

适用于任何具体结构的输电线路精确故障定位

卢继平 叶一麟

(重庆大学电气工程系 400044 重庆)

摘 要 针对输电线路的实际结构,提出了一种适用于任何具体结构的超高压输电线路的精确故障定位方法。该方法基于模分析理论,采用矩阵特征值和特征向量原理,对多导线波动方程进行矩阵相似变换,得到互相独立的模量上的波动方程,分别对每个模量波动方程求解后,将计算结果反变换到相量。该方法很好地克服了输电线参数实际上的不平衡对故障测距精度的影响,既适用于不换位线路,也适用于各种换位线路。计算机数字仿真试验结果表明,其测距结果十分准确。

关键词 故障测距 输电线参数 模分析理论

0 引言

高压输电线路的故障定位是提高电力系统安全经济运行的重要措施之一。多数方法是采用对称分量法作为故障测距的分析基础^[1~3]。电力系统中的输电线路根据实际条件的不同,大致可分为三种类型:不换位线路、不完全换位线路和完全换位线路。前两种输电线路的参数不平衡,第三种输电线路从线路的首末两端来看,其线路参数平均起来是平衡的^[4](这已由现场测试结果证实)。但由于故障点可在线路上任意点出现,从检测端到故障点间的线路参数不可能平衡,因此,应用在平衡参数基础上推导的对称分量法来求解输电线故障距离会带来误差。

本文提出的精确故障定位方法基于模分析理论,适用于任何具体结构。数字仿真试验表明,其测距结果十分准确。

1 算法原理

1.1 不换位输电线路

图 1 所示为 F 点发生故障的不换位线路示意图。

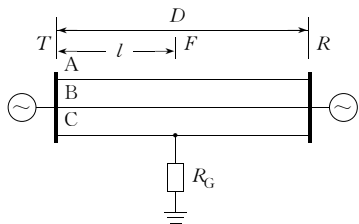


图 1 不换位输电线路

Fig. 1 The untransposed transmission line

由模分析理论可知,故障点 F 的模电压可表示

如下^[5,6]:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{mF} &= \dot{U}_{mT} \operatorname{ch} \gamma l - Z_{cm} \dot{I}_{mT} \operatorname{sh} \gamma l \\ \dot{U}_{mF} &= \dot{U}_{mR} \operatorname{ch} \gamma (D - l) - Z_{cm} \dot{I}_{mR} \operatorname{sh} \gamma (D - l)\end{aligned}\quad (1)$$

式中 γ 为传输常数; Z_{cm} 为模特征阻抗; $\dot{U}_{mF}$, $\dot{U}_{mR}$ 分别为 F 点、 T 端、 R 端的模电压; $\dot{I}_{mT}$, $\dot{I}_{mR}$ 为 T 端、 R 端的模电流,流入线路为正。

模电压、模电流可由相电压、相电流经过下面的相-模变换得到:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{mT} &= S^{-1} \dot{U}_T & \dot{U}_{mR} &= S^{-1} \dot{U}_R \\ \dot{I}_{mT} &= Q^{-1} \dot{I}_T & \dot{I}_{mR} &= Q^{-1} \dot{I}_R \\ S^{-1} &= Q^T\end{aligned}$$

其中 $\dot{U}_T, \dot{I}_T, \dot{U}_R, \dot{I}_R$ 为输电线两端的相电压、相电流; S 为特征向量变换矩阵,可根据输电线参数求得。

