

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; М. В. Кутина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В МЕСТЕ ОБРЫВА ПРОВОДА ВОЗДУШНОЙ ЛЭП

В статье проведен анализ факторов, которые влияют на значение переходного сопротивления в месте падения провода воздушной линии электропередачи на землю. Предложена математическая модель для определения переходного сопротивления в месте падения провода на землю.

Ключевые слова: обрыв провода воздушной линии электропередачи, переходное сопротивление.

Вступление

В распределительных сетях с воздушными линиями напряжением 6 – 35 кВ наиболее распространенным видом повреждения (60 – 70% от общего количества повреждений) являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [1, 2]. Причины возникновения замыкания на землю разнообразны: электрический пробой изоляции за счет действия внутренних и атмосферных перенапряжений [1, 2]; механические повреждения фазной изоляции, обрыв и падение провода воздушных линий электропередачи на землю или заземление конструкции; прикосновение к неизолированным токоведущим частям людьми или животными, ошибочные действия обслуживающего персонала. В качестве основных признаков для выявления ОЗЗ используют ток и напряжение нулевой последовательности или значение полного или активного сопротивления изоляции фаз сети относительно земли при наложении на сеть постороннего источника питания [3]. Электрические характеристики однофазных повреждений электроустановок с изолированной нейтралью напряжением 6 – 35 кВ не зависят от конкретного назначения электроустановки. Однако большое количество возникающих ОЗЗ в самых разных ситуациях и незначительное изменение электрических параметров ЛЭП по сравнению с нормальным режимом работы усложняет выбор оптимальных методов предупреждения, выявления и ликвидации ОЗЗ.

Анализ предыдущих исследований. Математические зависимости электрических величин при ОЗЗ от параметров электроустановки изложены в ряде исследований [1, 2, 3]. Все существующие ОЗЗ можно разделить на две группы – бездуговые и дуговые. Бездуговые замыкания возникают при наличии надежной гальванической связи поврежденной фазы с землей. Форма кривой тока бездугового ОЗЗ существенно зависит от активного сопротивления контакта провода с землей и сопротивления растекания тока R_p .

Результаты исследований [1] показали, что стойкое горение дуги в воздушных сетях напряжением 6 – 35 кВ возможно лишь в случае пробоя изоляторов на деревянных траверсах опор ВЛ, если переходное сопротивление будет составлять несколько десятков кОм.

Наиболее опасным является ОЗЗ при обрыве провода воздушной линии электропередачи со стороны источника питания [3]. В месте падения может возникнуть значительное переходное сопротивление, которое существенно снижает значение тока замыкания на землю, и средства от ОЗЗ в большинстве случаев не срабатывают. Создается ошибочное впечатление об отсутствии повреждения.

Кроме этого на стороне низкого напряжения трансформаторов, которые питаются от поврежденной линии, искажаются межфазные напряжения, и потребители переходят в несимметричный режим работы, опасный с точки зрения перегрева обмоток трансформаторов и двигателей.

Целью работы является оценка переходного сопротивления в месте ОЗЗ путем

Наукові праці ВНТУ, 2011, № 2

построения математической модели, которая соответствует реальному процессу обрыва провода для учета его значения при расчете тока ОЗЗ.

Известно, что переходное сопротивление в месте падения провода R_c включает в себя последовательное соединение переходного сопротивления контакта проводника с землей R_k и сопротивление растекания тока замыкания в землю R_p , то есть [4]

$$R_c = R_k + R_p. \quad (1)$$

Переходное сопротивление R_k определяется сопротивлением в месте суженных участков провода $R_{суж}$, по которым проходит ток к площадкам замыкания и сопротивления пленки R_n на поверхности проводника [4]

$$R_k = R_{суж} + R_n. \quad (2)$$

Сопротивление пленки характеризуется зависимостью [4]

$$R_n = \rho_{э\kappa\theta} \Delta / S, \quad (3)$$

где $\rho_{э\kappa\theta}$ – среднее удельное сопротивление пленки материала проводника (Ом·м); Δ – толщина пленки, м; S – поверхность прикосновения, м².

