

## СУЧАСНІ ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ПОШКОДЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Єрмоленко А.Л., студент

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем*

**Вступ.** Магістральні та розподільні електричні мережі (ЕМ) відрізняються засобами аналізу аварійних подій та виявлення місць пошкодження повітряних ліній (ПЛ) ЕМ. В інформаційному аспекті пункти диспетчерського керування розподільних ЕМ значно поступаються відповідним пунктам електроенергетичних систем (ЕЕС) – технічними засобами, складом та об'ємами одержуваної оперативної інформації. Задача аналізу післяаварійного стану ЕМ (обумовленого пошкодженням ПЛ) виконується в розподільних ЕМ в умовах неповноти оперативної інформації і належить до головних задач диспетчерського керування ЕМ, від результатів розв'язання якої внаслідок прийняття відповідних рішень черговим диспетчером ЕМ залежатиме час усунення пошкоджень, що відповідно впливатиме на обсяги недовідпуску електроенергії та матеріальні збитки, обумовлені аварійним знеструмленням споживачів, не кажучи вже про додаткові транспортні витрати (насамперед пального) оперативно-виїзних бригад, обумовлені пошуком місця аварійного пошкодження, «незручності» в соціальній сфері та ін. [1].

Нові можливості для розв'язання низки актуальних задач оперативного керування як ЕЕС, так і розподільними ЕМ, з'явилися внаслідок «залучення» до розв'язання таких задач засобів штучного інтелекту, наприклад, [1-3], та засобів, реалізованих на базі цифрової реєстрації сигналів з використанням сучасних інформаційних технологій, наприклад [4-6]. Серед зазначених задач однією із найбільш актуальних є задача визначення місця пошкодження (ВМП) ПЛ. Ця задача є однією із задач, що оперативно розв'язуються засобами сучасних систем моніторингу параметрів режиму ЕЕС та діагностування стану електроенергетичних об'єктів на базі цифрової реєстрації сигналів – параметрів режимів ЕЕС [5, 6].

**Мета роботи.** Проаналізувати особливості розв'язання задачі ВМП ПЛ засобами сучасних систем моніторингу параметрів режиму ЕЕС.

**Матеріали і результати досліджень.** В момент аварії з появою струму замикання на землю в місці замикання виникне електрична дуга, перехідний опір якої позначимо  $R_d$ . При розв'язанні задачі ВМП ПЛ необхідно визначати комплексний опір контуру короткого замикання (КЗ). Формалізуючи задачу, слід виходити із заступної схеми ПЛ із зосередженими параметрами і враховувати особливості режимів нейтралі ЕМ. Контур КЗ складають лише активні та реактивні опори, тому для перехідного режиму падіння напруги описується рівнянням:

$$u = Ri + L \frac{di}{dt}.$$

При інтегруванні рівняння на відрізках часу  $[t_1, t_1 + \Delta t]$  та  $[t_2, t_2 + \Delta t]$  параметри  $R$  та  $L$  визначаються із системи двох рівнянь:

$$\begin{aligned} R \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i dt + L \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} di &= \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} u dt; \\ R \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i dt + L \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} di &= \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} u dt, \end{aligned}$$

розв'язуючи які, одержимо:

$$R = \frac{S_{1u} S'_{2i} - S_{2u} S'_{1i}}{S_{1i} S'_{2i} - S_{2i} S'_{1i}}, \quad (1)$$

$$L = \frac{S_{1i} S_{2u} - S_{1u} S_{2i}}{S_{1i} S'_{2i} - S_{2i} S'_{1i}}, \quad (2)$$

$$\text{де } S_{1u} = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} u dt; \quad S_{2u} = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} u dt; \quad S_{1i} = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i dt; \quad S_{2i} = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i dt; \quad S'_{1i} = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} di; \quad S'_{2i} = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} di.$$

Обчислення інтегралів виконується в масштабі реального часу, по мірі надходження поточних дискретних значень струмів та напруги від аналого-цифрових перетворювачів, що входять до складу цифрових реєстраторів сигналів систем моніторингу.

Інший варіант алгоритму для визначення параметрів  $R$  і  $L$ , що теж використовується в зазначених системах моніторингу, використовує метод найменших квадратів. У цьому випадку мінімізується сума квадратів відхилень:

$$\Psi = \sum_{k=1}^N \left( \int_{t_0}^{t_k} u(t) dt - R \int_{t_0}^{t_k} i(t) dt - L \int_{i(t_0)}^{i(t_k)} di \right)^2 \rightarrow \min.$$

В результаті виконання традиційної для методу найменших квадратів процедури одержання системи лінійних рівнянь відносно невідомих  $R$  і  $L$  та її розв'язання, визначаються вирази для  $R$  і  $L$ , які відповідають залежностям (1), (2), враховуючи, що:

$$\begin{aligned} S_{1u} &= \sum_{k=1}^N \int_{t_0}^{t_k} u(t) dt \int_{t_0}^{t_k} i(t) dt; & S_{2u} &= \sum_{k=1}^N \left( \int_{t_0}^{t_k} u(t) dt \right) (i(t_k) - i(t_0)); \\ S_{1i} &= \sum_{k=1}^N \left( \int_{t_0}^{t_k} i(t) dt \right)^2; & S'_{2i} &= \sum_{k=1}^N (i(t_k) - i(t_0))^2; & S_{2i} &= S'_{1i} = \sum_{k=1}^N \left( \int_{t_0}^{t_k} i(t) dt \right) (i(t_k) - i(t_0)). \end{aligned}$$

Обчислення  $S_{1u}$ ,  $S_{2u}$ ,  $S_{1i}$ ,  $S_{2i}$ ,  $S'_{1i}$ ,  $S'_{2i}$  виконується засобами розв'язання задачі ВМП ПЛ в масштабі реального часу з використанням плинних значень струмів і напруги.

