

УДК 621.314.222.8

Б.С.Стогний, академік НАНУ, В.В.Рогоза, канд.техн.наук, М.Ф.Сопель, канд.техн.наук, О.Ю.Голубов (Ин-т электродинаміки НАН України, Київ)

Определение места однофазного замыкания на землю

На основе дифференциального уравнения, описывающего электромагнитные процессы в режиме однофазного замыкания на землю, предложен метод определения места повреждения на линии, работающей в сети с изолированной нейтралью.

На основі диференціального рівняння, що описує електромагнітні процеси в режимі однофазного замикання на землю, запропоновано метод визначення місця пошкодження на лінії, що працює в мережі з ізольованою нейтраллю.

Задача разработки эффективных методов определения расстояния до места повреждения (ОМП) при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в линиях, работающих в сетях с изолированной нейтралью, остается до настоящего времени актуальной по двум причинам. Во-первых, количество этих повреждений в процентном отношении значительно превышает количество повреждений других видов [5] и растет по мере уменьшения технического ресурса электрических сетей. Во-вторых, используемые для этих целей методы ОМП не отвечают возросшим требованиям со стороны потребителя по обеспечению высокой точности, минимального времени определения расстояния до места замыкания, возможности ОМП без отключения линии (в режиме ОЗЗ), т.е. без перерыва питания потребителя.

Практически все известные методы ОМП можно разделить на две группы. Импульсные методы основаны на анализе волновых процессов, протекающих при послылке специально сформированного зондирующего электрического импульса в поврежденную линию. Зная скорость распространения волны вдоль линии и измерив время между моментом послылки импульса и моментом прихода в начало линии импульса, отраженного от места замыкания, вычисляется расстояние до места повреждения. Использование импульсных методов на линии, находящейся под напряжением, крайне затруднительно, так как необходимо учитывать многократные отражения от неповрежденных линий, накладывающиеся на полезный сигнал и искажающие его. Сложность применения этих методов также заключается в том, что измерение напряжения должно производиться в период горения дуги, который длится доли миллисекунды.

Большинство методов предполагает анализ

аварийных параметров режима ОЗЗ. При этом наличие сопротивления R_3 в месте замыкания существенно усложняет анализ процессов, протекающих в аварийном контуре. С одной стороны, величина сопротивления имеет статистический характер и поэтому обуславливает неопределенность ОМП при расчете индуктивности аварийного участка линии. С другой стороны, вследствие нелинейности R_3 принципиально некорректными являются методы, где в процессе ОМП используется частотный анализ, предполагающий разложение кривой напряжения в гармонический ряд [6].

Расчет расстояния до ОЗЗ на основе анализа падения напряжения на участке линии до места повреждения $\Delta U_{\text{л}}$ затруднен также по той причине, что эта величина сравнима с величиной падения напряжения в месте замыкания ΔU_3 на землю и может быть даже меньше. Кроме того существенно возрастает влияние высших гармоник вследствие малого напряжения на поврежденной фазе в режиме ОЗЗ. Эти факторы обусловлены особенностями режима ОЗЗ. Их можно успешно преодолеть, если использовать при анализе процессов в поврежденной линии мгновенные значения токов и напряжений.

Современные средства микропроцессорной техники, находящие все более широкое распространение в электроэнергетике, позволяют решать многие задачи управления режимами электрических сетей, в том числе и в аварийных ситуациях, на более высоком научно-техническом уровне, имея в виду возможность оперирования мгновенными значениями параметров режима, отказавшись от искусственных приемов, таких, как символический метод расчета электрических цепей, учитывать различные влияющие факторы, кото-

рыми приходилось пренебрегать в условиях функционирования традиционных систем управления.

К числу таких задач относится задача определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6–35 кВ.

Схема замещения линии, работающей в режиме ОЗЗ, показана на рис. 1.

