

基于瞬时相位一致的电力线路故障分析方法

罗建¹, 江丽娟¹, 崔秋实¹, 钟加勇², 张林²

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 随着新型电力系统的建设, 故障稳态分量愈来愈难以获取, 因此提出了一种利用故障暂态数据的基于瞬时相位一致的电力线路故障分析方法。首先将线路两端的故障电流电压暂态数据进行正弦函数表示, 计算线路沿线电气量。然后根据故障点处两端的计算电压瞬时相位一致条件构造判据函数, 确定故障位置。针对故障接地过渡阻抗不为纯阻性和多相接地故障各相过渡电阻不相等的一般情况, 考虑三种接地短路故障, 利用过渡电阻上电压电流瞬时相位一致条件计算故障点过渡阻抗参数。通过仿真案例和现场实际案例的分析, 对比其他故障定位方法, 所提计算电压瞬时相位一致方法的故障定位精度显著增加, 且具有更强的适用性。依据过渡电阻上电压电流瞬时相位一致条件, 可有效计算不同类型的故障过渡阻抗参数。

关键词: 电力线路; 故障分析; 故障点定位; 瞬时相位一致; 过渡阻抗计算

Fault analysis method for a power line based on instantaneous phase consistency

LUO Jian¹, JIANG Lijuan¹, CUI Qiushi¹, ZHONG Jiayong², ZHANG Lin²

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: With the construction of the new power system, it is becoming increasingly difficult to obtain the steady-state component of a fault. Therefore, a power line fault analysis method based on instantaneous phase consistency using fault transient data is proposed. First, the transient data of fault current and voltage at both ends of the line are represented by a sinusoidal function, and the electrical quantity along the line is calculated. Then, according to the condition of instantaneous phase consistency of the calculated voltage at both ends of the fault point, a criterion function is constructed to determine the fault location. The general situation is that the transition impedance of the grounding fault is not pure resistance and the transition resistance of each phase of the polyphase grounding fault is not equal. Considering three kinds of ground short-circuit faults, the transient impedance parameters of the fault point are calculated using the condition of instantaneous phase consistency of voltage and current on the transition resistance. Through the analysis of simulation cases and actual field cases, and compared with other fault location methods, the fault location accuracy of the proposed method for calculating instantaneous phase consistency of voltage is significantly improved, and it has stronger applicability. From the effect of instantaneous phase consistency of voltage and current on the transition resistance, different types of fault transition impedance parameters can be effectively calculated.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51677011).

Key words: power line; fault analysis; fault location; instantaneous phase consistency; transition impedance calculation

0 引言

现有的电力线路故障分析方法^[1-3]大多利用电网故障后的电流电压稳态分量计算故障点位置和过渡阻抗参数。随着智能电网的发展和新型电力系统

的建设^[4-6], 基于稳态分量的故障分析方法将面临许多困难。电网故障切除速度的加快, 使得故障后稳态分量的提取难度随之增加; 随着电力电子装置在新型电力系统的大量应用^[7-8], 故障下的系统惯性大为减少, 故障后稳态分量很难获取。为了适应电网的发展, 特别是适应新型电力系统, 有必要对基于暂态数据的电力线路故障分析方法进行研究^[9-13]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677011)

电力线路故障分析包括故障点定位和过渡阻抗参数求解。由于暂态下不能建立数据采样点与故障点之间的简单电路约束关系, 只能根据故障暂态数据分开求解故障点位置和过渡阻抗参数。

基于分布参数线路模型, 利用一端的电流电压采样值可计算线路任一位置的电流电压, 而故障情况下线路两端的计算电压在故障点应一致^[14-17], 因此可依据线路两端故障电流电压暂态数据计算故障点位置。目前已提出的基于贝瑞隆线路模型^[14,18-20]的故障点位置计算方法和基于分布参数线路模型^[21-23]的故障点位置计算方法, 通常采用两端计算电压瞬时值一致来寻找故障点。由于按这一条件求解的故障点位置存在一定的模糊区, 为提高故障点位置的求解精度, 还需要建立新的故障点位置求解条件。

在确定了故障点位置之后, 需要利用已计算的故障点电压和流进故障点的电流进一步计算故障点过渡阻抗参数。假设故障点过渡阻抗为纯阻性^[24], 两相接地或三相接地各相过渡电阻相等, 利用故障点电压和流进故障点电流可计算每个时刻的故障点过渡电阻^[25-26]。对于接地短路故障, 故障过渡阻抗由随时间变化的过渡电阻和基本固定的接地阻抗组成; 对于两相接地或三相接地故障, 各相过渡电阻通常情况下不会相等^[27]。因此考虑到故障接地过渡阻抗不为纯阻性和多相接地故障各相过渡电阻不相等的一般情况, 为了能够利用故障点电压和流进故障点电流计算每个时刻的故障点过渡阻抗, 引入新的计算条件是必要的。

如果暂态电压可以表示成确定的幅值和初相位随时间变化的正弦函数, 通过暂态电压瞬时幅值一致或瞬时相位一致可建立新的故障点位置求解条件, 且暂态电压瞬时相位一致条件更有利于故障点位置求解精度的提高。在过渡电阻上的暂态电流电压表示成正弦函数后, 利用其暂态电流电压瞬时相位一致条件就可以计算每个时刻的过渡电阻和电感。本文工作将围绕基于暂态电压瞬时相位一致的故障点位置计算和基于过渡电阻上暂态电流电压瞬时相位一致的过渡阻抗计算开展, 首先, 介绍暂态电流电压信号的正弦函数表示分析方法, 然后, 给出基于暂态电压瞬时相位一致的故障点位置计算方法和结果, 最后, 给出基于过渡电阻上暂态电流电压瞬时相位一致的过渡阻抗计算方法和结果。

1 暂态信号正弦函数表示方法

文献[28]给出了基于希尔伯特变换的暂态信号正弦函数表示方法, 将暂态信号 $f(t)$ 表示成幅值和相位都随时间变化的正弦函数, 其数学表示为

$$f(t) = A(t)\cos\omega t + B(t)\sin\omega t = A_m(t)\sin[\omega t + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中: $A(t)$ 、 $B(t)$ 为关于时间 t 的函数, 且 $A(t) = A_m(t)\sin\varphi(t)$, $B(t) = A_m(t)\cos\varphi(t)$; $A_m(t)$ 为瞬时幅值; $\varphi(t)$ 为瞬时初相位。其中

$$\begin{cases} A_m(t) = \sqrt{A(t)^2 + B(t)^2} \\ \varphi(t) = \arctan[A(t) / B(t)] \end{cases} \quad (2)$$