Можливе застосування також іншого способу аналітичного розв'язання рівняння для контуру КЗ. Наступний підхід до ВМП ПЛ стосується, переважно, ЕМ, які функціонують із глухозаземленою нейтраллю.

Вихідне рівняння у вигляді рівності дійсної та уявної частин має такий вигляд:

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A \times (R_A + j \underline{X}_A) \times l + \underline{I}_B \times \underline{Z}_{AB} \times l + \underline{I}_C \times \underline{Z}_{AC} \times l + \underline{U}_D, \quad (3)$$

де  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  – комплексні значення вимушеної періодичної складової струмів КЗ;  $R_A, \underline{X}_A$  – активний і реактивний опір ПЛ;  $\underline{Z}_{AB}, \underline{Z}_{AC}$  – опір взаємодуції між фазами А і В, А і С;  $l$  – відносна відстань до місця пошкодження;  $\underline{U}_D$  – спад напруги в місці пошкодження, визначається добутком струму нульової послідовності на опір дуги та контуру заземлення  $\underline{U}_D = \underline{I}_0 \times R_D$ , має такий вигляд:

$$\begin{aligned} U_A^c &= l \times (\underline{I}_A^c \times R_A - \underline{I}_A^s \times X_A + \underline{I}_B^c \times R_{AB} - \underline{I}_B^s \times X_{AB} + \underline{I}_C^c \times R_{AC} - \underline{I}_C^s \times X_{AC}) + \underline{I}_0^c \times R_D, \\ U_A^s &= l \times (\underline{I}_A^s \times R_A + \underline{I}_A^c \times X_A + \underline{I}_B^s \times R_{AB} + \underline{I}_B^c \times X_{AB} + \underline{I}_C^s \times R_{AC} + \underline{I}_C^c \times X_{AC}) + \underline{I}_0^s \times R_D. \end{aligned} \quad (4)$$

У виразі (4) символ «с» означає косинусну або дійсну частину комплексної величини, а «s» – синусну або уявну.

Якщо прийняти припущення про рівність аргументів струмів нульової послідовності з боку вимірювання та в місці пошкодження  $\arg(\underline{I}'_0) \approx \arg(\underline{I}_0)$ , то величину  $\underline{U}_D$  можна визначити як  $\underline{U}_D \approx \underline{I}'_0 \times \Omega$ , де  $\Omega$  – лише активний опір.

Відносну відстань до місця пошкодження можна визначити з рівнянь (4) з двома невідомими  $l$  та  $\Omega$ :

$$l = \frac{U_A^c \times \underline{I}_0^s - U_A^s \times \underline{I}_0^c}{\Delta^c \times \underline{I}_0^s - \Delta^s \times \underline{I}_0^c} \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta^c &= \underline{I}_A^c \times R_A - \underline{I}_A^s \times X_A + \underline{I}_B^c \times R_{AB} - \underline{I}_B^s \times X_{AB} + \underline{I}_C^c \times R_{AC} - \underline{I}_C^s \times X_{AC}, \\ \Delta^s &= \underline{I}_A^s \times R_A + \underline{I}_A^c \times X_A + \underline{I}_B^s \times R_{AB} + \underline{I}_B^c \times X_{AB} + \underline{I}_C^s \times R_{AC} + \underline{I}_C^c \times X_{AC}. \end{aligned}$$

**Висновки.** Розглянуті способи розв'язання рівняння, складеного за контуром КЗ, містять методичну похибку, обумовлену прийняттям припущення про рівність аргументів струмів КЗ з двох боків пошкодженої ПЛ з метою вилучення із розгляду перехідного опору  $R_D$ .

Методи знаходження ВМП ПЛ ґрунтуються на залежності в момент короткого замикання аварійного режиму (струмів, напруг) від параметрів елементів електричної мережі. Як свідчать результати ВМП ПЛ різних ЕМ, основними чинниками, що призводять до похибки ВМП ПЛ (впливають на точність ВМП ПЛ), є струми відгалуження електричних підстанцій, взаємодуція електромагнітно-пов'язаних ліній, неточність завдання опорів

прямої і нульової послідовностей, похибки визначення параметрів заступних схем ЕМ та інше.

#### **Перелік посилань**

1. Буткевич О.Ф., Парус Є.В. Оперативний аналіз післяаварійного стану розподільних електричних мереж засобами інтелектуальної системи // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. – 2018, вип. 51. – С. 5-12.

2. Butkevych O.F., Kyrylenko O.V., Pavlovskiy V.V., Parus E.V., Katsadze T.L. Power electrical system fault diagnosis based on expert system, simulator and artificial neural nets // Зб. наук. праць Донецького держ. техн. ун-ту. Серія “Електротехніка і енергетика”. Вип. 21: Донецьк: ДонДТУ, 2000. – С. 52- 56.

3. Кириленко А.В. Вопросы применения искусственных нейронных сетей для определения мест повреждений на линиях электропередачи / Кириленко А.В., Буткевич А.Ф., Блинов И.В. // Праці ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 7 – 12.

4. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф., Авраменко В.М., Прихно В.Л., Черненко П.О. Організація моніторингу режимів енергооб’єднання України та нові можливості розв’язання задач диспетчерського керування // Наука та інновації. – 2009, Т 5, № 6. – С. 25-35.

5. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Інформаційно-діагностичний комплекс “Регіна” // Новини енергетики. – 2000. – № 10. – С. 44-47

6. Буткевич О.Ф., Тутик В.Л. Моніторинг та діагностування електроенергетичних об’єктів та систем України на базі комплексів “Регіна” // Гідроенергетика України. – 2010, № 3. – С. 46-49.