

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСИММЕТРИИ НАГРУЗКИ

Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В.

Донецкий национальный технический университет

Сидоренко А.А.

ОАО Донецкоблэнерго

gyn@dgtu.donetsk.ua

Введение в проблему. В настоящее время все большую актуальность приобретают вопросы оперативной оценки качества изоляции [1-4].

Проводимости изоляции фаз по отношению к земле, например в [5,6], определяются непрерывно путем решения системы уравнений текущего состояния. Коэффициенты этих уравнений определяются в реальном времени по результатам измерения мгновенных значений токов фаз и напряжений фаз по отношению к земле.

Точность определения проводимостей изоляции фаз путем решения системы уравнений в большой степени зависит от соотношения между собой значений продольных проводимостей фаз нагрузки контролируемого присоединения. Это объясняется тем, что система уравнений получена при допущении о равенстве проводимостей фаз нагрузки. С учетом реальных соотношений проводимостей фаз нагрузки уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_B(\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HC} \cdot \underline{Y}_{BI} - \dot{U}_C(\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HB} \cdot \underline{Y}_{CI} &= \dot{I}_B(\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HC} - \dot{I}_C(\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HB} \\ \dot{U}_A(\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HB} \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{U}_B(\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HA} \cdot \underline{Y}_{BI} &= \dot{I}_A(\dot{U}_B - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HB} - \dot{I}_B(\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HA} \\ \dot{U}_A(\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HC} \cdot \underline{Y}_{AI} - \dot{U}_C(\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HA} \cdot \underline{Y}_{CI} &= \dot{I}_A(\dot{U}_C - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HC} - \dot{I}_C(\dot{U}_A - \dot{U}_N) \cdot \underline{k}_{HA} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\underline{Y}_{AH} = \underline{k}_{HA} \cdot \underline{Y}_H$, $\underline{Y}_{BH} = \underline{k}_{HB} \cdot \underline{Y}_H$, $\underline{Y}_{CH} = \underline{k}_{HC} \cdot \underline{Y}_H$ - продольные комплексные проводимости фаз нагрузки присоединения (диагональная матрица \underline{Y}_{HD});

$\underline{k}_{HA}, \underline{k}_{HB}, \underline{k}_{HC}$ - комплексные коэффициенты несимметрии, учитывающие отличие продольных проводимостей фаз нагрузки от среднего (номинального) значения проводимости фазы нагрузки \underline{Y}_H ;

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

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_{AH} + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_{BH} + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_{CH}}{\underline{Y}_{AH} + \underline{Y}_{BH} + \underline{Y}_{CH}} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{k}_{HA} + \dot{U}_B \cdot \underline{k}_{HB} + \dot{U}_C \cdot \underline{k}_{HC}}{\underline{k}_{HA} + \underline{k}_{HB} + \underline{k}_{HC}}$$

В результате выполненных преобразований из уравнений системы (1) исключена величина средней продольной проводимости фаз нагрузки \underline{Y}_H . Значения коэффициентов несимметрии $\underline{k}_{HA}, \underline{k}_{HB}, \underline{k}_{HC}$ определяются в результате соответствующих измерений в отключенном состоянии присоединения. Коэффициенты несимметрии $\underline{k}_{HA}, \underline{k}_{HB}, \underline{k}_{HC}$ позволяют автоматически учитывать статическую и динамическую несимметрию, которая может возникать на работающем присоединении.

На рис.1 приведена зависимость погрешности в определении активной составляющей проводимости изоляции при наличии виткового замыкания. Оценка погрешности расчета проводимости изоляции фазы В, возникающей в результате несимметрии при витковом к.з., выполнена путем сравнения точного и приближенного значений проводимости изоляции.

