специального создания несимметрии проводимостей.

В методике в качестве входной информации используются векторы токов фаз присоединения и векторы напряжений фаз относительно земли, которые определяются по мгновенным значениям токов и напряжений. Поэтому для применения рассматриваемого метода в случае, когда в качестве входной информации используются показания измерительных приборов, определяются соответствующие векторы.

Отличительной особенностью метода при его применении в рабочем режиме (без отключения присоединения) является использование естественной несимметрии проводимостей изоляции фаз. В связи с этим точность определения токов и напряжений должна быть не ниже 0,05 %. Требования к точности измерения токов и напряжений снижаются при наличии "металлического" замыкания на землю на контролируемом присоединении или при замыкании через небольшое сопротивление, а также при создании на нем искусственной несимметрии путем подключения одной из фаз к земле через емкость.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Кабельные и воздушные линии питания нагрузки напряжением 0,4 кВ, 6-35 кВ.

НЕОБХОДИМЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Зависят от выбранного пользователем режима определения проводимостей:

- при непрерывном автоматическом определении проводимостей изоляции для контролируемого присоединения выполняется измерение мгновенных значений токов трех фаз и напряжений фаз по отношению к земле (для таких измерений используются специальные преобразователи, основу которых составляют АЦП, или цифровые регистраторы типа РЕГИНА, РЕКОН и т.д.);

- при периодическом определении проводимостей изоляции для контролируемого присоединения выполняется измерение действующих значений токов трех фаз и напряжений фаз по отношению к земле, а также действующие значения активной мощности каждой фазы, соответствующей указанным токам и напряжениям.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ

Основан на аналитическом описании рабочего режима в соответствии со схемой замещения присоединения нагрузки. Проводимости изоляции фаз определяются в результате решения системы уравнений или по специальным аналитическим выражениям. Для этого на основании исходных данных определяются векторы токов трех фаз и напряжений фаз по отношению к земле.

Задача оценки состояния изоляции формулируется как задача синтеза параметров электрической цепи при известной ее схеме и значениях токов и напряжений, характеризующих режим работы этой цепи. Изоляция учитывается соответствующими элементами в схеме электрической цепи. Изменения значений

поперечных проводимостей присоединения происходит вследствие изменения состояния изоляции (старение, увлажнение, загрязнение и т.д.).

Схема замещения присоединения 6-10 кВ линия-нагрузка с заменой ее элементов на соответствующие проводимости, приведена на рис.1.

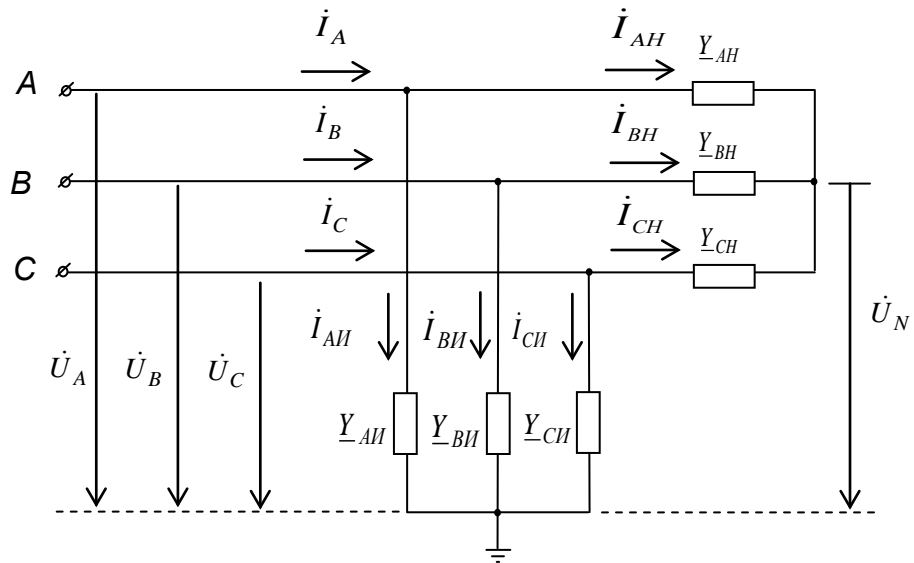


Рис. 1. Схема замещения электрического присоединения сети с изолированной нейтралью