В большинстве случаев [4] пленки на поверхности контактов образуются под действием кислорода в воздухе, озона, азота и других химических реагентов. Они имеют толщину $\Delta \approx 10^{-8}$ м и удельное электрическое сопротивление $\rho \approx 10^3$ Ом·м [4].

Для определения переходного сопротивления в месте контакта провода с землей больше всего подходит эллиптическая модель контакта, тогда $R_{суж}$ [4, 5] можно определить, как

$$R_{суж} = \frac{2\rho}{\pi d} \ln \left[\frac{l^2 \sqrt{E}}{1,5 \sqrt{F_k R^2}} \right], \quad (4)$$

где l – длина провода, который контактирует с землей; R – радиус кривизны поверхности; E – модуль упругости земли; F_k – сила, с которой контакт давит на землю, Н.

Для определения радиуса кривизны поверхности углубления от оборванного провода в земле, воспользуемся методом определения твердости, который основывается на измерении размеров лунок, полученных при вдавливании в поверхность исследуемого материала стальных шариков, алмазных конусов или призм [6] (твердость по Бринеллю, по Роквеллу, по Винсеру). Для наглядности приведем метод определения твердости по Бринеллю, в котором определение твердости проводится вдавливанием стального закаленного шарика в поверхность исследуемого тела под действием определенной нагрузки. При этом измеряется диаметр образованной лунки d . Если диаметр шарика D , а нагрузка P , то мерой твердости служит величина E , которая определяется по формуле [6]

$$E = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (5)$$

где P – измеряется в Н; D и d в м; E – в Н/м².

Из (5) можно определить диаметр образованной лунки

$$d = \sqrt{D^2 - \left(D - \frac{2P}{E\pi D} \right)^2}. \quad (6)$$

Считая, что $d = 2R$; P отображает массу оборванного провода в кг/м; D диаметр оборванного провода с учетом (4) и (6) $R_{суж}$

можно определить так

$$R_{суж} = \frac{2\rho}{\pi l} \ln \left[\frac{l^2 \sqrt{E}}{1,5 \sqrt{0,5P \left(D^2 - \left(D - \frac{2P}{E\pi D} \right)^2 \right)}} \right] \quad (7)$$

Выходя из [7] и (6) сопротивление тока растекания можно определить таким образом

$$R_p = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{\sqrt{D^2 - \left(D - \frac{2P}{E\pi D} \right)^2}} \quad (8)$$

Переходное сопротивление в месте падения провода можно определить по формулам (7), (8)

$$R_c = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left[\frac{1,778 l^5 E}{P \left(D^2 - \left(D - \frac{2P}{E\pi D} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right] + \rho_{экс} \Delta / S \quad (9)$$

В формулу (9) вместо ρ подставляют удельное сопротивление почвы.

Протекание по контакту переменного тока вызывает дополнительное увеличение сопротивления контакта вызванного поверхностным эффектом. Токи замыкания на землю от ОЗЗ не превышают десятка ампер, потому влиянием поверхностного эффекта можно пренебречь.

При расчете переходного сопротивления по уравнению (9) необходимо учитывать зависимость удельного сопротивления материала контакта от температуры. В контакте температура по его длине неодинакова. В приближенных расчетах [4] можно определить ρ для средней температуры в зоне сужения контакта. В [4] показано, что средняя температура приблизительно равняется 2/3 максимальной температуры T_M , по отношению к площади прикосновения. При протекании тока замыкания до 30 А, температура почвы не может превышать $T_{МК} = 80 \div 100^\circ\text{C}$. При достижении такой температуры происходит спекание почвы и зависимость удельного сопротивления почвы от температуры в таких пределах ее изменения соответствует прямолинейной зависимости

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0 (T - T_0)} \right), \quad (10)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление почвы при температуре окружающей среды T_0 ; ρ_T – удельное сопротивление при нагреве до температуры T

Рассмотрим процесс нагрева контакта между оборванным проводом и землей. Электрический ток, который протекает по контакту, выделяет в его переходном сопротивлении $R_{суж}$ тепловую мощность $R_{суж} I^2$. Температура T в месте прикосновения провода к земле будет повышенной по сравнению с температурой провода и земли. Для определения зависимости температуры от параметров контакта и окружающей среды воспользуемся расчетной схемой, которая показана на рис. 1.

