

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190555

基于单端量的超高压交流输电线路单相接地故障测距方法研究

李跃¹, 郑涛¹, 文安²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 佛山科学技术学院自动化学院, 广东 佛山 528225)

摘要: 基于单端量的高阻接地故障测距精度与过渡电阻和故障点两端故障电流分量相位角有关, 通常基于其为金属性故障或故障点两端故障电流相位一致进行求解, 这样往往会产生较大的误差。在频域内利用保护安装点电压电流变化量与故障点故障前后电压之间的关系推导回路方程, 仅利用保护安装点单端可测的电压变化量准确补偿故障点两侧故障电流分量相位角不一致引起的误差。为充分利用故障信息以及提高测距速度, 将包含误差补偿量的方程用 R-L 模型原理转换到时域内, 连续采样积分求解故障距离。PSCAD 搭建输电线路模型进行故障仿真。结果表明该算法可解决相位不一致带来的误差, 在高阻故障时能准确快速测出故障位置, 且灵敏性受分布电容的影响小。

关键词: 故障定位; 相位; R-L 模型; 时域算法; 高阻故障

A new location method for UHV AC transmission lines with high resistance faults based on single terminal volume

LI Yue¹, ZHENG Tao¹, WEN An²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Automation College, Foshan University of Science and Technology, Foshan 528225, China)

Abstract: The accuracy of high resistance fault location based on single terminal is related to the phase angle of the fault current component at both ends of the fault point and the transition resistance. It is usually solved based on the phase consistency of the fault current component at both ends of the fault point or the gold attribute fault, which often results in large errors. In this paper, the loop equation is deduced by using the relationship between the voltage and current variation at the protection installation point and the voltage before and after the fault point in the frequency domain. The error caused by the phase angle difference of the fault current components at both sides of the fault point is compensated accurately only by using the voltage variation measured at the protection installation point. In order to make full use of the fault information and improve the speed of fault location, the error compensation will be included. The principle of R-L model is transformed into time domain, and the fault distance is solved by continuous sampling integral. PSCAD builds the transmission line model for fault simulation. The results show that the algorithm can solve the error caused by phase inconsistency and accurately detect the fault location when the high resistance fault occurs, and the sensitivity is less affected by the distributed capacitance.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900604) and National Natural Science Foundation of China (No. 51637005).

Key words: fault locating; phase difference; R-L model; time domain algorithm; high resistance faults

0 引言

目前我国实际大电网普遍存在远距离、大容量

传输电力的现象^[1], 其中交流线路发生单相接地故障后由于过渡电阻的存在, 故障测距远远偏离实际位置, 不但降低了供电系统的可靠性和稳定性, 而且给检修人员的巡检带来较大的困难, 因此故障后准确测量故障距离尤为重要。传统上基于单端稳态量的故障测距无论采用集中参数模型^[2-6]还是分布

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFB0900604); 国家自然科学基金项目资助(51637005)

参数模型^[7-10],前提都是假定故障点电压为零或故障点两端故障电流分量相位角一致计算故障距离,对于金属性故障可以准确测出故障距离,但对高阻故障,由于故障点电压不为零或故障点两端故障电流分量相位角差导致测距误差较大。此外,故障测距中还广泛应用行波测距^[11-18]。行波测距理论上可以精确地测量故障距离,但输电线路发生高阻故障时,电流行波信号较为微弱,导致故障点反射波不易捕捉和检测困难。

对单相接地故障,电压等级为 500 kV 时,过渡电阻可达 300 Ω^[19]。通常对于一个确定的区域,故障测距我们希望它的误差在±5%^[19]以内。文献[20]中,基于故障点发生金属性故障,根据是对称故障或非对称故障提出沿线正序/负序电压幅值比较的故障测距方法。首先它需要双端的电气量,其次在线路过渡电阻较大时可能存在沿线幅值变化并非和金属性故障一致,从而导致测距不满足误差要求的±5%以内。

文献[21-22]假设故障点两端故障电流分量相位角一致进行故障测距。文献[21]利用正负序来替代传统的零序,但其基本原理仍是假设两端故障电流相位角一致,不能避免由于相位角不一致带来的误差,且文章并没有考虑分布电容的影响,实际测距可能误差更大。文献[22]用流过保护安装处的电流工频变化量,当两侧故障电流相位一致时该方法可以测出高阻故障后保护安装点到故障点的距离,但是当故障两侧故障电流相位角相差较大时,该方法所得测距结果达不到误差要求。

综上所述,输电线路发生单相接地高阻故障时,对故障点电压不能准确表达,从而带来较大测距误差。为了解决上述问题,本文提出一种利用保护安装点电压变化量补偿故障点两端故障电流分量相位不一致引起测距误差的方法,能够完全利用可测量准确表达故障回路方程,依据该方程在时域中连续积分列方程求解故障距离。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明,该算法能在高阻故障时准确测出故障距离,同时受负荷电流和分布电容的影响小。