В соответствии со схемой замещения присоединения (рис.1) соотношение для векторов фазных токов присоединения \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C в нормальном режиме работы в матричной форме записи:

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{I}}_{\text{И}} + \dot{\mathbf{I}}_{\text{Н}} = \underline{\mathbf{Y}}_{\text{ИД}} \dot{\mathbf{U}} + \underline{\mathbf{Y}}_{\text{НД}} (\dot{\mathbf{U}} - \dot{U}_N) \quad (1)$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{AI} \\ \dot{I}_{BI} \\ \dot{I}_{CI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{I}_{AH} \\ \dot{I}_{BH} \\ \dot{I}_{CH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{AI} & & \\ & \underline{Y}_{BI} & \\ & & \underline{Y}_{CI} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Y}_{AH} & & \\ & \underline{Y}_{BH} & \\ & & \underline{Y}_{CH} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_A - \dot{U}_N \\ \dot{U}_B - \dot{U}_N \\ \dot{U}_C - \dot{U}_N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где \dot{I}_{AH} , \dot{I}_{BH} , \dot{I}_{CH} - векторы токов фаз нагрузки присоединения;

\dot{I}_{AI} , \dot{I}_{BI} , \dot{I}_{CI} - векторы токов через изоляцию фаз присоединения;

\underline{Y}_{AI} , \underline{Y}_{BI} , \underline{Y}_{CI} - поперечные комплексные проводимости изоляции фаз по отношению к земле (диагональная матрица $\underline{\mathbf{Y}}_{\text{ИД}}$);

\dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C - векторы напряжений фаз присоединения по отношению к земле;

\underline{Y}_{AH} , \underline{Y}_{BH} , \underline{Y}_{CH} - продольные фазные комплексные проводимости нагрузки присоединения (диагональная матрица $\underline{\mathbf{Y}}_{\text{НД}}$);

\dot{U}_N - напряжение нейтрали присоединения по отношению к земле

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{AH} + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{BH} + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{CH}}{\underline{Y}_{AH} + \underline{Y}_{BH} + \underline{Y}_{CH}}. \quad (3)$$

Продольные и поперечные комплексные проводимости кабельной или воздушной линии присоединения учитываются в соответствующих проводимостях нагрузки присоединения.

Из соотношения (2) векторы фазных токов присоединения:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{AI} + (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \underline{Y}_{AH}, \quad (4)$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{BI} + (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \underline{Y}_{BH}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{CI} + (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \underline{Y}_{CH}. \quad (6)$$

Для полученной системы уравнений (4) - (6) в рабочих режимах могут непрерывно определяться векторы фазных токов \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C , векторы напряжений фаз по отношению к земле \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C и вектор напряжения нейтрали присоединения по отношению к земле \dot{U}_N . В уравнениях (4) – (6) неизвестными являются продольные фазные комплексные проводимости нагрузки присоединения \underline{Y}_{AH} , \underline{Y}_{BH} , \underline{Y}_{CH} и поперечные комплексные проводимости изоляции фаз по отношению к земле \underline{Y}_{AI} , \underline{Y}_{BI} , \underline{Y}_{CI} . Задача состоит в определении комплексных проводимостей изоляции фаз. В трех уравнениях имеется шесть неизвестных, поэтому систему уравнений в таком виде решить нельзя. Для решения системы она либо должна быть дополнена новыми уравнениями либо часть неизвестных исключена из уравнений (4) – (6). При этом чтобы не усложнять решение основной задачи, определение продольных проводимостей нагрузки присоединения и их использование в расчетах по возможности нужно исключить.