Точное значение \underline{Y}_{BI} получено при учете реальных значений коэффициентов несимметрии. Приближенное значение $\underline{Y}_{BI}^{прибл}$, получено при коэффициентах несимметрии $\underline{k}_{HA} = \underline{k}_{HB} = \underline{k}_{HC} = 1$. Относительная погрешность в определении проводимости изоляции \underline{Y}_{BI} , возникшая из-за несимметрии проводимостей фаз нагрузки, равна:

$$\frac{\Delta \underline{Y}_{BI}}{\underline{Y}_{BI}} = \frac{\underline{Y}_{BI} - \underline{Y}_{BI}^{прибл}}{\underline{Y}_{BI}} = \frac{1}{\underline{Y}_{BI}} \left(\underline{Y}_{BI}^{прибл} - \frac{\dot{I}_B}{\dot{U}_B} \right) \frac{\underline{k}_{HB} - \underline{k}_{HA}}{\underline{k}_{HA}} \quad (2)$$

Из (2) видно, что несимметрия продольной проводимости фазы С не оказывает влияния на расчет \underline{Y}_{BI} .

Целью исследований является разработка метода учета статической и динамической несимметрии нагрузки при определении параметров изоляции в рабочем режиме.

Решение поставленных задач. В идеальном случае продольные проводимости всех трех фаз присоединения нагрузки равны между собой. Практически эти проводимости всегда отличаются друг от друга. В зависимости от причин соотношение проводимостей может быть постоянным во времени, т.е. имеет место статическая несимметрия, или соотношение изменяется во времени, т.е. возникает динамическая несимметрия.

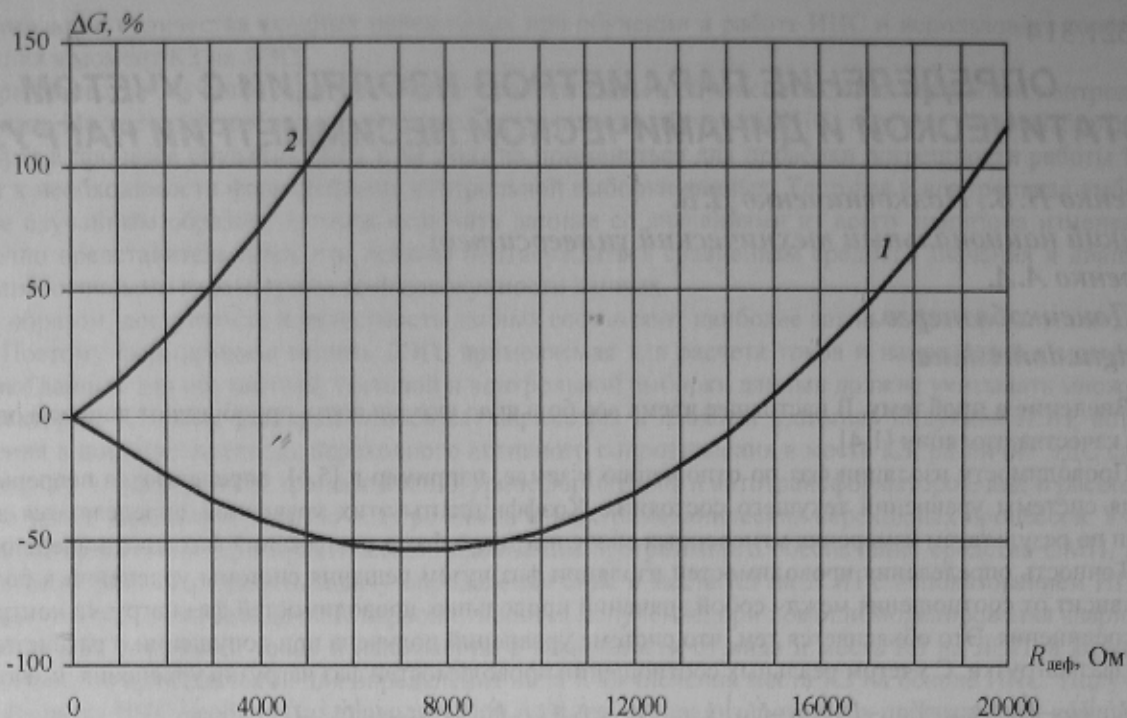


Рисунок 1 - Погрешность определения активной составляющей проводимости изоляции ΔG фазы В при:
1 - замыкании 1% витков фазы А; 2 - замыкании 1% витков фазы В

К основным причинам возникновения статической несимметрии относятся:

- отклонение от технологии при изготовлении или конструктивные изменения после ремонта электродвигателя (ЭД) (технологическая несимметрия);
- короткое замыкание нескольких витков одной фазы обмотки статора ЭД (витковое замыкание);
- дефект междуфазной изоляции (наиболее вероятен на выводах обмотки статора ЭД).

