

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

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ОПОРУ В МІСЦІ ОБРИВУ ПРОВОДУ ПОВІТРЯНОЇ ЛЕП

У статті проведено аналіз факторів, що впливають на значення перехідного опору в місці падіння проводу повітряної лінії електропередачі на землю. Запропоновано математичну модель для визначення перехідного опору в місці падіння проводу на землю.

Ключові слова: обрив проводу повітряної лінії електропередачі, перехідний опір.

Вступ

У розподільних мережах з повітряними лініями напругою 6 – 35кВ найбільш розповсюдженим видом пошкодження (60 – 70% від загальної кількості пошкоджень) є однофазні замикання на землю (ОЗЗ) [1, 2]. Причини виникнення замикання на землю різноманітні: електричний пробій ізоляції за рахунок дії внутрішніх і атмосферних перенапруг [1, 2]; механічні пошкодження фазної ізоляції, обрив і падіння проводу повітряних ліній електропередачі на землю або заземлення конструкції; дотик до неізольованих струмоведучих частин людьми або тваринами, помилкові дії обслуговуючого персоналу. В якості основних ознак для виявлення ОЗЗ використовують струм і напругу нульової послідовності або значення повного чи активного опору ізоляції фаз мережі відносно землі при накладанні на мережу стороннього джерела живлення [3]. Електричні характеристики однофазних пошкоджень електроустановок з ізолюваною нейтраллю напругою 6 – 35 кВ не залежать від конкретного призначення електроустановки. Однак велика кількість виникаючих ОЗЗ в самих різних ситуаціях і неістотна зміна електричних параметрів ЛЕП у порівнянні з нормальним режимом роботи ускладнює вибір оптимальних методів попередження, виявлення і ліквідації ОЗЗ.

Аналіз попередніх досліджень. Математичні залежності електричних величин при ОЗЗ від параметрів електроустановки викладені в ряді досліджень [1, 2, 3]. Всі існуючі ОЗЗ можна поділити на дві групи – бездугові і дугові. Бездугові замикання виникають за наявності надійного гальванічного зв'язку пошкодженої фази з землею. Форма кривої струму бездугового ОЗЗ суттєво залежить від активного опору контакту проводу з землею R_k і опору розтікання струму R_p .

Результати досліджень [1] показали, що стійке горіння дуги в повітряних мережах напругою 6 – 35 кВ можливе лише у разі пробою ізоляторів на дерев'яних траверсах опор ПЛ, якщо перехідний опір складатиме декілька десятків кОм.

Найбільш небезпечним є ОЗЗ при обриві проводу повітряної лінії електропередачі зі сторони джерела живлення [3]. У місці падіння може виникнути значний перехідний опір, який суттєво знижує значення струму замикання на землю і засоби від ОЗЗ в більшості випадків не спрацьовують. Складається хибне враження про відсутність пошкодження.

Крім цього на стороні низької напруги трансформаторів, які живляться від пошкодженої лінії, спотворюються міжфазні напруги, і споживачі переходять в несиметричний режим роботи, небезпечний з точки зору перегріву обмоток трансформаторів і двигунів.

Метою роботи є оцінка перехідного опору в місці ОЗЗ шляхом побудови математичної моделі, яка відповідає реальному процесу обриву проводу, для врахування його значення при розрахунку струму ОЗЗ.

Відомо, що перехідний опір в місці падіння проводу R_s включає в себе послідовне

з'єднання перехідного опору контакту провідника з землею R_k і опір розтікання струму замикання в землю R_p , тобто [4]

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

Перехідний опір R_k визначається опором в місці звужених ділянок проводу R_{zg} , по яких проходить струм до площадок замикання, і опору плівки R_n на поверхні провідника [4]

$$R_k = R_{zg} + R_n. \quad (2)$$

Опір плівки характеризується залежністю [4]

$$R_n = \rho_{екв} \Delta / S, \quad (3)$$

де $\rho_{екв}$ – середній питомий опір плівки матеріалу провідника (Ом·м); Δ – товщина плівки, м; S – поверхня дотику, м².