由式(1)、式(2)可得:

$$\begin{aligned}\operatorname{ch} \gamma l \cdot (\dot{U}_{mT} - \dot{U}_{mR} \operatorname{ch} \gamma D + Z_{cm} \dot{I}_{mR} \operatorname{sh} \gamma D) &= \\ \operatorname{sh} \gamma l \cdot (Z_{cm} \dot{I}_{mR} \operatorname{ch} \gamma D - \dot{U}_{mR} \operatorname{sh} \gamma D + Z_{cm} \dot{I}_{mT})\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\text{令 } N &= \dot{U}_{mT} - \dot{U}_{mR} \operatorname{ch} \gamma D + Z_{cm} \dot{I}_{mR} \operatorname{sh} \gamma D \\ H &= Z_{cm} \dot{I}_{mR} \operatorname{ch} \gamma D - \dot{U}_{mR} \operatorname{sh} \gamma D + Z_{cm} \dot{I}_{mT}\end{aligned}$$

由式(3)可推导出:

$$l = \frac{\ln \frac{H + N}{H - N}}{2\gamma}$$

$$\text{令 } x_1 + jx_2 = \frac{H + N}{H - N}, \quad \alpha = \arctan \frac{x_2}{x_1}$$

则

$$\begin{aligned}l &= \frac{\ln(x_1 + jx_2)}{2\gamma} = \frac{\ln \sqrt{x_1^2 + x_2^2} + j(\alpha \pm 2k\pi)}{2\gamma} = \\ &= \frac{\ln \sqrt{x_1^2 + x_2^2} + j\alpha}{2\gamma} \pm j \frac{2k\pi}{2\gamma}\end{aligned}\quad (4)$$

由于故障距离为正实数,且由于式(4)中第二项与故障点无关,又为虚数,故取 $k = 0$ 。因此式(4)变为:

$$l = \frac{\ln \sqrt{x_1^2 + x_2^2} + j\alpha}{2\gamma} \tag{5}$$

式(5)即为不换位线路的故障测距公式,其结果只有单根。

应用式(5)进行故障测距时,从理论上讲,电压、电流可以选择任意模分量,但在进行实际故障测距时,最好选择空间模一分量,这样可以避免选择故障类型和故障相别。

利用下面给定的线路参数,对故障测距公式(5)分别按正序分量^[1]、模一分量进行故障测距,数字仿真的部分结果如表 1、表 2 所示。

故障点的故障电阻如图 2 所示。

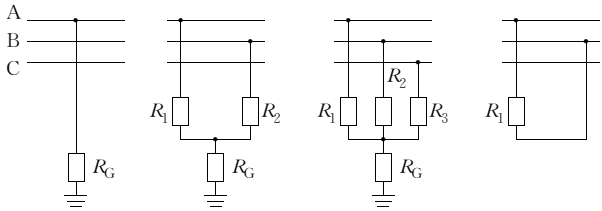


图2 故障点故障电阻
Fig. 2 The fault resistances at fault points

$$\{Z_1\}_{\Omega \cdot km^{-1}} = \begin{bmatrix} 0.088\ 5 + j0.402\ 438 & 0.059\ 5 + j0.137\ 602 & 0.056\ 8 + j0.098\ 646 \\ 0.059\ 5 + j0.137\ 602 & 0.086\ 9 + j0.403\ 066 & 0.059\ 5 + j0.137\ 602 \\ 0.056\ 8 + j0.098\ 646 & 0.059\ 5 + j0.137\ 602 & 0.088\ 5 + j0.402\ 438 \end{bmatrix}$$

$$\{Y_1\}_{S, km^{-1}} = j \begin{bmatrix} 3.695\ 89 & -0.572\ 43 & -0.145\ 93 \\ -0.572\ 43 & 3.735\ 13 & -0.572\ 43 \\ -0.145\ 93 & -0.572\ 43 & 3.695\ 89 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

表 1 不换位线路的故障测距结果

Table 1 The fault location results of untransposed transmission line: comparison between method based on positive sequence component and that on natural mode 1 component