В результате статической несимметрии в рабочем режиме присоединения возникает ток обратной последовательности, амплитуда и фаза которого не зависят от режима работы электродвигателя. Частота этого тока равна частоте сети.

Динамическая несимметрия проявляется в периодическом изменении продольных проводимостей каждой фазы присоединения и возникает, в основном, по следующим причинам:

- нарушение симметрии воздушного зазора в ЭД;
- износ подшипников ЭД;
- обрывы стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя (АД).

В результате динамической несимметрии также возникает ток обратной последовательности. Однако его амплитуда и фаза периодически изменяются. Период изменения определяется скольжением АД. Частота тока обратной последовательности отличается от частоты сети на величину скольжения ЭД.

Несимметрия в виде междуфазных к.з. или обрывов фаз является кратковременной, т.к. эти повреждения выявляются релейной защитой и быстро отключаются. Поэтому влияние кратковременной несимметрии на метод определения параметров изоляции не учитывается.

В общем случае учет несимметрии нагрузки при решении системы уравнений (1) заключается в определении и задании коэффициентов несимметрии k_{HA}, k_{HB}, k_{HC} . При технологической несимметрии численные значения коэффициентов определяются путем измерений на работающем или отключенном присоединении и вводятся вместе с номинальными параметрами в базу данных оборудования узла электрической системы. В дальнейшем, в процессе эксплуатации степень несимметрии в любой момент времени, в том числе на работающем ЭД, может измениться, например, из-за возникновения виткового замыкания, обрыва стержней обмотки ротора АД и т.д. В этих случаях для исключения ошибок в определении проводимостей изоляции возникшая несимметрия автоматически выявляется и учитывается. Способ учета определяется видом несимметрии. При учете динамической несимметрии обеспечивается соответствие значений коэффициентов несимметрии моменту определения мгновенных значений параметров текущего режима. Развитие дефектов, вызвавших несимметрию, также автоматически синхронно во времени учитывается путем определения и изменения коэффициентов несимметрии.

Учет в программе расчета одновременно статической и динамической несимметрии выполняется путем введения в расчет коэффициентов, которые определяются по формулам:

$$\underline{k}_{HA} = \underline{k}_{CA} + \underline{k}_{DA} \cdot \cos(\omega_2 t),$$

$$\underline{k}_{HB} = \underline{k}_{CB} + \underline{k}_{DB} \cdot \cos\left(\omega_2 t + \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$\underline{k}_{HC} = \underline{k}_{CC} + \underline{k}_{DC} \cdot \cos\left(\omega_2 t - \frac{2\pi}{3}\right),$$

где $\underline{k}_{CA}, \underline{k}_{CB}, \underline{k}_{CC}$ - комплексные коэффициенты статической несимметрии, $k_c = 0 \div 1$;

$$\underline{k}_{CA} = \frac{(\dot{I}_2)_{f_0}}{I_{\Phi A}}, \quad \underline{k}_{CB} = \frac{(\dot{I}_2)_{f_0}}{I_{\Phi B}}, \quad \underline{k}_{CC} = \frac{(\dot{I}_2)_{f_0}}{I_{\Phi C}},$$

$$\underline{k}_{DA} = \underline{k}_{DB} = \underline{k}_{DC} = \frac{(\dot{I}_2)_{f_s}}{I_{\Phi}} \cdot \underline{k}_{np.d.} - \text{комплексные коэффициенты динамической несимметрии,}$$

$\underline{k}_{np.d.}$ - коэффициент пропорциональности динамической несимметрии, обеспечивающий согласование по амплитуде и фазе с коэффициентами уравнений (1);

ω_2 - частота тока обратной последовательности, обусловленного скольжением двигателя;

$(\dot{I}_2)_{f_0}$ - вектор тока обратной последовательности, частота которого равна частоте сети;

$\dot{I}_{\Phi A}, \dot{I}_{\Phi B}, \dot{I}_{\Phi C}$ - векторы токов фаз присоединения;

$\underline{k}_{np.c.}$ - комплексный коэффициент пропорциональности статической несимметрии, обеспечивающий согласование по амплитуде и фазе с коэффициентами уравнений (1);

$(\dot{I}_2)_{f_s}$ - вектор тока обратной последовательности, частота которого определяется скольжением s ЭД.