У більшості випадків [4] плівки на поверхні контактів утворюються під дією кисню в повітрі, озону, азоту та інших хімічних реагентів. Вони мають товщину $\Delta \approx 10^{-8}$ м і питомий електричний опір $\rho \approx 10^3$ Ом·м [4].

Для визначення перехідного опору в місці контакту проводу з землею найбільше підходить еліптична модель контакту, тоді R_{zg} [4, 5] можна визначити, як

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

де l – довжина проводу, що контактує з землею; R – радіус кривизни поверхні; E – модуль пружності землі; F_k – сила, з якою контакт тисне на землю, Н.

Для визначення радіуса кривизни поверхні заглиблення від обірваного проводу в землі, скористаємося методом визначення твердості, який ґрунтується на вимірюванні розмірів лунок, отриманих при вдавлюванні в поверхню досліджуваного матеріалу сталених кульок, алмазних конусів або призм [6] (твердість за Бринелем, за Роквеллом, за Вінсером). Для наочності наведемо метод визначення твердості за Бринелем, в якому визначення твердості проводиться вдавлюванням сталеної загартованої кульки в поверхню досліджуваного тіла під дією певного навантаження. При цьому вимірюється діаметр утвореної лунки d . Якщо діаметр кульки D , а навантаження P , то мірою твердості слугує величина E , яка визначається за формулою [6]

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

де P – вимірюється в Н; D і d в м; E – в Н/м².

Із (5) можна визначити діаметр утвореної лунки

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

Вважаючи, що $d = 2R$, P відображає масу обірваного проводу в кг/м, а D діаметр обірваного проводу з врахуванням (4) і (6) R_{zg} можна визначити так

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

Виходячи із [7] і (6), опір струму розтікання можна визначити таким чином

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

Перехідний опір в місці падіння проводу можна визначити за формулами (7), (8)

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

У формулу (9) замість ρ підставляють питомий опір ґрунту.

Протікання по контакту змінного струму викликає додаткове збільшення опору контакту, викликаного поверхневим ефектом. Струми замикання на землю від ОЗЗ не перевищують десятка ампер, тому впливом поверхневого ефекту можна знехтувати.

При розрахунку перехідного опору за рівнянням (9) необхідно враховувати залежність питомого опору матеріалу контакту від температури. У контакті температура по його довжині неоднакова. У наближених розрахунках [4] можна визначити ρ для середньої температури в зоні звуження контакту. У [4] показано, що середня температура приблизно дорівнює $2/3$ максимальної температури T_M , по відношенню до площі дотику. При протіканні струму замикання до 30 А, температура ґрунту не може перевищувати $T_{МК} = 80 \div 100^\circ\text{C}$. При досягненні такої температури відбувається спікання ґрунту, і залежність питомого опору ґрунту від температури в таких межах її зміни відповідає прямолінійній залежності

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

де ρ_0 – питомий опір ґрунту при температурі навколишнього середовища T_0 ; ρ_T – питомий опір при нагріві до температури T .

Розглянемо процес нагріву контакту між обірваним проводом і землею. Електричний струм, який протікає по контакту, виділяє в його перехідному опорі $R_{зв}$ теплову потужність $R_{зв} I^2$. Температура T в місці дотику проводу до землі буде підвищеною в порівнянні з температурою проводу і землі. Для визначення залежності температури від параметрів контакту і оточуючого середовища скористаємося розрахунковою схемою, що показана на рис. 1.