实际故障距离	AG 故障计算距离		ABG 故障计算距离		ABCG 故障计算距离		AB 故障计算距离	
	基于正序分量	基于模一分量	基于正序分量	基于模一分量	基于正序分量	基于模一分量	基于正序分量	基于模一分量
20.00	14.21	20.00	22.75	20.00	20.41	20.00	24.05	20.00
100.00	93.46	100.00	101.60	100.00	100.34	100.00	102.67	100.00
200.00	193.60	200.00	200.42	200.00	200.18	200.00	200.92	200.00
300.00	294.48	300.00	299.16	300.00	300.00	300.00	299.08	300.00
380.00	375.15	380.00	377.87	380.00	379.88	380.00	377.50	380.00

注: $R_G = 100.0\ \Omega$; $R_1 = 10.0\ \Omega$; $R_2 = 10.0\ \Omega$; $R_3 = 10.0\ \Omega$; $\delta_T = 60.0^\circ$; $\delta_R = 0^\circ$; $D = 400\ km$ 。

表 2 不换位线路 AG 故障的测距结果

Table 2 The AG fault location results of untransposed transmission line: comparison between method based on positive sequence component and that on natural mode 1 component

实际故障距离	$R_G = 0\ \Omega, \delta_T = 0^\circ$		$R_G = 0\ \Omega, \delta_T = 60.0^\circ$		$R_G = 100\ \Omega, \delta_T = 60.0^\circ$		$R_G = 100\ \Omega, \delta_T = -60.0^\circ$	
	基于正序分量	基于模一分量	基于正序分量	基于模一分量	基于正序分量	基于模一分量	基于正序分量	基于模一分量
20.00	20.33	20.00	19.75	20.00	16.98	20.00	24.85	20.00
100.00	100.18	100.00	99.47	100.00	96.46	100.00	105.52	100.00
200.00	200.00	200.00	199.81	200.00	196.71	200.00	206.40	200.00
300.00	299.82	300.00	300.36	300.00	297.42	300.00	306.54	300.00
380.00	379.67	380.00	380.44	380.00	377.79	380.00	385.80	380.00

注: $D = 400\ km$; $\delta_R = 0^\circ$ 。

由仿真结果可以看出:

(1) 对于不换位输电线路,采用对称分量法进行故障测距,将给测距结果带来误差,其误差大小与故障电阻、故障类型、系统功角及故障点位置有关。

(2) 利用式(5)采用空间模一分量进行故障测距,则可以克服上述缺陷,做到精确故障定位。

1.2 换位输电线路

在电力系统中,大量出现的是换位输电线路,其中甚至有多个全换位线路,同时还包括不完全换位线路。我国目前已架设的 500 kV 输电线路大多采用一个全换位的方式。架设换位线路的目的是使线路参数从整体上平衡。完全换位之后,从线路始端到末端,线路参数是平衡的。但对于故障测距来说,从

检测端到故障点,其线路参数极少平衡,只有在完全换位点发生故障时,其线路参数才是平衡的。对于图3所示的换位线路,由于每段线路的相位排列顺序不一样,每段线路中的特征向量变换矩阵 S 也就不同,因此在应用式(5)进行故障测距时,将 S_1, S_2, S_3 及正序分量分别代入,得到的测距结果列于表3。

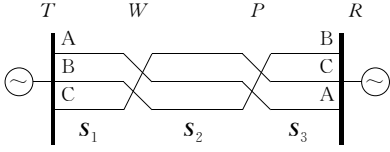


图3 换位输电线路

Fig. 3 The transposed transmission line

数字仿真试验的系统模型参数如下。

- (1) 完全换位线路长度: TW 段 200 km, WP 段 200 km, PR 段 200 km;
- (2) 不完全换位线路长度: TW 段 150 km, WP 段 250 km, PR 段 200 km;
- (3) 线路 TW 段参数矩阵与前例不换位线路参数矩阵结构相同;
- (4) 线路 WP, PR 段的 Z, Y 参数依照前面 Z_1, Y_1 变换相别的位置而得。

表3 换位线路采用不同模变换时,
A相接地时的故障测距结果

Table 3 The AG fault location results
of transposed line by different modal change matrixes