Если продольные фазные комплексные проводимости нагрузки присоединения \underline{Y}_{AH} , \underline{Y}_{BH} , \underline{Y}_{CH} известны, то параметры изоляции фаз определяются из (4) – (6) следующим образом:

$$\underline{Y}_{AH} = \frac{I}{\dot{U}_A} [\dot{I}_A - (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \underline{Y}_{AH}], \quad (7)$$

$$\underline{Y}_{BH} = \frac{I}{\dot{U}_B} [\dot{I}_B - (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \underline{Y}_{BH}], \quad (8)$$

$$\underline{Y}_{CH} = \frac{I}{\dot{U}_C} [\dot{I}_C - (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \underline{Y}_{CH}]. \quad (9)$$

В случае равенства проводимостей фаз нагрузки $\underline{Y}_{AH} = \underline{Y}_{BH} = \underline{Y}_{CH}$ определение проводимостей изоляции несколько упрощается, т.к. отпадает необходимость в измерении напряжения смещения нейтрали \dot{U}_N . Это следует из того, что выражение (3) приобретает следующий вид:

$$\dot{U}_N = \frac{I}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \quad (10)$$

т.е. напряжение смещения \dot{U}_N рассчитывается по известным напряжениям фаз относительно земли. Однако следует иметь ввиду, что в выражении (10) векторы напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C зависят не только от величины комплексных проводимостей изоляции фаз присоединения \underline{Y}_{AI} , \underline{Y}_{BI} , \underline{Y}_{CI} , но на них оказывают влияние режим и параметры элементов всей электрически связанной сети.

Например, в случае когда комплексные продольные проводимости всех фаз нагрузки равны друг другу, т.е. $\underline{Y}_{AH} = \underline{Y}_{BH} = \underline{Y}_{CH}$, уравнения записываются следующим образом:

$$\dot{U}_A(\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{U}_B(\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{BI} = \dot{I}_A(\dot{U}_B - \dot{U}_N) - \dot{I}_B(\dot{U}_A - \dot{U}_N), \quad (11)$$

$$\dot{U}_B(\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{BI} - \dot{U}_C(\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{CI} = \dot{I}_B(\dot{U}_C - \dot{U}_N) - \dot{I}_C(\dot{U}_B - \dot{U}_N), \quad (12)$$

$$\dot{U}_A(\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{U}_C(\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{Y}_{CI} = \dot{I}_A(\dot{U}_C - \dot{U}_N) - \dot{I}_C(\dot{U}_A - \dot{U}_N), \quad (13)$$

Применение методики допустимо, если погрешность определения продольных проводимостей фаз нагрузки ΔG_H или отличие продольных проводимостей фаз нагрузки друг от друга не превышает 0,1 %.

В случае контроля параметров режима с помощью измерительных приборов, измеряющих действующие значения, для определения векторов токов и напряжений для уравнений (11) – (13) необходимо выполнить измерение амплитуды токов фаз I_A , I_B , I_C , амплитуды напряжений фаз относительно земли U_A , U_B , U_C и значений активных мощностей, потребляемых по фазам P_A , P_B , P_C . Ваттметры включаются на фазные токи и соответствующие напряжения фаз по отношению к земле.

При определении векторов напряжений принимается, что в нормальном рабочем режиме присоединения при симметричной нагрузке и отсутствии дефектов изоляции вектор напряжения фазы А совпадает с мнимой осью $+j$ комплексной плоскости. Соответственно угол между вектором \dot{U}_A и осью действительных величин $+1$ составляет 90 эл.град. Амплитуды всех трех линейных напряжений равны между собой $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$. Следовательно, векторы линейных напряжений образуют равносторонний треугольник. В основу метода определения векторов напряжений положено то, что при снижении величины активного сопротивления, нарушается симметрия напряжений фаз относительно земли, но треугольник линейных напряжений не изменяется, т.е. остается равносторонним.