为了将电网故障后的暂态信号 $f(t)$ 表示成正弦函数, 需要明确 $A(t)$ 、 $B(t)$ 的函数形式, 再利用一段时间的暂态信号采样值确定 $A(t)$ 、 $B(t)$ 。 $A(t)$ 、 $B(t)$ 的函数形式可分别表示为

$$A(t) = \sum_{j=0}^N a_j \cdot t^j \cdot e^{-st^2} \quad (3)$$

$$B(t) = H[A(t)] \quad (4)$$

式中: H 表示 $B(t)$ 为 $A(t)$ 的希尔伯特变换, 其目的是保证暂态信号正弦函数表示的确定性; N 为 $A(t)$ 函数多项式阶数; $a_j (j=0, \dots, N)$ 为一组待定系数; s 为 $A(t)$ 函数的衰减系数。由此, 式(1)的暂态信号可以表示为

$$f(t) = (\sum_{j=0}^N a_j t^j e^{-st^2}) \cos\omega t + [\sum_{j=0}^N a_j H(t^j e^{-st^2})] \sin\omega t \quad (5)$$

根据式(5), 利用一段时间的电网故障后暂态信号 $f(t)$ 的采样值, 就可以计算 $a_j (j=0, \dots, N)$ 参数, 进而将暂态信号用正弦函数表示, 即拟合暂态信号。

2 故障点电压瞬时相位一致的定位方法

2.1 电压瞬时相位一致的定位方法原理

参看图1的短路故障线路示意图, 依据适用于暂态计算的分布参数线路模型, 如贝瑞隆线路模型、分布参数线路模型, 利用 M、N 两端的故障电流、电压暂态采样数据 $u_M(t)$ 、 $i_M(t)$ 、 $u_N(t)$ 、 $i_N(t)$ 分别计算线路中任一点电压, 在故障点 F 处两端的计算得到的电压 $u_{FM}(t)$ 和 $u_{FN}(t)$ 应一致。

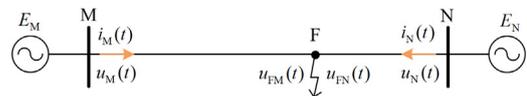


图1 短路故障线路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of short circuit fault

两端计算电压一致可采用两端计算电压瞬时值一致条件来实现, 由于多种因素(如采样误差、模型误差、计算误差)的影响, 这一条件在一定范围内模糊满足。为减小满足两端计算电压一致条件的模糊范围, 本文利用暂态电压瞬时相位一致来求取故障

点位置。

根据式(1), 对于一条短路故障线路两端计算的故障点电压 $u_{FM}(t)$ 和 $u_{FN}(t)$ 可分别表示为

$$u_{FM}(t) = U_{FMm}(t) \sin[\omega t + \varphi_{u_{FM}}(t)] = A_{u_{FM}}(t) \cos \omega t + B_{u_{FM}}(t) \sin \omega t \quad (6)$$

$$u_{FN}(t) = U_{FNm}(t) \sin[\omega t + \varphi_{u_{FN}}(t)] = A_{u_{FN}}(t) \cos \omega t + B_{u_{FN}}(t) \sin \omega t \quad (7)$$

式中: $U_{FMm}(t)$ 、 $U_{FNm}(t)$ 分别为两端计算的故障点电压瞬时幅值; $\varphi_{u_{FM}}(t)$ 、 $\varphi_{u_{FN}}(t)$ 分别为故障点电压瞬时初相位; $A_{u_{FM}}(t)$ 、 $A_{u_{FN}}(t)$ 为式(3)的表示函数; $B_{u_{FM}}(t)$ 、 $B_{u_{FN}}(t)$ 为对应的希尔伯特变换。

由式(6)和式(7)可得瞬时相位一致条件为

$$\omega t + \varphi_{u_{FM}}(t) = \omega t + \varphi_{u_{FN}}(t) \quad (8)$$

则等价的瞬时初相位一致条件为

$$\varphi_{u_{FM}}(t) = \varphi_{u_{FN}}(t) \quad (9)$$

根据式(9)、式(2)、式(6)和式(7), 可将瞬时初相位一致条件改写为

$$\frac{A_{u_{FM}}(t)}{B_{u_{FM}}(t)} = \frac{A_{u_{FN}}(t)}{B_{u_{FN}}(t)} \quad (10)$$

搜寻两端计算的暂态电压满足式(10)瞬时初相位一致条件的点, 该点即为故障点位置。

依据式(10)构造判据函数, 表示为

$$F(t) = A_{u_{FM}}(t)B_{u_{FN}}(t) - A_{u_{FN}}(t)B_{u_{FM}}(t) \quad (11)$$

对于一条短路故障线路, 计算不同点的判据函数, 使判据函数 $F(t)$ 绝对值最小的点就是故障点。

2.2 故障定位仿真算例

为验证电压瞬时相位一致方法在暂态信号故障定位上的有效性, 本节采用 Simulink 建模获取线路故障数据, 在 Matlab 中实现定位算法, 与其他的定位方法进行精度对比。搭建如图 2 所示的 220 kV 三相系统仿真模型。

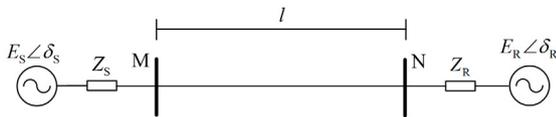


图 2 220 kV 三相系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of 220 kV three-phase system

M 侧、N 侧系统等效电源 E_s 、 E_r 的参数设置见表 1, 线路参数设置见表 2, 线路经过完全换位, 总长度为 200 km, 忽略电导。设置仿真时间为 0.15 s, 故障发生时刻为 0.04 s, 其他参数为默认值。

表 1 电源仿真参数

等效电源	电源内阻/ Ω	电源电感/H	电源相角/ $^\circ$
E_s	1.05	0.137	30
E_r	1.06	0.143	0

表 2 输电线路仿真参数

正(负)序参数			零序参数		
电阻/ (Ω/km)	电感/ (mH/km)	电容/ $(\mu\text{F}/\text{km})$	电阻/ (Ω/km)	电感/ (mH/km)	电容/ $(\mu\text{F}/\text{km})$
0.021	0.885	0.0132	0.1148	2.075	0.0091