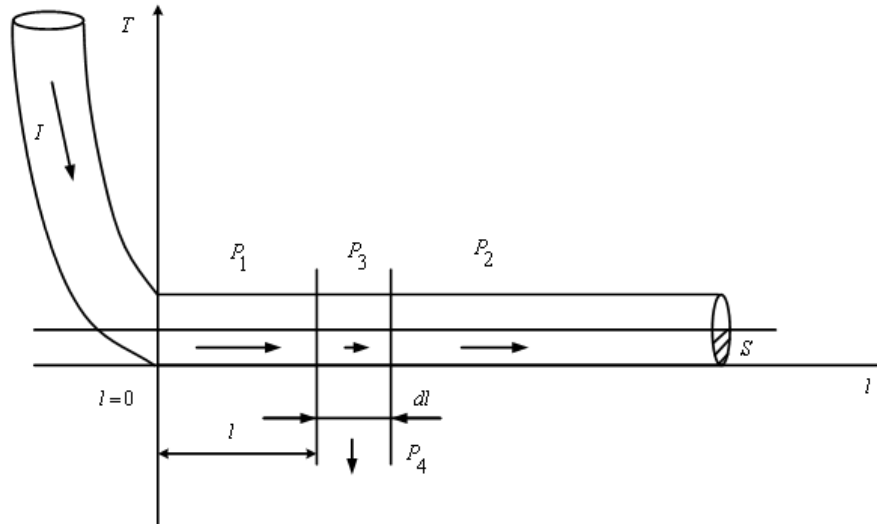


Рис. 1. Схема для розрахунку температури контакту обірваного проводу з землею

Нехай початок координат залежності $T = f(l)$ знаходиться на початку контакту з землею. Виділимо на відстані l від початку координат елемент довжиною dl . Баланс потужності в цьому елементі запишемо у вигляді виразу $P_1 + P_3 = P_2 + P_4$, де P_1, P_3 – потужності, що підводяться до контакту; P_2, P_4 – потужності, що відводяться від контакту (рис. 1).

Потужності визначимо за загальновідомими рівняннями теплопровідності [8]

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

де λ – коефіцієнт теплопровідності; p і S – периметр і площа поперечного перерізу провідника, заглибленого в землю; k_T – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні провідника; T_0 – температура навколишнього середовища-повітря;

Після переходу від частинних похідних до звичайних отримаємо диференціальне рівняння

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

Розв'язком рівняння є

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

де A_1, A_2 – постійні інтегрування; $k = \sqrt{k_T \rho / \lambda S}$.

Усталене значення температури нагріву провідника струмом можна визначити із рівняння (11). Коли перший член рівняння перетворюється на нуль, тоді

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

Виходячи із умови, що від місця початку контакту $l = 0$ в одну сторону розповсюджується приблизно половина потужності в контакт $P_k \approx \frac{1}{2} R_{зв} I^2$ при відповідних граничних умовах знаходимо вираз для температури вздовж провідника

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

Для еліптичної моделі контакту із (14)

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

де R – радіус звуження площадки, який визначається із (6) як $R = d/2$; L – постійна Лоренца визначається для алюмінієвих та сталевих провідників із таблиці [9].

Для перевірки адекватності математичної моделі визначення перехідного опору в місці падіння проводу на землю були проведені експериментальні дослідження перехідного опору в місці дотику проводу до землі. Для експериментального визначення питомого опору ґрунту використовувався метод вертикального електричного зондування [10] та пристрій МС-08. Для визначення електричного опору вздовж проводу, що лежав на землі використано вирази для розрахунку горизонтально розміщених заземлювачів [10]. Марка проводу, що використовувався при проведенні експерименту – АС-35, довжина проводу 5 м та 10 м. Експеримент проводився восени при температурі 10°C для трьох типів ґрунту. Результати експерименту занесені в таблицю 1.

Таблиця 1

Результати експерименту

Тип ґрунту	Довжина проводу, що лежить на землі, м	Питомий опір ґрунту, Ом·м	Розраховане значення опору в місці контакту провідника з землею R_p , Ом	Експериментально визначене значення опору в місці контакту провідника з землею R_e , Ом	Відносна похибка, $\delta = \frac{R_e - R_p}{R_e} 100\%$
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
Пісок	10	523,725	964,26	860	-12,12

Проведені експериментальні дослідження для перевірки адекватності моделі показали, що похибка моделі не перевищує $\pm 20\%$.

Висновок

Створення математичної моделі для визначення перехідного опору в місці обриву проводу повітряної лінії електропередачі є одним з етапів вирішення проблеми виявлення ОЗЗ.

Модель дозволяє з високою точністю розрахувати перехідний опір в місці падіння провідника на землю, з врахуванням умов навколишнього середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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 поврежденных 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 Петро Дем'янович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432) 545024

Кутіна Марина Василівна – аспірант кафедри електричних станцій та систем, e-mail: marinakytina@meta.ua, тел.: (0432) 468384

Вінницький національний технічний університет.