模变换方式	故障测量 距离/km	模变换方式	故障测量 距离/km
S_1	96.35	S_3	111.67
S_2	110.3	正序分量	101.65

注:实际故障距离 $l = 100.0$ km; $R_G = 100.0 \Omega$; $\delta_T = \delta_R = 0^\circ$; $D = 600.0$ km。

从表3可以看出,对换位输电线路,如果从线路两端来直接代入式(5)进行故障测距,不论采用何种模式,测距结果均有误差,其误差大小与选用的模变换矩阵有关。对换位线路来说,每一个换位段都可以当作不换位线路。在此基础上,总结出了正确计算换位线路故障点的方法,步骤如下:

(1) 用正序分量电流、电压代入式(5),计算出一个故障距离,这个故障距离与真实的故障距离有误差,但可据此粗略地判断出故障区段。

(2) 判断出故障区段后,利用长线方程计算出发生故障的输电线路区段换位点两端的电压、电流,然后利用故障区段的变换矩阵 S ,计算出本区段的模一分量电流、电压,代入式(5),即可求解出故障点精确位置。

(3) 当故障发生在换位点附近时,步骤(1)可能

会出现故障区段的判断错误,造成在非故障区段进行故障测距,可以证明(证明见另文介绍)这时的测距结果必为负值或大于本非故障区段的值,据此可知道真实的故障区段。重复步骤(2),即可计算出准确的故障距离。

举例来说,当故障发生在 WP 之间时, W 端和 P 端的相电压、相电流,可以用式(6)来求出。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{U}_W \\ \dot{I}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SAS^{-1} & SBQ^{-1} \\ QCS^{-1} & QDQ^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_T \\ \dot{I}_T \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{U}_P \\ \dot{I}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SA'S^{-1} & SB'Q^{-1} \\ QC'S^{-1} & QD'Q^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $A = [\text{ch } \gamma l_{TW}] = -D$; $B = [-\text{sh } \gamma l_{TW}]$; $C = [\text{sh } (\gamma l_{TW})/Z_{cm}]$; $A' = [\text{ch } \gamma l_{PR}] = -D'$; $B' = [-\text{sh } \gamma l_{PR}]$; $C' = [\text{sh } (\gamma l_{PR})/Z_{cm}]$, 均为三阶对角矩阵。

知道 W, P 点电压和电流后,就可以用式(5)和 WP 线路之间的特征向量变换矩阵 S 来计算实际故障距离。对图3所示的换位线路,应用上述测距方法,其数字仿真计算的部分结果列于表4~表6。

2 数字仿真试验结果分析

由以上结果可以看出:

(1) 当线路参数完全平衡时,基于正序分量和基于模一分量两种方法的测距结果都十分准确。

(2) 对于不换位输电线路,如果采用对称分量法进行故障测距,由于对称分量模式与不换位线路不相适应,其测距结果必然会有误差;而对于换位输电线路,采用对称分量法也同样会给故障测距带来误差,这是由于从线路始端到故障点间的参数并不平衡,即使是采用模分析中的模分量,由于换位线路的每个区段模变换矩阵不相同,若直接从两个检测端进行故障测距,其测距结果也存在一定误差。

(3) 本文提出的测距方法,由于考虑了输电线路的实际结构特点,按实际故障区段构成相适应的模式系统,因此能够很好地适应不同的换位与不换位线路,测距结果十分准确。

(4) 本文的测距方法不受故障电阻(包括不对称的故障电阻)的影响,也不受系统运行方式变化的影响。由于选择了模分析中的空间模一分量,在故障测距时,不需要判断故障类型和故障相别。该方法简明有效,概念清晰。

(5) 该方法对任意换位线路均适宜,包括多个换位的线路。

表 4 平衡线路的故障测距结果

Table 4 The fault location results of equilibrium transmission line:
comparison between method based on positive sequence component and that on natural mode 1 component