考虑 4 种不同的短路故障类型, 改变故障距离, 距离均以 M 端为起始点。由于现场实际故障中过渡电阻的随机性, 将过渡电阻视为常数不符合实际, 由此本文设置了时变过渡电阻, 同时考虑了故障接地过渡阻抗为电阻和基座固定电感串联的情况。4 种类型过渡阻抗如表 3 所示。表中 $Z_g(t) = R_g(t) + j\omega L_f$ 表示接地过渡阻抗, 由于接地导线的长度约为 300 m, 因此基座固定电感值 L_f 约为 0.3 mH, 对应 $j0.094 \Omega$ 。

表 3 过渡阻抗类型及取值

过渡阻抗	过渡阻抗表达式	时间区间/s	对应取值区间/ Ω
$R_a(t)$	$R_a(t) = 200t$	0.04~0.15	8~30
$R_b(t)$	$R_b(t) = 10^{12t}$	0.04~0.15	3.02~63.1
$R_c(t)$	$R_c(t) = 10$	0.04~0.15	10
$Z_g(t)$	$Z_g(t) = 200t + j0.094$	0.04~0.15	$(8 + j0.094) \sim (30 + j0.094)$

设置故障为 A 相接地故障, 故障点距离线路 M 端 80 km, A 相过渡电阻为 $R_a(t)$, 利用式(11)的判据函数得到定位结果, 如图 3 所示。

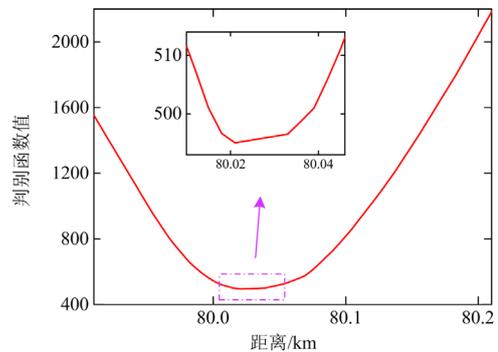


图 3 瞬时相位一致的故障定位结果

Fig. 3 Fault location result with instantaneous phase consistency

图 3 中横坐标为待求点对应的故障距离, 纵坐标为单相接地短路判据函数值, 从图中可得, 函数

最低的点对应距离为 80.022 km, 而实际故障点距离为 80 km, 相对误差为 0.011%。本文的相对误差计算公式为

$$\delta = \frac{|l_d - l_s|}{l} \times 100\% \quad (12)$$

式中: l_d 为定位距离; l_s 为实际故障距离; l 为线路总长度。

根据文献[14], 利用贝瑞隆模型得到线路电压分布, 采用电压瞬时值一致条件进行故障测距, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 最低点存在 79.418 km 到 79.424 km 的模糊区, 取绝对最低点 79.418 km, 相对误差为 0.291%, 远远大于瞬时相位一致方法进行定位的误差。

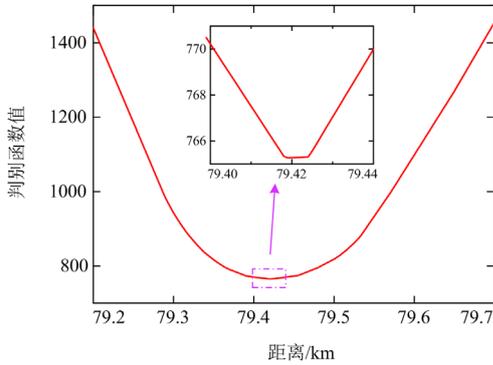


图 4 文献[14]方法的故障定位结果

Fig. 4 Fault location result of the method in reference [14]

故障点电压瞬时相位一致方法和文献[14]的定位结果对比如表 4 所示。表中 AG 代表 A 相接地短路, BG 代表 B 相接地短路, CG 代表 C 相接地短路, AC 表示 A、C 相间短路, ACG 代表 A、C 相接地短路, ABCG 代表三相接地短路。ACG 中, $R_a(t)$ 、 $R_b(t)$ 、 $Z_g(t)$ 分别为 A 相过渡电阻、B 相过渡电阻和接地过渡阻抗; ABCG 中, $R_a(t)$ 、 $R_b(t)$ 、 $R_c(t)$ 和 $Z_g(t)$ 分别为 A 相过渡电阻、B 相过渡电阻、C 相过渡电阻和接地过渡阻抗。

从表 4 可以看出, 采用故障点处电压瞬时相位一致方法定位精度总体比文献[14]的定位精度高。简单短路的类型、故障点位置和过渡电阻的大小及时变特性对基于瞬时相位一致的故障点定位方法的精度几乎没有影响。

2.3 故障定位现场录波信号算例

选取国家电网 2022 年一个 B 相接地故障的现场案例进行分析。故障数据来自线路两侧的故障录波装置, 采样频率为 1200 Hz。案例的线路参数如表 5 所示。表中, R 、 L 、 C 、 G 分别是单位长度正序电阻(Ω/km)、电感(mH/km)、电容($\mu\text{F}/\text{km}$)和电导(S/km), l 为线路长度(km), R_0 、 L_0 、 C_0 为线路零

序参数。

分别采用故障点电压瞬时相位一致的定位方法和文献[14]的故障定位方法, 得到的定位结果分别如图 5 和图 6 所示。

表 4 两种方法的故障定位结果对比

Table 4 Comparison of fault location results of two methods

故障类型	故障点/km	过渡阻抗	本文方法		文献[14]方法	
			定位结果/km	相对误差/%	定位结果/km	相对误差/%
AG	40	$R_a(t)$	39.976	0.012	39.62	0.19
AG	80	$R_a(t)$	80.022	0.011	79.418	0.291
AG	140	$R_b(t)$	139.98	0.01	139.876	0.062
AG	180	$R_b(t)$	179.986	0.007	179.683	0.159
BG	80	$R_b(t)$	80.026	0.013	81.269	0.635
BG	180	$R_b(t)$	179.968	0.016	179.69	0.155
CG	80	$R_c(t)$	80.018	0.009	81.445	0.723
CG	180	$R_c(t)$	180.006	0.003	179.635	0.183
AC	80	$R_a(t)$	79.964	0.018	79.845	0.078
AC	180	$R_b(t)$	180.03	0.015	179.547	0.227
ACG	80	$R_a(t)$ 、 $R_b(t)$ 、 $Z_g(t)$	80.014	0.007	80.584	0.292
ACG	180	$R_a(t)$ 、 $R_b(t)$ 、 $Z_g(t)$	179.985	0.008	181.185	0.593
ABCG	80	$R_a(t)$ 、 $R_b(t)$ 、 $R_c(t)$ 、 $Z_g(t)$	80.024	0.012	80.188	0.094
ABCG	180	$R_a(t)$ 、 $R_b(t)$ 、 $R_c(t)$ 、 $Z_g(t)$	179.972	0.014	179.568	0.216

