

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ВОЗДУШНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Канд. техн. наук, доц. КАЛЕНТИОНОК Е. В.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Инж. ЛУКЪЯНЕНОК М. Ю.

*Глубокские электрические сети*

Для эффективного определения мест повреждения в электрических сетях необходимо использовать дистанционные и топографические средства их обнаружения [1]. Однако на практике места повреждений при однофазном замыкании на землю в воздушных сетях 6–10 кВ находятся путем обхода линии с использованием переносных приборов [2, 3]. Это связано прежде всего с большой разветвленностью распределительных сетей, а также с тем, что замыкание на землю одной фазы линии 6–10 кВ не вызывает короткого замыкания и линейные напряжения остаются неизменными.

В настоящее время предложено несколько методических подходов для определения расстояния до места повреждения с питающей подстанцией. Наиболее известным и хорошо разработанным является импульсный метод определения расстояния до места повреждения [1, 4], получивший распространение в кабельных сетях и на линиях электропередачи 110 кВ и выше. В распределительных сетях 6–10 кВ данный метод не нашел применения из-за сложности выделения отраженного импульса, относящегося к месту повреждения. Это связано с тем, что при импульсных измерениях на воздушных линиях присутствуют импульсы отражений от многочисленных неоднородностей линии, действуют различного рода помехи, «маскирующие» полезный импульсный сигнал, используемый для дистанционного определения места повреждения.

Интересным направлением в поиске места повреждения в электрических сетях является метод гармонических электромагнитных колебаний [5]. Согласно данному способу поврежденную линию отключают от шин подстанции и подключают к независимому источнику напряжения, а затем создают электромагнитные колебания и находят резонансную частоту  $f_p$ . Расстояние до места замыкания определяют по формуле

$$l_x = \frac{1}{2\pi f_p^2 L_0 C}, \quad (1)$$

где  $L_0$  – удельная индуктивность линии;

$C$  – емкость линии.

Для измерения частоты электромагнитных колебаний в контуре целесообразно создавать незатухающие гармонические электромагнитные колебания. Для этого поврежденную линию необходимо подключать к источнику электропитания с положительной обратной связью и конденсатором

на выходе. Недостатком такого метода является сложность исполнения и выделения частот свободных колебаний, что может привести к существенным погрешностям определения расстояния до места замыкания. Кроме того, как отмечается в [6], такой подход применим для определения расстояния до места однофазного замыкания на землю с активным переходным сопротивлением в месте повреждения  $R_{\text{п}} < 200 \dots 300$  Ом, что снижает его привлекательность для реализации на практике.

Наиболее приемлемым для практического применения является способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю по измеренному индуктивному сопротивлению линии до места повреждения [5, 6]. Действительно, если к поврежденной линии подключить специальный генератор синусоидального напряжения (рис. 1а), то упрощенно линия электропередачи может быть представлена схемой замещения (рис. 1б). Ее векторная диаграмма токов и напряжений показана на рис. 2. Для данной схемы справедливо соотношение

$$I_3 x_{\text{л}} = U_{\text{г}} \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $I_3$  – ток, протекающий в месте повреждения;  
 $x_{\text{л}}$  – индуктивное сопротивление линии до места повреждения;  
 $U_{\text{г}}$  – напряжение на шинах генератора в начале линии;  
 $\varphi$  – угол между векторами  $\underline{U}_{\text{г}}$  и  $\underline{I}_3$ .

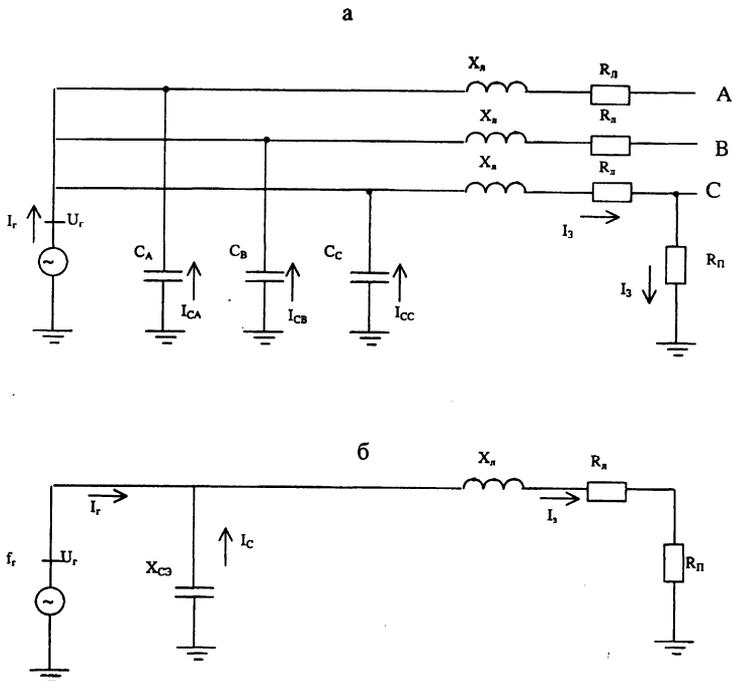


Рис. 1. Схема замещения линии при подключении высокочастотного генератора:  
 а – трехфазная; б – однолинейная