На рис.2 приведена векторная диаграмма напряжений присоединения при снижении активного сопротивления изоляции фазы А относительно земли. Из треугольника, который образуют векторы \dot{U}_{A3} , \dot{U}_{B3} и вектор линейного напряжения \dot{U}_L между фазами А и В, в соответствии с теоремой косинусов:

$$U_B^2 = U_A^2 + U_L^2 - 2U_A \cdot U_L \cdot \cos \alpha$$

Отсюда

$$\cos \alpha = \frac{U_A^2 + U_L^2 - U_B^2}{2U_A \cdot U_L}$$

Из рис.2 угол δ между вектором \dot{U}_A и осью действительных величин:

$$\delta = \frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{6} - \alpha \right) = \frac{2}{3}\pi - \arccos \frac{U_A^2 + U_{Л}^2 - U_B^2}{2U_A \cdot U_{Л}},$$

где U_A , U_B , $U_{Л}$ - действующие значения напряжений фаз относительно земли и междуфазного напряжения.

При значительном снижении активного сопротивления изоляции вектор одного из напряжений фаз увеличивается настолько, что начала векторов выходят за пределы треугольника линейных напряжений (рис.3). В этом случае угол δ рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\delta = \frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) = \frac{2}{3}\pi + \alpha.$$

Подобно предыдущему определяются углы ν и ρ соответственно между векторами напряжений фаз С и В и осью действительных величин. Для треугольника, сторонами которого являются векторы \dot{U}_A , \dot{U}_C и вектор линейного напряжения $\dot{U}_{Л}$ (рис.2):

$$U_A^2 = U_C^2 + U_{Л}^2 - 2U_C \cdot U_{Л} \cdot \cos \chi,$$

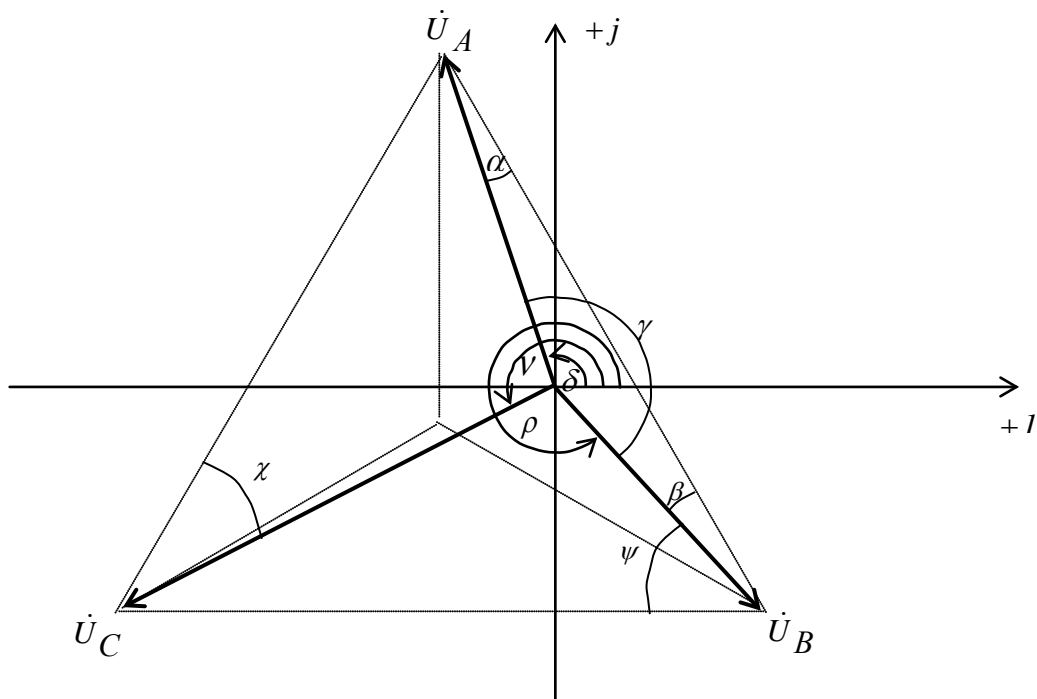


Рис. 2 - Векторная диаграмма напряжений при снижении активного сопротивления изоляции фазы А относительно земли