表 5 故障线路参数

Table 5 Fault line parameters

参数	数值	参数	数值
$R/(\Omega/\text{km})$	0.0036	$R_0/(\Omega/\text{km})$	0.273
$L/(\text{mH}/\text{km})$	0.9931	$L_0/(\text{mH}/\text{km})$	2.9
$C/(\mu\text{F}/\text{km})$	0.0125	$C_0/(\mu\text{F}/\text{km})$	0.0067
$G/(\text{S}/\text{km})$	0	l/km	136.25

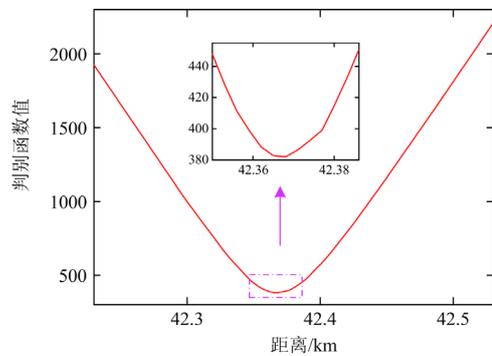


图 5 相位一致方法的故障定位结果

Fig. 5 Fault location result of phase consistency method

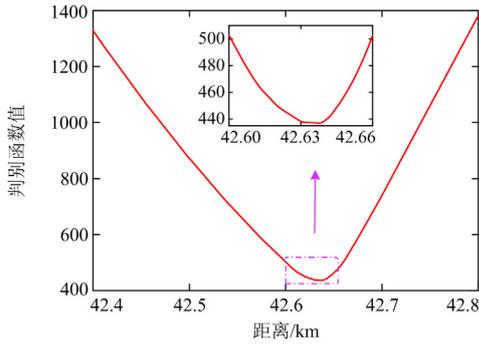


图 6 文献[14]方法的故障定位结果

Fig. 6 Fault location result of the method in reference [14]

利用录波数据进行故障定位时，由于图 6 存在模糊区，可以看出瞬时相位一致方法的定位精度明显比文献[14]的故障定位精度更高，定位结果对比见表 6。

表 6 定位结果对比

Table 6 Comparison of location results

瞬时相位一致方法		文献[14]定位方法		巡线 结果/km
定位 结果/km	相对 误差/%	定位 结果/km	相对 误差/%	
42.368	0.021	42.638	0.219	42.34

3 基于瞬时相位一致的过渡阻抗计算方法

3.1 故障点过渡阻抗参数计算方法

考虑到故障接地过渡阻抗不为纯阻性和多相接地故障各相过渡电阻不相等的一般情况，本文依据过渡电阻上暂态电流电压瞬时相位一致条件计算每个时刻的过渡阻抗参数。主要进行单相接地、两相接地和三相接地故障情况下的过渡阻抗参数计算。

1) 单相接地故障

图 7 为 A 相接地故障示意图， $u_{Fa}(t)$ 为故障点电压， $i_{Fa}(t)$ ($i_{Fa}(t) = i_{FaM}(t) + i_{FaN}(t)$) 为流进故障点的电流， $R_g(t)$ 为接地过渡电阻， L_f 为基座固定电感。

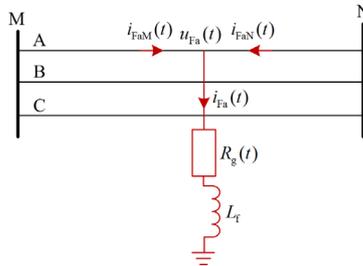


图 7 A 相接地故障示意图

Fig. 7 Schematic diagram of phase A grounding fault

将 $u_{Fa}(t)$ 、 $i_{Fa}(t)$ 进行正弦函数表示，如式(13)所示。

$$\begin{cases} u_{Fa}(t) = U_{Fa}(t) \sin[\omega t + \varphi_{u_{Fa}}(t)] = \\ \quad A_{u_{Fa}}(t) \sin \omega t + B_{u_{Fa}}(t) \cos \omega t \\ i_{Fa}(t) = I_{Fa}(t) \sin[\omega t + \varphi_{i_{Fa}}(t)] = \\ \quad A_{i_{Fa}}(t) \sin \omega t + B_{i_{Fa}}(t) \cos \omega t \end{cases} \quad (13)$$

式中： $U_{Fa}(t)$ 、 $I_{Fa}(t)$ 分别为故障点电压和电流的瞬时幅值； $\varphi_{u_{Fa}}(t)$ 、 $\varphi_{i_{Fa}}(t)$ 分别为故障点电压和电流的瞬时初相位； $A_{u_{Fa}}(t)$ 、 $A_{i_{Fa}}(t)$ 为式(3)的表示函数； $B_{u_{Fa}}(t)$ 、 $B_{i_{Fa}}(t)$ 为对应的希尔伯特变换。

根据故障回路列写约束方程为

$$u_{R_g}(t) + L_f \cdot \frac{di_{Fa}(t)}{dt} = u_{Fa}(t) \quad (14)$$

式中， $u_{R_g}(t)$ 为接地过渡电阻 $R_g(t)$ 上的电压，将式(13)代入式(14)中并整理，得到接地过渡电阻上的电压 $u_{R_g}(t)$ 和流过接地过渡电阻的电流 $i_{R_g}(t)$ 分别为

$$\begin{cases} u_{R_g}(t) = [A_{u_{Fa}}(t) - L_f A'_{i_{Fa}}(t) + \omega L_f B_{i_{Fa}}(t)] \sin \omega t + \\ \quad [B_{u_{Fa}}(t) - \omega L_f A_{i_{Fa}}(t) - L_f B'_{i_{Fa}}(t)] \cos \omega t \\ i_{R_g}(t) = i_{Fa}(t) = A_{i_{Fa}}(t) \sin \omega t + B_{i_{Fa}}(t) \cos \omega t \end{cases} \quad (15)$$