Ток замыкания на землю

$$I_3 = I_{A01} + I_{B01} + I_{C01} + I_{A02} + I_{B02} + I_{C02}. \quad (1)$$

Напряжение поврежденной фазы относительно земли U_B в месте измерения определяется падением напряжения на линии до места повреждения и падением напряжения в месте замыкания.

Наиболее полно процесс ОЗЗ описывается дифференциальным уравнением [3]

$$U_B = \Delta U_{л} - \Delta U_3 = I_3 (I_{B1} R + LI'_{B1} + M_{AB} I'_{A1} + M_{BC} I'_{C1}) - (C_A U'_A + C_B U'_B + C_C U'_C) I_3 R_3, \quad (2)$$

где R и L — погонные значения активного сопротивления и индуктивности фазы B линии; C_A , C_B , C_C — погонные значения емкости фаз линии; M_{AB} , M_{BC} и C_{AB} , C_{BC} , C_{CA} — погонные значения междуфазных емкостей и взаимных индуктивностей линии.

Для исключения необходимости учета R_3 , которое, как указывалось выше, сопряжено с определенными трудностями, будем анализировать (2) для момента времени, когда $I_3 = 0$. Тогда слагаемое $\Delta U_3 = 0$ и уравнение (2) принимает вид

$$U_B = \Delta U_{л} = I_3 (I_{B1} R + LI'_{B1} + M_{AB} I'_{A1} + M_{BC} I'_{C1}). \quad (3)$$

После подстановки значений тока в поврежденной фазе, принимая во внимание, что при равномерно

распределенных вдоль линии емкостях среднее значение емкостных токов (фазных и междуфазных) равно половине суммарного емкостного тока I'_{B1} и производных от фазных токов I'_{A1} , I'_{B1} , I'_{C1} , и ряда преобразований получим

$$U_B = (\alpha U''_A + \beta U''_B + \gamma U''_C) 0,5l_3 + R0,5l_3 (C_{BC} U'_C - \delta U'_B + C_{AB} U'_A) + LI'_B + M_{AB} I'_A + I_B R + M_{BC} I'_C. \quad (4)$$

Здесь

$$\alpha = M_{BC} C_{CA} + LC_{AB} - M_{AB} (C_{AB} + C_{CA} + C_A),$$

$$\beta = M_{AB} C_{AB} + M_{BC} C_{BC} - L(C_{BC} + C_{AB} + C_B),$$

$$\gamma = LC_{BC} + M_{AB} C_{CA} - M_{BC} (C_{CA} + C_{BC} + C_C),$$

$$\delta = C_{BC} + C_{AB} + C_B,$$

где C_{AB} , C_{BC} , C_{CA} — погонные значения междуфазных емкостей и взаимных индуктивностей линии.

Если принять, что погонные значения собственной и взаимной индуктивности постоянны, т.е. не зависят от длины рассматриваемого участка линии, уравнение (4) имеет аналитическое решение [4]. Однако для повышения точности определения места повреждения эти величины необходимо вычислять с учетом геометрических параметров рассматриваемой линии — высот подвеса проводов h_A , h_B , h_C , расстояний между ними d_{AB} , d_{BC} , d_{CA} , радиуса проводов всех фаз r (рис. 2).

Для расчета индуктивностей и взаимных индуктивностей проводов используются приведенные в [2] формулы, в которых произведена замена l на l_3

$$L = \frac{\mu_0 I_3}{2\pi} \ln \left(\frac{2l_3}{r} - 1 \right) + \frac{\mu I_3}{8\pi}, \quad M = \frac{\mu_0 I_3}{2\pi} \ln \left(\frac{2l_3}{d} - 1 \right). \quad (5)$$