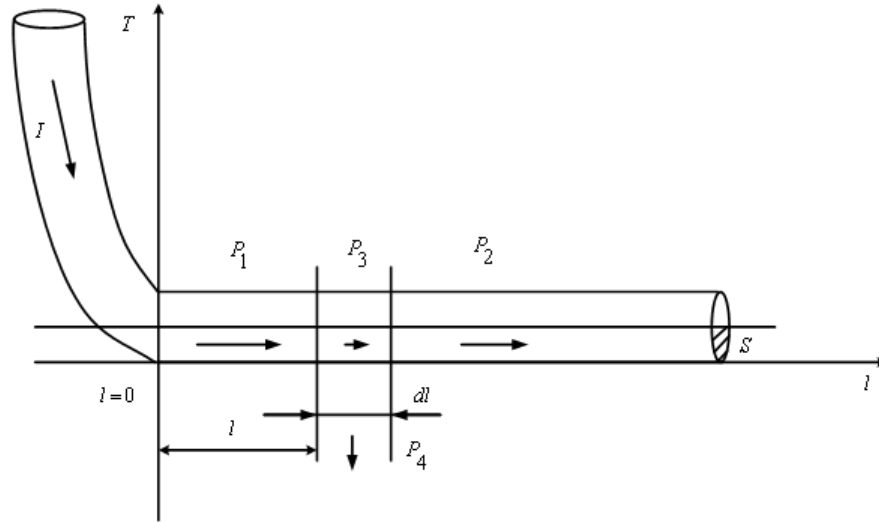


Рис. 1. Схема для расчета температуры контакта оборванного провода с землей

Пусть начало координат зависимости $T = f(l)$ находится в начале контакта с землей. Выделим на расстоянии l от начала координат элемент длиной dl . Баланс мощности в этом элементе запишем в виде выражения $P_1 + P_3 = P_2 + P_4$, где P_1, P_3 – мощности, которые подводятся к контакту; P_2, P_4 – мощности, которые отводятся от контакта (рис. 1).

Мощности определим по общеизвестным уравнениям теплопроводности [8]

$$P_1 = -\lambda S \frac{dT}{dl}; \quad P_2 = -\lambda S \frac{\partial}{\partial l} \left(T + \frac{\partial T}{\partial l} dl \right); \quad P_3 = \rho \frac{I^2}{S} dl; \quad P_4 = k_T (T - T_0) p dl,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; p и S – периметр и площадь поперечного сечения проводника погруженного в землю; k_T – коэффициент теплоотдачи из поверхности проводника; T_0 – температура окружающего среды-воздуха;

После перехода от частных производных к обычным получим дифференциальное уравнение

$$\lambda S d^2 T / dl^2 - k_T p (T - T_0) + \rho I^2 / S = 0. \quad (11)$$

Решением уравнения является

$$T = A_1 e^{-kl} + A_2 e^{kl} + T_{ycm},$$

где A_1, A_2 – постоянные интегрирования; $k = \sqrt{k_T p / \lambda S}$.