Из (2) получим известное выражение для расчета индуктивного сопротивления линии

$$x_n = \frac{U_r}{I_3} \sin \varphi. \quad (3)$$

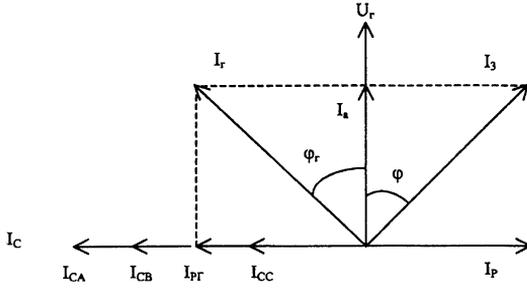


Рис. 2. Векторная диаграмма токов и напряжения в линии при подключении высокочастотного генератора

Учитывая, что:

$$x_n = 2\pi f_r L_0 l_x;$$

$$\sin \varphi = \frac{I_p}{I_3},$$

получим искомое расстояние до места повреждения

$$l_x = \frac{U_r I_p}{2\pi f_r L_0 I_3^2}, \quad (4)$$

где  $f_r$  – частота напряжения генератора, подключенного к линии;

$I_p$  – реактивная составляющая тока, протекающего в месте повреждения.

Поскольку токи  $I_p$  и  $I_3$ , протекающие в месте повреждения, неизвестны, их значения определим путем измерения тока генератора  $I_r$ , угла  $\varphi_r$  между векторами тока и напряжения генератора, емкостного тока линии  $I_c$ :

$$I_p = I_r \sin \varphi_r + I_c; \quad I_3 = \sqrt{I_r (\cos^2 \varphi_r + \sin^2 \varphi_r)}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получим расчетное расстояние до места однофазного замыкания на землю

$$l_x = \frac{U_r (I_r \sin \varphi_r + I_c)}{2\pi f_r L_0 [I_r^2 \cos^2 \varphi_r + (I_r \sin \varphi_r + I_c)^2]}. \quad (6)$$

Таким образом, подключая к поврежденной линии специальный генератор и фиксируя его режимные параметры  $U_r$ ,  $f_r$ ,  $I_r$ ,  $\varphi_r$ , можно по (6) рассчитать расстояние до места повреждения. Поскольку реактивное сопротивление линии, как правило, значительно меньше переходного сопротив-

ления  $R_n$  в месте повреждения, измерение целесообразно выполнять на повышенной частоте генератора [5].

Существенную трудность при практической реализации такого подхода к нахождению места повреждения вызывает определение емкостного тока линии  $I_c$  в аварийном режиме. Ориентировочно его значение может быть определено по формуле

$$I_c = 6\pi f_r U_r C_0 l_\Sigma, \quad (7)$$

где  $C_0$  – удельная емкость провода линии относительно земли;

$l_\Sigma$  – суммарная длина поврежденной линии.

Однако при таком определении значения емкостного тока имеется два наиболее влияющих фактора на точность его расчета. Во-первых, как показывает практика эксплуатации, реальная и паспортная длина линий может различаться до 15–20 %. Во-вторых, емкость сети в процессе эксплуатации меняется (изменения могут достигать до 30 % от исходной величины [8]). Эти факторы могут вызвать погрешность в определении расчетного расстояния до 15 % от действительного.

При относительно стабильной сети может быть выполнено непосредственное измерение емкостного тока в ее нормальном режиме работы. Подключив высокочастотный генератор к линии и выполнив замеры, получим  $I_c = I_r \sin \varphi_r \approx I_r$ .

Исходя из трудностей определения  $I_c$ , рассмотрим другой подход к нахождению расстояния до места однофазного замыкания на землю, исключая необходимость использования значения  $I_c$ .

При подключении к линии генератора повышенной частоты по ней будет протекать ток, величина которого, согласно рис. 1, 2, определится из уравнения

$$\underline{I}_r = \frac{U_r}{\frac{-jx_{c3}(R + jx_n)}{R + j(x_n - x_c)}}, \quad (8)$$

где  $R = R_n + R_n$  – суммарное активное сопротивление линии  $R_n$  и переходное сопротивление  $R_n$  в месте повреждения.