实际故障距离	AG 故障计算距离		ABG 故障计算距离		ABCG 故障计算距离		AB 故障计算距离	
	基于正序分量		基于正序分量		基于正序分量		基于正序分量	
	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量
20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
380.00	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00

注: $R_G = 100.0\ \Omega$; $R_1 = 10.0\ \Omega$; $R_2 = 10.0\ \Omega$; $R_3 = 10.0\ \Omega$; $\delta_T = 60.0^\circ$; $\delta_R = 0^\circ$; $D = 400.0\ \text{km}$ 。

表 5 完全换位线路的故障测距结果

Table 5 The fault location results of transmission line with complete transposition:
comparison between method based on positive sequence component and that on natural mode 1 component

实际故障距离	AG 故障计算距离		ABG 故障计算距离		ABCG 故障计算距离		AB 故障计算距离	
	基于正序分量		基于正序分量		基于正序分量		基于正序分量	
	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量
20.00	19.82	20.00	19.09	20.00	19.76	20.00	18.85	20.00
100.00	101.33	100.00	95.75	100.00	99.06	100.00	94.95	100.00
300.00	298.73	300.00	287.40	300.00	299.33	300.00	285.03	300.00
450.00	445.44	450.00	436.90	450.00	450.17	450.00	435.20	450.00
580.00	578.84	580.00	578.02	580.00	579.96	580.00	577.88	580.00

注: $R_G = 100.0\ \Omega$; $R_1 = 10.0\ \Omega$; $R_2 = 5.0\ \Omega$; $R_3 = 3.0\ \Omega$; $\delta_T = 0^\circ$; $\delta_R = 60.0^\circ$; $D = 600.0\ \text{km}$ 。

表 6 不完全换位线路的故障测距结果

Table 6 The fault location results of transmission line with incomplete transposition:
comparison between method based on positive sequence component and that on natural mode 1 component

实际故障距离	AG 故障计算距离		ABG 故障计算距离		ABCG 故障计算距离		AB 故障计算距离	
	基于正序分量		基于正序分量		基于正序分量		基于正序分量	
	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量	基于模一分量
20.00	20.27	20.00	19.06	20.00	19.70	20.00	18.95	20.00
100.00	102.05	100.00	95.88	100.00	99.05	100.00	95.09	100.00
300.00	297.39	300.00	287.22	300.00	299.58	300.00	285.26	300.00
450.00	444.80	450.00	436.78	450.00	450.20	450.00	435.35	450.00
580.00	578.80	580.00	578.06	580.00	580.02	580.00	578.01	580.00

注: $R_G = 100.0\ \Omega$; $R_1 = 10.0\ \Omega$; $R_2 = 5.0\ \Omega$; $R_3 = 3.0\ \Omega$; $\delta_T = 0^\circ$; $\delta_R = 60.0^\circ$; $D = 600.0\ \text{km}$ 。

参 考 文 献

1 Lei Ming, Ge Yaozhong. A New Fault Location Algorithm Based on Positive Sequence Component Considering Input Parameter Deviation. In: DPSP & C'94. Beijing: 1994

2 Lu Jiping, Ye Yilin. An Accurate Fault Location Method for Parallel Transmission Lines. In: International Conference on Power System Technology. Beijing: 1991

3 梁 军,孟昭勇,车仁飞,等. 精确双端故障测距新算法. 电力系统自动化,1997,21(9)

4 吴维韩,张芳榴. 电力系统过电压数值计算. 北京:科学出版社,1989

5 贺家李,葛耀中. 超高压输电线故障分析与继电保护. 北京:科学出版社,1987

6 Wedepohl L M. Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Polyphase System. IEE Proceedings, 1963, 110(12)

卢继平,男,1960年生,副教授,在职博士研究生,从事电力系统继电保护及微机在线应用等领域的教学和科学研究工作。

叶一麟,男,1933年生,教授,博士生导师,从事电力系统继电保护及微机在线应用、电力系统数字仿真等领域的教学和科学研究工作。