Установившееся значение температуры нагрева проводника током можно определить из уравнения (11). Когда первый член уравнения обращается в нуль, тогда

$$T_{ycm} = T_0 + \rho I^2 / p S \quad (12)$$

Исходя из условия, что от места начала контакта $l = 0$ в одну сторону распространяется приблизительно половина мощности в контакте $P_k \approx \frac{1}{2} R_c I^2$ при соответствующих предельных условиях находим выражение для температуры вдоль проводника

$$T = T_0 + \frac{\rho I^2}{k_T p S} + \frac{R_c I^2}{2 \sqrt{\lambda k_T p S}} \exp \left(- \frac{\sqrt{k_T p}}{\lambda S} l \right), \quad (13)$$

Для эллиптической модели контакта из (14)

$$T_M = \left(T_0 + \rho \frac{I^2}{k_T p S} \right) / \left(\cos \left(\frac{I \sqrt{L}}{4 \lambda R} \right) \right), \quad (14)$$

где R – радиус сужения площадки, который определяется из (6) как $R = d/2$; L – постоянная Лоренца определяется для алюминиевых и стальных проводников из таблицы [9].

Для проверки адекватности математической модели определения переходного сопротивления в месте падения провода на землю были проведены экспериментальные исследования переходного сопротивления в месте прикосновения провода к земле. Для экспериментального определения удельного сопротивления почвы использовался метод вертикального электрического зондирования [10] и устройство МС-08. Для определения электрического сопротивления вдоль провода, который лежит на земле, использованы выражения для расчета горизонтально размещенных заземлений [10]. Марка провода, который использовался при проведении эксперимента, АС-35, длина провода 5 м и 10 м. Эксперимент проводился осенью при температуре 10°C для трех типов почвы. Результаты эксперимента занесены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Тип почвы	Длина провода, который лежит на земле, м	Удельное сопротивление почвы, Ом·м	Рассчитанное значение сопротивления в месте контакта проводника с землей R_p , Ом	Экспериментально определенное значение сопротивления в месте контакта проводника с землей R_o , Ом	Относительная погрешность, $\delta = \frac{R_o - R_p}{R_o} 100\%$
Глина	5	44,845	155,234	181	14,26
	10		182,567	180	-14,82
Суглинок	5	91,14	315,487	268	-17,72
	10		167,803	145	-15,75
Песок	10	523,725	964,26	860	-12,12

Проведенные экспериментальные исследования для проверки адекватности модели показали, что погрешность модели не превышает $\pm 20\%$.

Вывод

Создание математической модели для определения переходного сопротивления в месте обрыва провода воздушной линии электропередачи является одним из этапов решения проблемы выявления ОЗЗ.

Модель позволяет с высокой точностью рассчитать переходное сопротивление в месте падения проводника на землю с учетом условий окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цапенко Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6 – 35кВ / Е. Ф. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 120 с.
2. Щуцкий В. И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В. И. Щуцкий, В. О. Жуков, Ю. Н. Ильин. – М.: Энергоиздат, 1986. – 151 с.
3. Замыкания на землю в сетях 6 – 35кВ. Достоинства и недостатки различных защит [Электронный ресурс] / А. И. Шалин // Новости ЭлектроТехники. – №3 (33).. – 2005. Режим доступа к журн.:

<http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php>.

4. Таев И. С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения / И. С. Таев. – М.: Энергия, 1973. – 424 с.
5. Omori T. Contact resistance / T. Omori, T. Ogo // Electr. Engin. Japan, – 1965, – Vol. 85. – №8. – Р. 28 – 43.
6. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. 2-е изд., перераб. и доп. / Л. А. Сена. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
7. Князевский Б. А. Охрана труда в электроустановках / Б. А. Князевский, Т. П. Марусова, Н. В. Шипунов, Н. А. Чекалин. – М.: Энергия, 1970. – 320 с.
8. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг; пер. с англ. В. В. Яковлева, В. И. Колядина. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
9. Заленский А. М. Тепловые расчёты электрических аппаратов / А. М. Заленский, Г. А. Кукеков. – М.: Энергия, 1967. – 258 с.
10. Михайлов М. И. Заземляющие устройства в установках электросвязи / М. И. Михайлов, С. А. Соколов. – М.: Связь, 1971. – с. 199.

Лежнюк Пётр Демянович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем, тел. : (0432) 545024.

Кутина Марина Васильевна – аспирантка кафедры электрических станций и систем, e - mail: marinakytina@meta.ua, тел.: (0432) 468384

Винницкий национальный технический университет.