式中： $A'_{i_{Fa}}(t)$ 为函数 $A_{i_{Fa}}(t)$ 的一阶导数； $B'_{i_{Fa}}(t)$ 为函数 $B_{i_{Fa}}(t)$ 的一阶导数。

由过渡电阻上电压电流瞬时相位一致条件，得到

$$\frac{A_{u_{Fa}}(t) - L_f A'_{i_{Fa}}(t) + \omega L_f B_{i_{Fa}}(t)}{B_{u_{Fa}}(t) - \omega L_f A_{i_{Fa}}(t) - L_f B'_{i_{Fa}}(t)} = \frac{A_{i_{Fa}}(t)}{B_{i_{Fa}}(t)} \quad (16)$$

由式(16)可以计算基座固定电感 L_f ，从而得到 L_f 上电压 $u_{L_f}(t) = L_f \cdot [di_{Fa}(t)/dt]$ ，则接地过渡电阻上的电压为

$$u_{R_g}(t) = u_{Fa}(t) - u_{L_f}(t) \quad (17)$$

接地过渡电阻的阻值为

$$R_g(t) = \frac{u_{R_g}(t)}{i_{Fa}(t)} \quad (18)$$

2) 两相接地故障

图 8 为两相接地故障示意图。 $u_{Fa}(t)$ 、 $i_{Fa}(t)$ 、分别为 A 相故障点电压和电流； $u_{Fc}(t)$ 、 $i_{Fc}(t)$ 分别为 C 相故障点电压和电流； $u_{Fg}(t)$ 为节点电压； $R_a(t)$ 、 $R_c(t)$ 分别为 A、C 相过渡电阻； $R_g(t)$ 为接地过渡电阻； L_f 为基座固定电感。

将故障点电压 $u_{Fa}(t)$ 、 $u_{Fc}(t)$ 和流进故障点的电流 $i_{Fa}(t)$ 、 $i_{Fc}(t)$ 进行正弦函数表示，如式(19)所示。

$$\begin{cases} u_{Fa}(t) = A_{u_{Fa}}(t) \cos \omega t + B_{u_{Fa}}(t) \sin \omega t \\ u_{Fc}(t) = A_{u_{Fc}}(t) \cos \omega t + B_{u_{Fc}}(t) \sin \omega t \\ i_{Fa}(t) = A_{i_{Fa}}(t) \cos \omega t + B_{i_{Fa}}(t) \sin \omega t \\ i_{Fc}(t) = A_{i_{Fc}}(t) \cos \omega t + B_{i_{Fc}}(t) \sin \omega t \end{cases} \quad (19)$$

式中: $A_{u_{Fa}}(t)$ 、 $A_{u_{Fc}}(t)$ 、 $A_{i_{Fa}}(t)$ 、 $A_{i_{Fc}}(t)$ 为式(3)的表示函数; $B_{u_{Fa}}(t)$ 、 $B_{u_{Fc}}(t)$ 、 $B_{i_{Fa}}(t)$ 、 $B_{i_{Fc}}(t)$ 为对应的希尔伯特变换。

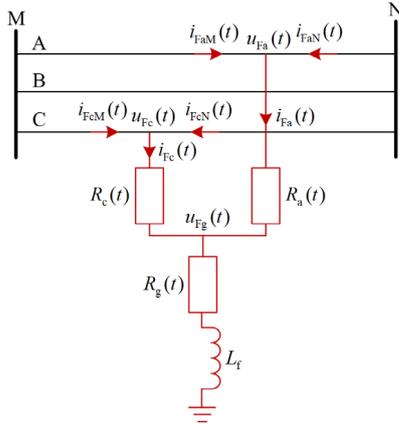


图 8 两相接地故障示意图

Fig. 8 Schematic diagram of two-phase grounding fault

$R_a(t)$ 和 $R_c(t)$ 故障支路的电流电压约束方程为

$$\begin{cases} u_{Fa}(t) - u_{Fg}(t) = R_a(t) i_{Fa}(t) \\ u_{Fc}(t) - u_{Fg}(t) = R_c(t) i_{Fc}(t) \end{cases} \quad (20)$$

节点电压 $u_{Fg}(t)$ 也可表示为

$$u_{Fg}(t) = A_{u_{Fg}}(t) \cos \omega t + B_{u_{Fg}}(t) \sin \omega t \quad (21)$$

式中, $A_{u_{Fg}}(t)$ 、 $B_{u_{Fg}}(t)$ 分别为式(3)的表示函数及其希尔伯特变换, 基于过渡电阻上电压电流瞬时相位一致条件, 可得到式(22)。

$$\begin{cases} \frac{A_{u_{Fa}}(t) - A_{u_{Fg}}(t)}{B_{u_{Fa}}(t) - B_{u_{Fg}}(t)} = \frac{A_{i_{Fa}}(t)}{B_{i_{Fa}}(t)} \\ \frac{A_{u_{Fc}}(t) - A_{u_{Fg}}(t)}{B_{u_{Fc}}(t) - B_{u_{Fg}}(t)} = \frac{A_{i_{Fc}}(t)}{B_{i_{Fc}}(t)} \end{cases} \quad (22)$$

根据式(22)可求出 $A_{u_{Fg}}(t)$ 和 $B_{u_{Fg}}(t)$, 即得到 $u_{Fg}(t)$, 进而可计算 $R_a(t)$ 和 $R_c(t)$ 。参照单相接地故障参数的计算方法, 可得接地过渡电阻 $R_g(t)$ 和基座固定电感 L_f 。