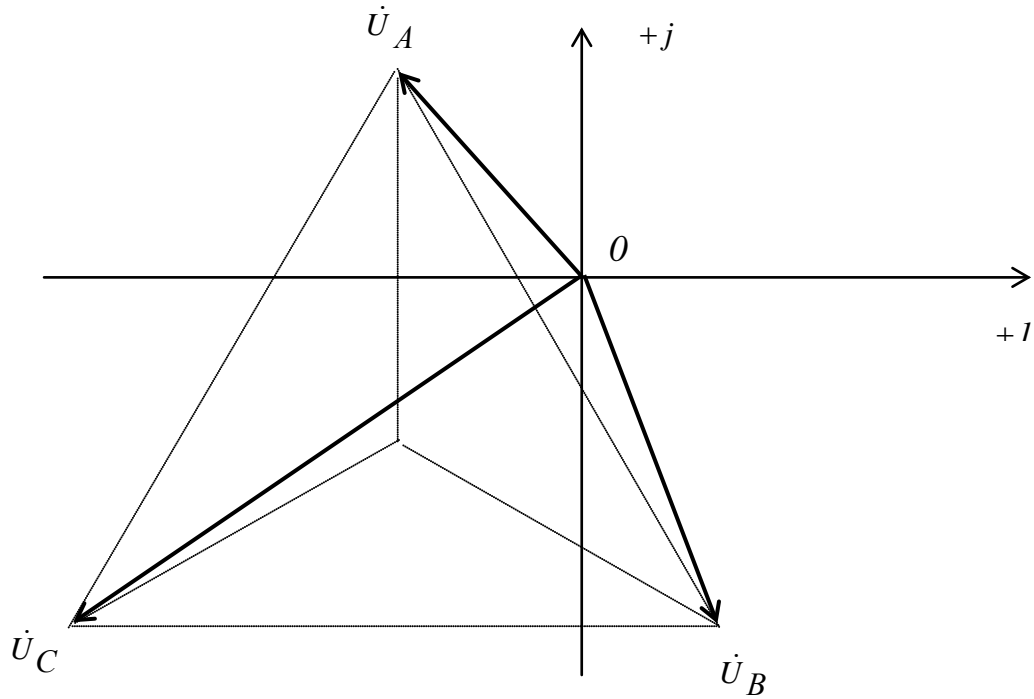


Рис. 3 - Векторная диаграмма напряжений при значительном снижении активного сопротивления изоляции фазы А относительно земли ($U_C > 1,5U_\phi$)

Откуда $\cos \chi = \frac{U_C^2 + U_L^2 - U_A^2}{2U_C \cdot U_L}$.

При известном значении угла χ определяем угол ν

$$\nu = \frac{\pi}{2} + \frac{2}{3}\pi - \left(\chi - \frac{\pi}{6} \right) = \frac{4}{3}\pi - \arccos \frac{U_C^2 + U_L^2 - U_A^2}{2U_C \cdot U_L}.$$

Для треугольника, сторонами которого являются векторы \dot{U}_B , \dot{U}_C и вектор линейного напряжения \dot{U}_L (рис.2):

$$U_C^2 = U_B^2 + U_L^2 - 2U_B \cdot U_L \cdot \cos \psi.$$

Откуда $\cos \psi = \frac{U_B^2 + U_L^2 - U_C^2}{2U_B U_L}$.

При известном значении угла ψ определяем угол ρ :

$$\rho = \frac{\pi}{2} + \frac{4}{3}\pi - \left(\psi - \frac{\pi}{6} \right) = 2\pi - \arccos \frac{U_B^2 + U_L^2 - U_C^2}{2U_B \cdot U_L}.$$

При известных значениях углов δ , ν , ρ и известных действующих значениях напряжений U_A , U_B и U_C векторы этих напряжений определяются следующим образом:

$$\dot{U}_A = \sqrt{2}U_A(\cos \delta + j \sin \delta), \quad (14)$$

$$\dot{U}_B = \sqrt{2}U_B(\cos \nu + j \sin \nu), \quad (15)$$

$$\dot{U}_C = \sqrt{2}U_C(\cos \rho + j \sin \rho). \quad (16)$$

Векторы токов, протекающих по фазам присоединения определяются на основании измеренных действующих значений токов фаз соответственно I_A , I_B , I_C и найденных углов φ_A , φ_B , φ_C между векторами этих токов и векторами соответствующих напряжений \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C . Углы φ_A , φ_B , φ_C рассчитываются по соответствующим значениям активной мощности P_A , P_B и P_C , которая потребляется по фазам А, В и С. Для измерения действующих значений P_A , P_B и P_C на ваттметр подается ток фазы I_A (I_B или I_C) и напряжение фазы присоединения относительно земли U_{A3} (U_{B3} или U_{C3}).