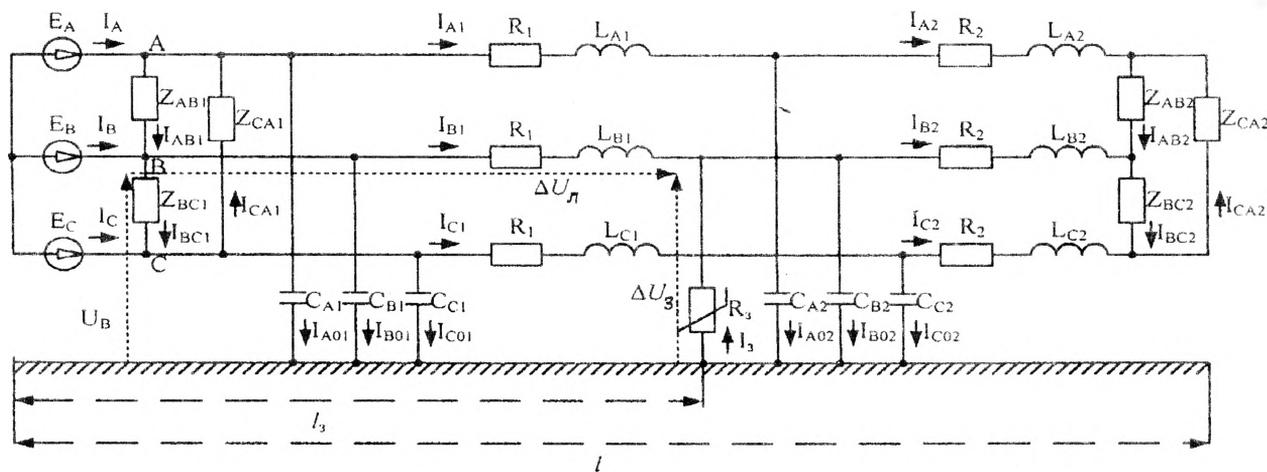


Рис. 1

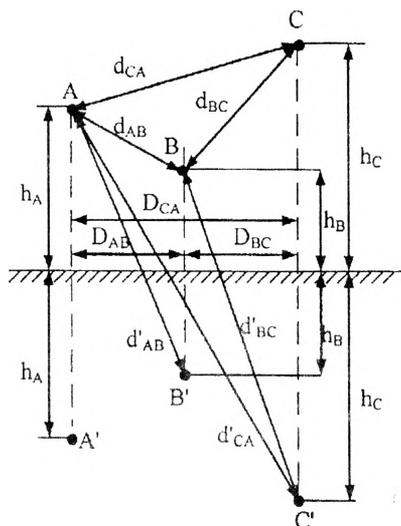


Рис. 2

Величина активного сопротивления определяется маркой провода воздушной линии, а емкости для линии с произвольным расположением проводов рассчитываются следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} C_A &= \lambda_A + \lambda_{AB} + \lambda_{AC}; & C_{AB} &= -\lambda_{AB}; \\ C_B &= \lambda_B + \lambda_{BA} + \lambda_{BC}; & C_{AC} &= -\lambda_{AC}; \\ C_C &= \lambda_C + \lambda_{CA} + \lambda_{CB}; & C_{BC} &= -\lambda_{BC}, \end{aligned} \quad (6)$$

где λ — емкостные коэффициенты, равные

$$\begin{aligned} \lambda_A &= (\sigma_B \sigma_C - \sigma_{BC}^2) / \Delta; & \lambda_{AB} &= (\sigma_{AC} \sigma_{CB} - \sigma_{AB} \sigma_C) / \Delta; \\ \lambda_B &= (\sigma_A \sigma_C - \sigma_{AC}^2) / \Delta; & \lambda_{AC} &= (\sigma_{AB} \sigma_{BC} - \sigma_{AC} \sigma_B) / \Delta; \\ \lambda_C &= (\sigma_A \sigma_B - \sigma_{AB}^2) / \Delta; & \lambda_{BC} &= (\sigma_{BA} \sigma_{AC} - \sigma_A \sigma_{BC}) / \Delta. \end{aligned}$$