3) 三相接地故障

图 9 为三相接地故障示意图, $u_{Fb}(t)$ 、 $i_{Fb}(t)$ 分别为 B 相的故障点电压和电流; $R_b(t)$ 为 B 相过渡

电阻; $R_g(t)$ 为接地过渡电阻; L_f 为基座固定电感。

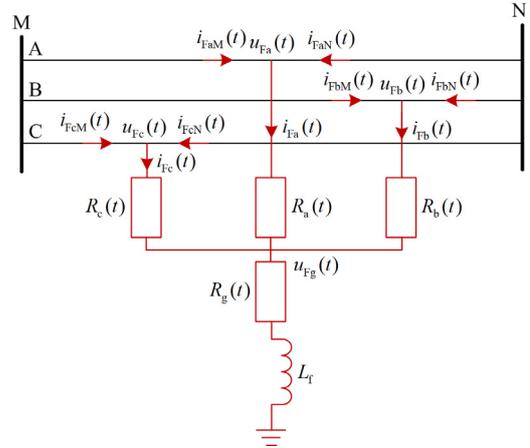


图 9 三相接地故障示意图

Fig. 9 Schematic diagram of three-phase grounding fault

将故障点的电压 $u_{Fa}(t)$ 、 $u_{Fb}(t)$ 、 $u_{Fc}(t)$ 和流进故障点的电流 ($i_{Fa}(t) = i_{FaM}(t) + i_{FaN}(t)$ 、 $i_{Fb}(t) = i_{FbM}(t) + i_{FbN}(t)$ 、 $i_{Fc}(t) = i_{FcM}(t) + i_{FcN}(t)$) 进行正弦函数表示, 如式(23)所示。

$$\begin{cases} u_{Fa}(t) = A_{u_{Fa}}(t) \cos \omega t + B_{u_{Fa}}(t) \sin \omega t \\ u_{Fb}(t) = A_{u_{Fb}}(t) \cos \omega t + B_{u_{Fb}}(t) \sin \omega t \\ u_{Fc}(t) = A_{u_{Fc}}(t) \cos \omega t + B_{u_{Fc}}(t) \sin \omega t \\ i_{Fa}(t) = A_{i_{Fa}}(t) \cos \omega t + B_{i_{Fa}}(t) \sin \omega t \\ i_{Fb}(t) = A_{i_{Fb}}(t) \cos \omega t + B_{i_{Fb}}(t) \sin \omega t \\ i_{Fc}(t) = A_{i_{Fc}}(t) \cos \omega t + B_{i_{Fc}}(t) \sin \omega t \end{cases} \quad (23)$$

式中: $A_{u_{Fb}}(t)$ 、 $A_{i_{Fb}}(t)$ 为式(3)的表示函数; $B_{u_{Fb}}(t)$ 、 $B_{i_{Fb}}(t)$ 为对应的希尔伯特变换。

三相 $R_a(t)$ 、 $R_b(t)$ 和 $R_c(t)$ 故障支路上的电流电压约束方程可表示为

$$\begin{cases} u_{Fa}(t) - u_{Fg}(t) = R_a(t) i_{Fa}(t) \\ u_{Fb}(t) - u_{Fg}(t) = R_b(t) i_{Fb}(t) \\ u_{Fc}(t) - u_{Fg}(t) = R_c(t) i_{Fc}(t) \end{cases} \quad (24)$$

基于过渡电阻上电压电流瞬时相位一致条件, 可得到式(25)。

$$\begin{cases} \frac{A_{u_{Fa}}(t) - A_{u_{Fg}}(t)}{B_{u_{Fa}}(t) - B_{u_{Fg}}(t)} = \frac{A_{i_{Fa}}(t)}{B_{i_{Fa}}(t)} \\ \frac{A_{u_{Fb}}(t) - A_{u_{Fg}}(t)}{B_{u_{Fb}}(t) - B_{u_{Fg}}(t)} = \frac{A_{i_{Fb}}(t)}{B_{i_{Fb}}(t)} \\ \frac{A_{u_{Fc}}(t) - A_{u_{Fg}}(t)}{B_{u_{Fc}}(t) - B_{u_{Fg}}(t)} = \frac{A_{i_{Fc}}(t)}{B_{i_{Fc}}(t)} \end{cases} \quad (25)$$

根据式(25)可求出 $A_{u_{Fg}}(t)$ 和 $B_{u_{Fg}}(t)$ 得到 $u_{Fg}(t)$,

进而计算 $R_a(t)$ 、 $R_b(t)$ 和 $R_c(t)$ 。参照前文方法，可计算接地过渡电阻 $R_g(t)$ 、基座固定电感 L_f 。

3.2 故障点过渡阻抗参数计算仿真算例

仿真模型与仿真条件与 2.2 节一致，但本节主要考虑 3 种短路接地故障的情况，并设置故障接地地点为接地过渡电阻和基座固定电感串联形式。过渡阻抗参数如表 7 所示，其中情况 1 为单相接地故障，情况 2 为两相接地故障，情况 3 为三相接地故障。

表 7 过渡阻抗类型及取值

Table 7 Type and value of transition impedance			
	过渡阻抗	时间区间/s	对应取值区间/ Ω
情况 1	$R_g(t) = 200t \Omega$	0.04~0.15	8~30
	$L_f(t) = 0.3 \text{ mH}$	0.04~0.15	j0.094
	$R_b(t) = 200t \Omega$	0.04~0.15	8~30
情况 2	$R_b(t) = 10^{12t} \Omega$	0.04~0.15	3.02~63.1
	$R_g(t) = 200t \Omega$	0.04~0.15	8~30
	$L_f(t) = 0.3 \text{ mH}$	0.04~0.15	j0.094
	$R_a(t) = 10^{12t} \Omega$	0.04~0.15	3.02~63.1
情况 3	$R_b(t) = 10 \Omega$	0.04~0.15	10
	$R_c(t) = 100t \Omega$	0.04~0.15	4~15
	$R_g(t) = 10^{12t} \Omega$	0.04~0.15	3.02~63.1
	$L_f(t) = 0.35 \text{ mH}$	0.04~0.15	j0.11

基于过渡电阻上的电压瞬时相位与流过过渡电阻的电流瞬时相位一致条件，计算故障点过渡电阻和基座固定电感参数。以 80 km 处发生 A 相单相接地故障为例，设置过渡阻抗为表 7 中的情况 1，通过式(13)一式(18)得到接地过渡阻抗参数如图 10 所示。可以看到计算得到的基座固定电感值与设置的 0.3 mH 相差很小，接地过渡电阻值与 200 t 图线也基本一致，误差较小。