Соответствие коэффициентов, найденных по (1), действительной несимметрии в большой степени зависит от правильности определения коэффициентов пропорциональности $\underline{k}_{np.c.}$ и $\underline{k}_{np.d.}$. Если имеет место один из видов несимметрии, то отдельный учет соответствующей несимметрии выполняется упрощенно. Ниже рассматриваются такие способы.

При технологической несимметрии, а также при возникновении статической несимметрии в рабочем режиме присоединения, коэффициенты несимметрии не изменяются во времени и определяются по формуле:

$$\underline{k}_{ni} = 1 \pm \frac{\dot{I}_2}{I_{\Phi i}}, \quad i = A, B, C,$$

где $\dot{I}_2 = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2 \dot{I}_B + a \dot{I}_C)$ - вектор тока обратной последовательности,

I_{Φ} - вектор тока соответствующей фазы.

При витковых замыканиях коэффициент несимметрии определяется только для той фазы, ток в которой больше токов в двух других фазах. В этом случае коэффициенты несимметрии двух других фаз принимаются равными единице. Несколько меньшее повышение точности расчета дает использование упрощенной формулы:

$$k_H = (1 + A) + \frac{2I_{2 \max}}{I_{\Phi}},$$

где $I_{2 \max}$ - амплитуда вектора тока обратной последовательности;

I_{Φ} - действующее значение тока в соответствующей фазе;

A - амплитудный коэффициент, учитывающий переход от векторных величин к действующим значениям и определяемый в зависимости от отношения $\frac{I_{2 \max}}{I_{\Phi}}$, $A = 0 \div 5 \cdot 10^{-3}$.

При выявлении статической несимметрии на работающем присоединении в программе расчета проводимости выполняется определение коэффициента несимметрии с учетом зависимости $A = f(I_{2*})$ (рис.2). Благодаря такой процедуре обеспечивается высокая точность определения проводимости изоляции. Например, для присоединения двигателя 500 кВт при постепенном увеличении статической несимметрии до 6 % погрешность определения проводимости изоляции не превысила 8,5 % в диапазоне изменения ее активной проводимости от $1,1 \cdot 10^{-6}$ См до $1 \cdot 10^{-5}$ См.

Динамическая несимметрия продольных проводимостей фаз нагрузки возникает вследствие вращения несимметричного ротора АД. Изменение во времени положения механической несимметрии ротора относительно осей симметрии фаз обмоток статора приводит к изменению одновременно трех продольных проводи-

ностей $\underline{Y}_{AH}, \underline{Y}_{BH}, \underline{Y}_{CH}$. Точно так же изменяются коэффициенты несимметрии, определяемые по (1). Характер изменения проводимостей фаз нагрузки обуславливает зависимость погрешности расчета проводимости изоляции фаз $\Delta \underline{Y}_И$ от положения ротора АД. Зависимость $\Delta \underline{Y}_И$ от времени имеет периодический характер. Период изменения погрешности определяется скольжением АД. Следовательно, в некоторые моменты времени погрешность имеет минимальное значение. Поэтому наиболее точное значение $\Delta \underline{Y}_И$ определяется в этот момент по формуле:

$$\Delta \underline{Y}_И = \frac{\underline{Y}_{И \max} + \underline{Y}_{И \min}}{2},$$

где $\underline{Y}_{И \max}$ и $\underline{Y}_{И \min}$ - максимальное и минимальное значения проводимости изоляции, полученные в серии расчетов за время, превышающее период одного относительного поворота ротора АД относительно оси магнитного поля статора.