Здесь σ — потенциальные коэффициенты, которые определяются геометрическими размерами, характеризующими линию

$$\begin{aligned} \sigma_A &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(2h_A/r); & \sigma_{AB} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(d'_{AB}/d_{AB}); \\ \sigma_B &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(2h_B/r); & \sigma_{AC} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(d'_{AC}/d_{AC}); \\ \sigma_C &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(2h_C/r); & \sigma_{BC} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln(d'_{BC}/d_{BC}); \end{aligned}$$

$$\Delta = \begin{pmatrix} \sigma_A & \sigma_{AB} & \sigma_{AC} \\ \sigma_{BC} & \sigma_B & \sigma_{BC} \\ \sigma_{CA} & \sigma_{CB} & \sigma_C \end{pmatrix}.$$

Найденные по формулам (5) и (6) значения

индуктивностей и емкостей используются для определения расстояния до места ОЗЗ.

Поскольку индуктивность имеет логарифмическую зависимость от расстояния, уравнение не имеет аналитического решения, и возникает необходимость применить численные методы решения.

Целесообразно воспользоваться методом Ньютона [1] по итерационной формуле

$$l_{1+m} = l_m - F(l_m) / F'(l_m),$$

где $m=0, 1, 2, 3, \dots$ — итерационный индекс, l_0 — начальное приближение.

В качестве начального приближения используется формула

$$l_3 = U_B / (I_{B1} R + L I'_{B1} + M_{AB} I'_{A1} + M_{BC} I'_{C1}). \quad (7)$$

Здесь не учитывается влияние распределенных емкостей и принимается линейная зависимость индуктивности от длины линии, что вполне оправдано для начального этапа итерационного процесса.

Последующее уточнение ведется по итерационной формуле

$$l_{30(1+m)} = l_{0(m)} - \frac{\Delta U_A(l_{30(m)}) - U_B}{\Delta U'_A(l_{30(m)})}; \quad m=0, 1, 2. \quad (8)$$

Нахождение момента перехода через ноль тока замыкания на землю t_0 производится также с помощью метода Ньютона.

Порядок расчета расстояния до места однофазного замыкания показан на рис. 3.

Для подтверждения работоспособности алгоритма расчета расстояния до места повреждения и оценки точности метода были проведены натурные испытания в действующей электросети.

На линии напряжением 10 кВ с горизонтальным расположением проводов марки А-35 ($d_{AB}=d_{BC}=1,5$ м, $d_{CA}=3$ м, $h=11$ м) на расстоянии 15 км от питающей подстанции было выполнено металлическое однофазное замыкание на землю.

Расчитанное по предложенному алгоритму расстояние до места повреждения составило 14,4 км. Как видно, расхождение расчетных данных расстояния до места ОЗЗ по сравнению с данными при испытании, находится в пределах 5%.

Регистрация токов и напряжений выполнялась информационно-диагностическим комплексом "Регина" с частотой дискретизации 1 кГц.

На рис. 4 показаны осциллограммы, полученные в результате эксперимента при металлическом замыкании на землю (диапазон величины напряжения поврежденной фазы по отношению к напряжению здоровой фазы для большей наглядности уменьшен в 25 раз).