再以 A、B 两相接地短路故障为例，故障点在 100 km 处，设置过渡阻抗为表 7 中的情况 2。通过公式计算的两相过渡电阻、基座固定电感和接地过渡电阻的参数如图 11 所示。

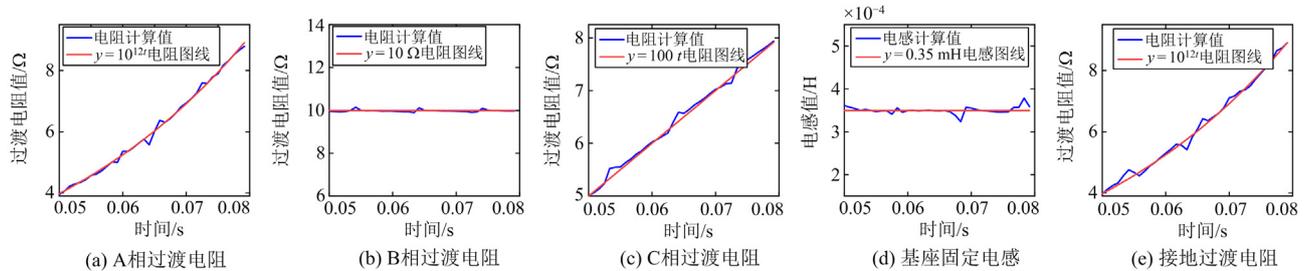


图 12 三相接地过渡阻抗

Fig. 12 Three-phase grounding transition impedance

再以 120 km 处发生三相接地短路故障为例，设置过渡阻抗为表 7 中的情况 3。计算得到的三相过渡电阻、基座固定电感和接地过渡电阻的参数如图 12 所示。

由以上可以看到，基于过渡电阻上电压电流瞬时相位一致的方法可以计算得到故障点的阻抗参数，便于进行故障原因分析。

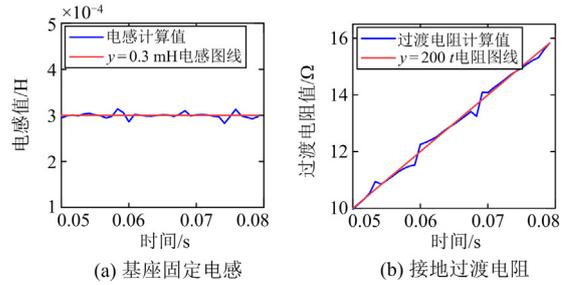


图 10 单相接地过渡阻抗

Fig. 10 Single-phase grounding transition impedance

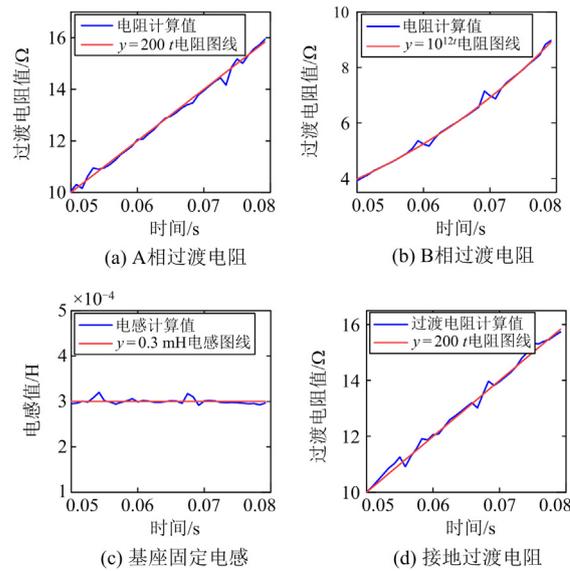


图 11 两相接地过渡阻抗

Fig. 11 Two-phase grounding transition impedance

3.3 故障点阻抗参数计算录波数据算例

选取与 2.3 节一致的国家电网故障录波案例, 采样频率为 1200 Hz, 线路参数与表 5 一致。

采用过渡电阻上电压电流瞬时相位一致的方法进行计算, 得到过渡阻抗参数如图 13 所示。可以看到, 采用现场录波数据进行计算, 仍能得到故障点的过渡阻抗参数。

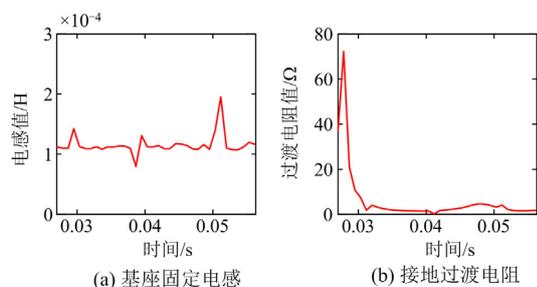


图 13 故障点过渡阻抗参数

Fig. 13 Transition impedance parameters at the fault point

4 结论

本文给出了一种基于瞬时相位一致的电力线路故障分析方法。该方法利用线路两端的故障电流电压暂态数据, 依据故障点处两端的计算电压瞬时相位一致条件确定故障点, 再依据过渡电阻上电压电流瞬时相位一致条件计算故障点过渡阻抗参数。本文的主要结论如下。

1) 对比其他的故障定位方法, 在不同故障类型、故障点距离和时变过渡电阻情况下, 故障点处计算电压瞬时相位一致方法的故障位置定位精度显著提高, 更有利于在实际电网中应用。

2) 就故障接地过渡阻抗不为纯阻性和多相接地故障各相过渡电阻不相等的一般情况, 依据过渡电阻上暂态电流电压瞬时相位一致条件可计算不同类型下的过渡阻抗参数。

3) 由于过渡电阻时变特性在很大程度上反映故障发生的原因, 计算的时变过渡电阻可作为分析故障发生原因的一种途径。

参考文献

[1] STANOJEVIĆ V A, PRESTON G, TERZIJA V. Synchronised measurements based algorithm for long transmission line fault analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4448-4457.

[2] 孙子昌, 邓迎君, 陈昊, 等. 同塔双回线路同名相跨线短路故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 154-159.

SUN Zichang, DENG Yingjun, CHEN Hao, et al. Analysis of homogeneous phase cross-country faults of double-circuit lines on the same tower[J]. Power System

Protection and Control, 2021, 49(4): 154-159.

[3] 王艳, 刘美岑, 陈旭, 等. 中性点不同接地方式下混压部分同塔双回线路故障分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 159-165.