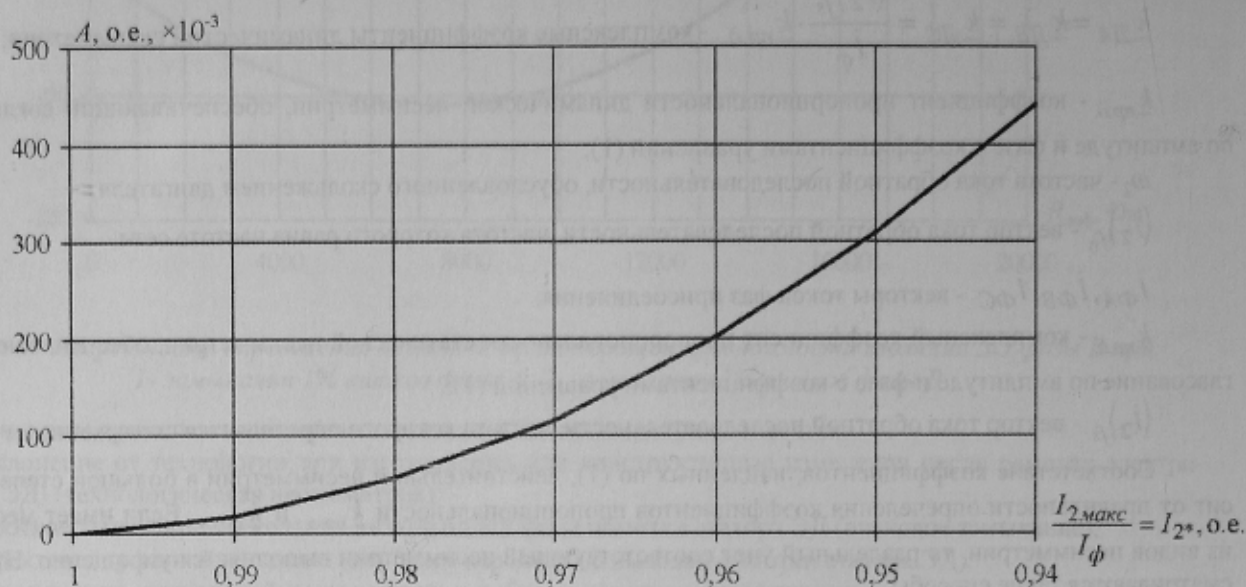


Рисунок 2 - Зависимость амплитудного коэффициента от относительного значения тока обратной последовательности

Выводы. Введение коэффициентов несимметрии в систему уравнений состояния позволяет выполнять учет статической и динамической несимметрии при определении параметров изоляции. Коэффициенты определяются на основании текущих значений тока обратной последовательности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров А.И., Хусаинова Н.А. Определение проводимости изоляции по отношению к земле для сетей напряжением 6-35 кВ с изолированной нейтралью // *Электричество*. - 2001. - № 5. - С. 12-18.
2. Пат. 2136011 RU, МКИ G 01 R 31/02. Способ определения активной и емкостной составляющих сопротивления изоляции фаз сети относительно земли / Лапченко К.В., Сидоров А.И. (РФ); Челябинск. гос. тех. универ-т. - № 97109365/09; Заявл. 11.06.97; Оpubл. 27.08.99. Бюл. № 24. - 8 с.
3. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением // *Электричество*. - 2005. - № 6. - С. 9-19.
4. Пат. GB 2377760, МКИ G01R 31/08, G01N 21/88, G01N 25/72. Method of detecting faults in underground electrical cables using thermal measurement techniques / Paddison Jason (GB); Western Power Distrib. (GB). - № 20010012113; Заявл. 17.05.2001; Оpubл. 22.01.2003. - 8 с.
5. Гребченко Н.В. Метод непрерывного определения комплексных проводимостей изоляции в рабочих режимах электрических присоединений 6-10 кВ // *Электричество*. - 2003. - № 12. - С. 24-29.
6. Патент 51177. Украина. 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; Оpubл. 15.12.2004. Бюл. № 12. - 4 с.