Представив ток генератора в виде двух составляющих  $I_r = I_{ar} - jI_{pr}$  и проведя последовательное преобразование (8), получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{pr}R - U_r \frac{R}{x_{c3}} + I_{ar}x_n &= 0; \\ I_{ar}R - U_r \frac{x_n}{x_{c3}} + I_{pr}x_n &= U_r. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таким образом имеем систему двух уравнений с четырьмя неизвестными  $R$ ,  $x_n$ ,  $R/x_{c3}$  и  $x_n/x_{c3}$ . Для ее решения необходимо получить еще хотя бы два уравнения. Для этого проведем минимум два замера режимных параметров  $U_r$ ,  $I_{ar}$  и  $I_{pr}$  при двух различных частотах генератора  $f_i(\omega_r)$ . Тогда

получим следующую систему алгебраических уравнений (индекс  $г$  для упрощения записи опустим и учтем, что  $x_d = \omega L$ ;  $x_{c3} = 1/\omega C_3$ ):

$$\left. \begin{aligned} I_{p1}R - U_1\omega_1RC_3 + 0 + I_{a1}\omega_1L &= 0; \\ I_{a1}R + 0 + U_1\omega_1^2LC_3 - I_{p1}\omega_1L &= U_1; \\ I_{p2}R - U_2\omega_2RC_3 + 0 + I_{a2}\omega_2L &= 0; \\ I_{a2}R + 0 + U_2\omega_2^2LC_3 - I_{p2}\omega_2L &= U_2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  – значения активных составляющих токов генератора при угловых частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ;

$I_{p1}$ ,  $I_{p2}$  – реактивные токи генератора при соответствующих замерах;

$U_1$ ,  $U_2$  – напряжения генератора при угловых частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ;

$C_3$  – эквивалентная емкость сети;

$L$  – индуктивность фазы линии до места повреждения ( $L = 2\pi fL_0l_x$ );

$\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $\omega_2 = 2\pi f_2$  – угловые частоты.

Решая данную систему методом исключения Гаусса [9], находим искомое расстояние до места повреждения

$$l_x = \frac{a_1a_2 - a_3a_4}{2\pi L_0(a_1a_5 - a_3a_6)}, \quad (11)$$

где

$$a_1 = f_1(I_{p1}U_2f_2 - U_1I_{p2}f_1);$$

$$a_2 = I_{a1}U_2 - I_{a2}U_1;$$

$$a_3 = I_{a1}U_2f_2^2 - I_{a2}U_1f_1^2;$$

$$a_4 = I_{p1}U_2f_2f_2^{-1} - I_{p2}U_1;$$

$$a_5 = I_{p1}I_{a1}f_1 - I_{p2}I_{a1}f_2;$$

$$a_6 = I_{a1}I_{a2}f_2 + I_{p1}I_{p2}f_1 - U_2U_1^{-2}I_1f_2 - \text{коэффициенты};$$

$I_1$  – ток генератора при частоте  $f_1$ .

Из (11) следует, что расстояние  $l_x$  до места однофазного замыкания на землю однозначно определяется параметрами  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $I_1$ ,  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ ,  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ ,  $L_0$  и не зависит от активного сопротивления проводов, емкостей между проводами и землей, величины переходного сопротивления в месте замыкания.

Вместе с тем, как показали экспериментальные исследования на модели и реальной линии, расчетные расстояния до места повреждения при больших переходных сопротивлениях могут весьма существенно отличаться от действительных. Причина таких результатов кроется в погрешностях измерения параметров режима и высокой чувствительности ошибок измерения на величину расчетного расстояния. На рис. 3 приведены графические зависимости коэффициентов чувствительности отклонений напряжения, тока, угла, частоты и задания емкости на значение расчетного расстояния до места повреждения от величины сопротивления заземления для случая

двух линий. Коэффициенты чувствительности рассчитывались путем задания отклонений этих параметров по формулам:

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \frac{\Delta I_p}{\Delta I}, \text{ м/}\mu\text{А}; \\ K_U &= \frac{\Delta I_p}{\Delta U}, \text{ м/В}; \\ K_\varphi &= \frac{\Delta I_p}{\Delta \varphi}, \text{ м/град.}; \\ K_f &= \frac{\Delta I_p}{\Delta f}, \text{ м/Гц}; \\ K_c &= \frac{\Delta I_p}{\Delta C}, \text{ м/пФ}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