WANG Yan, LIU Meicen, CHEN Xu, et al. Fault analysis of mixed-voltage double-circuit lines partly on same tower under different grounding modes of neutral point[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 159-165.

[4] 武建卫, 邵剑峰. 计及波速变化的反行波直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 121-128.

WU Jianwei, SHAO Jianfeng. Fault location of DC transmission lines based on backward waves considering wave speed changes[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 121-128.

[5] 张壮壮, 祝令瑜, 王磊磊, 等. 新型电力系统下负载因素对三相油浸式变压器振动噪声特性影响的试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 45-54.

ZHANG Zhuangzhuang, ZHU Lingyu, WANG Leilei, et al. Test study on influence of load factors on vibration and noise characteristics of the three-phase oil immersed transformer under new power system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 45-54.

[6] 李惠玲, 王曦, 高剑, 等. 新型电力系统背景下西部送端直流电网方案构建[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 12-21.

LI Huiling, WANG Xi, GAO Jian, et al. Scheme construction for sending end dc grids in western China under the background of new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 12-21.

[7] BILGUNDI S K, SACHIN R, PRADEEPA H, et al. Grid power quality enhancement using an ANFIS optimized PI controller for DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 26-39.

[8] 吴成国, 肖仕武, 朱健. 含负序电压支撑分布式电源的电网分区短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1159-1169.

WU Chengguo, XIAO Shiwu, ZHU Jian. Calculation of power grid partition short-circuit current with negative sequence voltage-supported distributed generation[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1159-1169.

[9] LI B, LIAO K, YANG J W, et al. Transient fault analysis method for VSC-based DC distribution networks with multi-DGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 7628-7638.

[10] 刘晓琳, 曹泽宇, 高丙团, 等. HVDC 送端交流系统故障暂态过电压评估指标[J]. 电力建设, 2023, 44(1): 64-72.

LIU Xiaolin, CAO Zeyu, GAO Bingtuan, et al. Evaluation index of transient overvoltage during fault at HVDC sending-end AC system[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 64-72.

[11] 王杰, 彭志炜, 田宇, 等. 双馈风电机组故障穿越对系统暂态稳定的影响[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 112-118.

WANG Jie, PENG Zhiwei, TIAN Yu, et al. Influence of fault ride-through of doubly-fed induction generators on transient stability of power systems[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 112-118.

[12] 黄飞, 陈纪宇, 戴健, 等. 基于特征暂态零模电流偏态

- 系数的有源配电网单相故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 12-21.
- HUANG Fei, CHEN Jiyu, DAI Jian, et al. Single-phase fault location method for an active distribution network based on the skewness coefficient of characteristic transient zero-mode current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 12-21.
- [13] 刘映彤, 黄纯, 袁静泊, 等. 谐振接地系统两点同相接地故障暂态特征及选线[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 62-70.
- LIU Yingtong, HUANG Chun, YUAN Jingbo, et al. Transient characteristics and line selection of two-point grounding faults on same phase in resonant grounding system[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 62-70.
- [14] SUONAN J L, GAO S P, SONG G B, et al. A novel fault-location method for HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1203-1209.
- [15] 杨军, 伍咏红, 江文波, 等. 基于双端故障信息的高压电缆-架空线混合线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 208-213.
- YANG Jun, WU Yonghong, JIANG Wenbo, et al. A fault location algorithm for hybrid transmission line composed by high voltage cable and overhead line based on two-terminal information[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 208-213.
- [16] IZYKOWSKI J, MOLAG R, ROSOŁOWSKI E, et al. Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 627-633.
- [17] LU D Y, LIU Y, LIAO Q F, et al. Time-domain transmission line fault location method with full consideration of distributed parameters and line asymmetry[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2651-2662.
- [18] LIANG Y, WANG G, LI H. Time-domain fault-location method on HVDC transmission lines under unsynchronized two-end measurement and uncertain line parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1031-1038.
- [19] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.
- LEI Zhaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.
- [20] 索南加乐, 许文宣, 何世恩, 等. 基于双端电气量的串补输电线路故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 157-164, 7.
- SUONAN Jiale, XU Wenxuan, HE Shien, et al. A fault location algorithm for series compensated transmission lines based on two-end information[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 157-164, 7.
- [21] 李猛克, 王阳, 孙广, 等. 基于回归分析法的特高压直流接地极线路故障测距方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 129-134.
- LI Mengke, WANG Yang, SUN Guang, et al. Research on fault location method of UHVDC grounding pole line based on regression analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 129-134.
- [22] 张开迪. 分布参数电路模型及其在特高压线路保护中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- ZHANG Kaidi. Research on the distributed parameter circuit model and its application in UHV transmission line protection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [23] MA J, SHI Y, MA W, et al. Location method for interline and grounded faults of double-circuit transmission lines based on distributed parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1307-1316.
- [24] 辛业春, 罗鑫, 王拓, 等. 计及过渡电阻影响的直流电网不同拓扑结构故障电流简化计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 804-817.
- XIN Yechun, LUO Xin, WANG Tuo, et al. Simplified calculation method of fault current in different topological structures of DC grid considering the influence of transition resistance[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 804-817.
- [25] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on the basis of the distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [26] 邵文权, 南树功, 张望妮, 等. 利用过渡电阻特征的超/特高压输电线路电弧性故障及熄弧时刻识别[J]. 高压技术, 2014, 40(6): 1822-1827.
- SHAO Wenquan, NAN Shugong, ZHANG Wangni, et al. Arcing fault detection and arc extinction time capture based on characteristics of transition resistances for EHV and UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1822-1827.
- [27] 丛伟, 马彦飞, 程学启, 等. 基于双端时域信号的过渡电阻在线计算方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 63-67.
- CONG Wei, MA Yanfei, CHENG Xueqi, et al. Transition resistance calculation based on time-domain signals of two terminals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 63-67.
- [28] 罗建, 石家炜. 基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 1-7.
- LUO Jian, SHI Jiawei. Sinusoidal representation of a transient signal based on the Hilbert transform[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 1-7.

收稿日期: 2023-04-25; 修回日期: 2023-06-27

作者简介:

罗建(1960—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制, 电力系统信号处理; E-mail: luojian10000@x263.net

赵丽娟(1999—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 1961355114@qq.com

(编辑 许威)