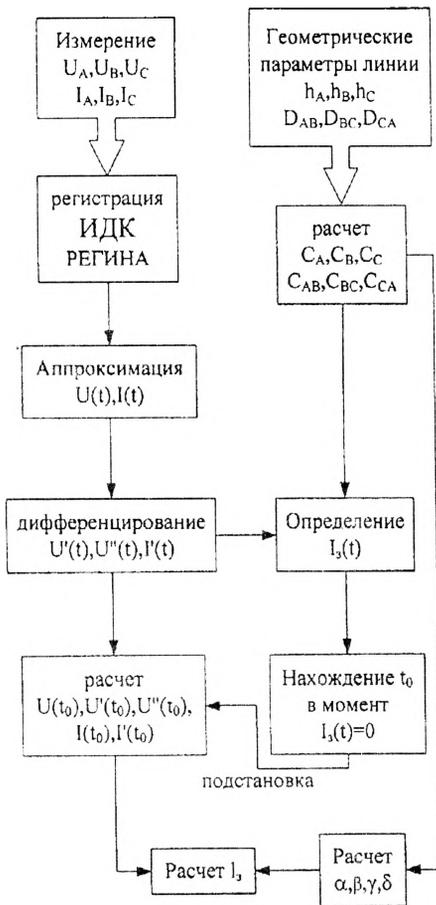


Рис. 3

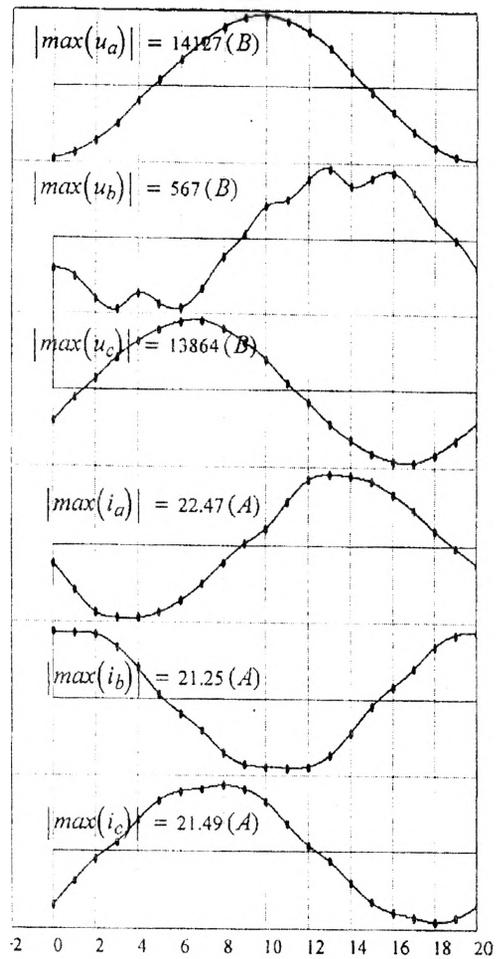


Рис. 4

Наличие дуги, которой сопровождается большинство замыканий на землю, обуславливает сложный характер кривой тока ОЗЗ. Поэтому большое значение для обеспечения необходимой точности имеет достаточно высокая частота дискретизации регистратора и оптимально выбранный метод аппроксимации кривых токов и напряжений при вычислении их значений, и что особенно важно, при вычислении производных, а также при определении момента перехода через 0 тока ОЗЗ. При выборе расчетного временного интервала необходимо исключить из рассмотрения бестоковую паузу в случае перемежающейся дуги и предусмотреть возможность выбора из ряда зафиксированных значений t_0 такое, которому соответствует максимальное значение U' .

Таким образом, с помощью разработанного метода, используя современные системы регистрации параметров аварийного режима, можно с высокой точностью определить расстояние до места ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. Для этого не требуется отключение линии и установки дополнительного оборудования, а достаточно зарегистрировать значения фазных токов и напря-

жений в режиме ОЗЗ и геометрические параметры линии электропередачи.

Изложенный подход может быть успешно использован для разработки более современных методов ОМП и в сетях с заземленной нейтралью.

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. — М.: Наука, 1981. — 718 с.
2. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. — М.: Энергия, 1968. — 487 с.
3. Ионкин П.А., Курдюков Н.Н., Кухаркин Е.С. Типовые примеры и задачи по теоретическим основам электротехники. — М.: Высш.шк., 1965. — 319 с.
4. Стогий Б.С., Розога В.В., Сопель М.Ф. и др. Определение места однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью // Техн. электродинамика. Тем. вып. "Силовая электроника та енергоефективність". — 2004. — Ч. 2. — С. 116--118.
5. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. — М.: Энергия, 1976. — 519 с.
6. Патент RU 2216749 C2. Способ определения места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях. Качесов В.Е. — 2003.

Надійшла 26.09.2006