Углы φ_A , φ_B , φ_C рассчитываются по выражениям:

$$\varphi_A = \arccos \frac{P_A}{U_A \cdot I_A},$$

$$\varphi_B = \arccos \frac{P_B}{U_B \cdot I_B},$$

$$\varphi_C = \arccos \frac{P_C}{U_C \cdot I_C}.$$

Векторы токов фаз присоединения рассчитываются следующим образом:

$$\dot{I}_A = \sqrt{2}I_A[\cos(\delta - \varphi_A) + j \sin(\delta - \varphi_A)], \quad (17)$$

$$\dot{I}_B = \sqrt{2}I_B[\cos(\delta - \varphi_B) + j \sin(\delta - \varphi_B)], \quad (18)$$

$$\dot{I}_C = \sqrt{2}I_C[\cos(\delta - \varphi_C) + j \sin(\delta - \varphi_C)]. \quad (19)$$

При необходимости после определения векторов токов и напряжений может быть выполнен расчет значений продольных комплексных проводимостей фаз присоединения Y_{AH} , Y_{BH} , Y_{CH} с учетом допущения о равенстве между собой значений поперечных комплексных проводимостей фаз присоединения в нормальном режиме, для которого выполнялись измерения токов, напряжений и активных мощностей.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ

По результатам опыта включения присоединения 6 кВ при подключенном к выводу фазы А обмотки ЭД активном сопротивлении величиной 110 кОм определены векторы токов фаз и напряжений присоединения по отношению к земле:

$$U_{AO} = 3749,3 \text{ В}; \quad \dot{U}_A = -55,69 + j5302,02 \text{ В};$$

$$U_{BO} = 3703,61 \text{ В}; \quad \dot{U}_B = 4526,7 - j2634,85 \text{ В};$$

$$U_{CO} = 3771,85 \text{ В}; \quad \dot{U}_C = -4638,01 - j2634,875 \text{ В};$$

$$I_A = 14,2 \text{ А}; \quad \dot{I}_A = 19,732 + j3,73 \text{ А};$$

$$I_B = 14,2 \text{ А}; \quad \dot{I}_B = -6,857 - j18,875 \text{ А};$$

$$I_C = 14,2 \text{ А}; \quad \dot{I}_C = -13,003 + j15,303 \text{ А}.$$

По полученным значениям векторов токов и напряжений в соответствии с методикой определения комплексных проводимостей изоляции с помощью программы АВТОПРИЗ (автоматическое определение проводимости изоляции), реализующей итерационный метод решения системы уравнений, выполнен расчет параметров изоляции присоединения. Получены следующие результаты: активное сопротивление изоляции фазы А равно 147,8 кОм (к фазе А подключено сопротивление 110 кОм, т.е. ошибка определения сопротивления составила 34,4%); активные сопротивления изоляции фаз В и С равны 2,44 МОм.

1. Гребченко Н.В. Метод непрерывного определения комплексных проводимостей изоляции в рабочих режимах электрических присоединений 6-10 кВ // Электричество .- 2003. - №12. – С.24-29.

2. Пат. 51177 Україна. МКИ G01R 31/02. Спосіб безперервного визначення комплексної провідності ізоляції фаз відносно землі електричного приєднання навантаження / Гребченко М.В., Гребченко В.М. (Україна) ДонНТУ .- №2002010644; Заявл. 25.01.2002; Опубл. 15.12.2004. Бюл. №12. – 4 с.

Методика розроблена доцентом кафедри Електричні станції Донецького національного технічного університету (ДПІ), к.т.н. Гребченко Н.В.

Україна, 83000 Донецьк, ул. Артема, 58. Кафедра електричних станцій
Тел. 30-10-372