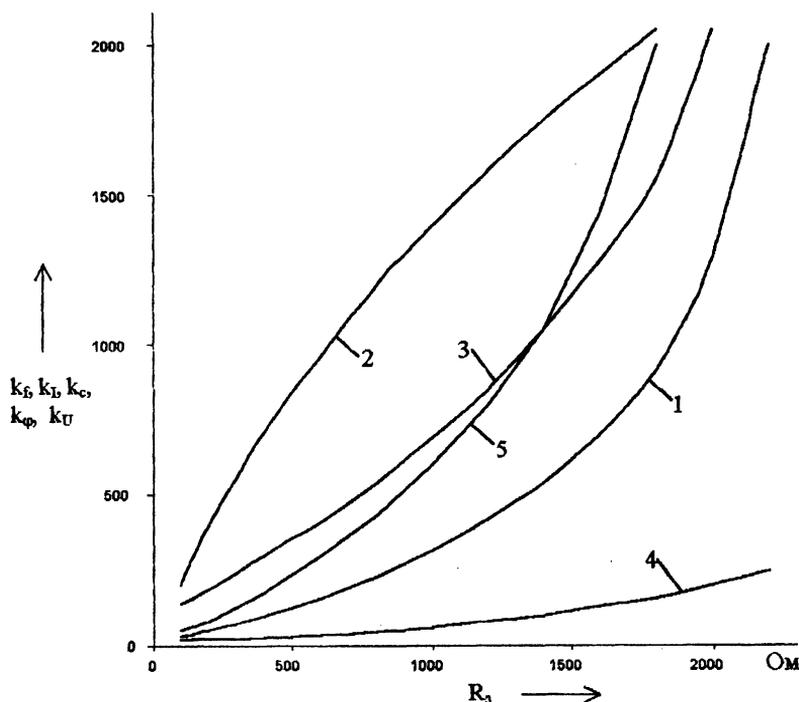


Рис. 3. Зависимости коэффициента чувствительности параметров режима и сети на расчетное расстояние до места однофазного замыкания на землю от величины переходного сопротивления в месте повреждения: 1 —  $K_I$ , м/μА; 2 —  $K_\varphi$ , м/град.; 3 —  $K_U$ , м/В; 4 —  $K_f$ , м/Гц; 5 —  $K_c$ , м/пФ

Из графических зависимостей видно, что расчетное расстояние наименее чувствительно к погрешности измерения частоты (4). Остальные параметры оказывают существенное влияние на погрешность определения расстояния до места повреждения. При этом их влияние растет с увеличением величины переходного сопротивления. Так, например, точность в измерении угла  $\varphi$  в  $1^\circ$  при  $R_3 = 52$  Ом может привести к погрешности определения

расстояния в 120 м, а при  $R_3 = 43 \text{ Ом}$  – уже к 780 м. Таким образом, точность определения расстояния до места повреждения находится в прямой зависимости от точности измерения напряжения, тока и угла на выходе генератора. Этот фактор, существенно влияющий на качественные показатели, необходимо учитывать при практической реализации предложенных подходов определения расстояния до места однофазного замыкания на землю.

## ВЫВОДЫ

1. Выполнение нескольких измерений режимных параметров высокочастотного генератора, подключенного к поврежденной линии, позволяет определить расстояние до места однофазного замыкания на землю без нахождения значения емкостного тока линии.

2. Погрешности определения расстояния до места однофазного замыкания на землю возрастают по мере увеличения значения переходного сопротивления в месте повреждения.

3. Повышение точности определения расстояния до места повреждения при больших переходных сопротивлениях возможно путем улучшения качества напряжения, увеличения точности измерений режимных параметров высокочастотного генератора при подключении его к поврежденной линии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ш а л ы т Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
2. Б е р х и н В. И., К о н д р а т ю к С. В. Определение мест междуфазных к.з. в воздушных распределительных сетях // Энергетик. – 1974. – № 11. – С. 33–34.
3. К у з н е ц о в А. П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 92 с.
4. Ш а л ы т Г. М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсным методом. – М.: Энергия, 1968. – 216 с.
5. А. с. 550597 (СССР). Способ определения расстояния до места короткого замыкания в электрической сети / А. Б. Клеменец, Л. Н. Солюянов // Бюл. изобр. – 1977. – № 28.
6. И в а н о в А. А., Ф е д о р о в А. А. Применение резонансного инвертора в устройствах поиска мест повреждений в электрических сетях // Электротехника. – 1997. – № 10. – С. 27–31.
7. А. с. 1224750 (СССР). Устройство для определения расстояния до места повреждения однофазных замыканий на землю в электрической сети с незаземленной нейтралью / Р. Ф. Стасенко // Бюл. изобр. – 1986. – № 19.
8. Т р у х а н А. П. Автоматическая компенсация токов замыкания на землю в электрических сетях // Компенсация емкостных токов на землю в электрических сетях. – Киев: Наукова думка, 1968. – С. 3–14.
9. В ы с ш а я математика: Общий курс / Под ред. А. И. Яблонского. – Мн.: Выш. шк., 1993. – 349 с.