1 新型故障测距研究

本文以两端 500 kV 输电线路搭建模型,对其发生单相经高阻接地故障进行测距分析。为方便后续公式理解,首先对如下符号进行定义: $U_{m(0)}$ 为故障前保护安装点的相电压,m代表测量端; $I_{m(0)}$ 为故障前保护安装点的相电流; $U_{f(0)}$ 为故障前故障点的相电压; U_m 为故障后保护安装点的相电压; I_m 为

故障后保护安装点的相电流; U_f 为故障后故障点的相电压; l 为测量点与故障点间的故障距离; R_f 为故障点过渡电阻; I_f 为流经过渡电阻的故障电流; I_0 为保护安装点零序电流。

假定: $k = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}, k_r = \frac{r_0 - r_1}{3r_1}, k_x = \frac{x_0 - x_1}{3x_1}$; 其

中, $Z_0, Z_1, r_0, r_1, x_0, x_1$ 分别表示单位长度的零序阻抗、正序阻抗、电阻和电抗。

如图 1 所示,输电线路发生单相接地故障,故障前由保护安装点获得的故障相电压和电流的关系为

$$U_{m(0)} = lZ_1 I_{m(0)} + U_{f(0)} \quad (1)$$

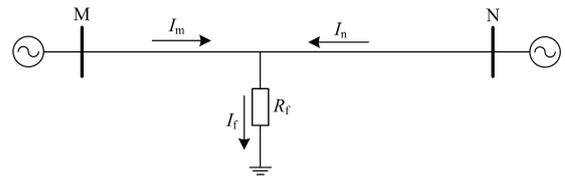


图 1 单相接地故障

Fig. 1 Phase to ground fault

故障后,由保护安装点获得的故障相电压和电流的关系为

$$U_m = lZ_1 (I_m + 3kI_0) + U_f \quad (2)$$

式(2)减去式(1)可得式(3)。

$$\Delta U = lZ_1 (\Delta I + 3kI_0) + U_f - U_{f(0)} \quad (3)$$

式中: $\Delta U = U_m - U_{m(0)}$; $\Delta I = I_m - I_{m(0)}$ 。故障发生前后故障点电压关系如式(4),细节推导见附录 A。

$$U_f = \frac{3R_f}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0} + 3R_f} U_{f(0)} \quad (4)$$

式中, Z_{e1}, Z_{e2}, Z_{e0} 是相应序网对应的等效正、负和零序阻抗。将式(4)的关系代入式(3),消去 $U_{f(0)}$ 可得到故障后故障点的电压式(5)。

$$U_f = \frac{3R_f l Z_1}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0}} (\Delta I + 3kI_0) - \frac{3R_f}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0}} \Delta U \quad (5)$$

由式(5)可知,仅用单端的可测量即可准确表示出故障后故障点电压。此外,将式(2)中 U_f 用式(5)的进行替换可得到式(6)。

$$U_m = lZ_1 (I_m + 3kI_0) + \frac{3R_f l Z_1}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0}} (\Delta I + 3kI_0) - \frac{3R_f}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0}} \Delta U \quad (6)$$

式(6)中, Z_1, Z_{e1}, Z_{e2} 和 Z_{e0} 具有几乎相同的相位角,可用如下简化符号:

$$\frac{3R_f I_{Z_1}}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0}} = R_K, \quad \frac{3R_f}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0}} = \frac{R_K}{j\omega L} = H \quad (7)$$

R_K 是某一故障的等效电阻, L 为一等效电感, H 是一个变量为未知系数。因此式(6)可以简化为

$$U_m = I_{Z_1}(I_m + 3kI_0) + R_K(\Delta I + 3kI_0) - H\Delta U \quad (8)$$

又 $I_f = 3I_0 + 3I_{0n}$, 因此有下式成立:

$$U_m = I_{Z_1}(I_m + 3kI_0) + 3R_f(I_0 + I_{0n}) \quad (9)$$

其中, I_{0n} 为N端的零序电流。综合式(8)和式(9)有如下关系成立:

$$H\Delta U = 3(kR_K - R_f)I_0 + R_K\Delta I - 3R_f I_{0n} \quad (10)$$

可知 $H\Delta U$ 即为补偿故障点两端故障电流分量相位角不一致产生的误差。如果故障是金属性故障, 则过渡电阻为零, 式(8)对应于传统基于距离保护原理的算法如式(11)所示。

$$U_m = I_{Z_1}(I_m + 3kI_0) \quad (11)$$

为最大化利用故障信息并提高计算速度, 考虑到 $X = \omega L$, 且正弦信号经微分后角度超前 90° , 于是可将式(8)写成 R - L 模型算法求解形式转换到时域内, 同样也可以测出保护安装点到故障点的故障距离^[23]。故而式(8)可写为

$$u_m = l[R_1(i_m + 3k_x i_0) + L_1 \frac{d(i_m + 3k_x i_0)}{dt}] + R_K(\Delta i + 3k_0 i_0) - H \int_{t_0}^t \Delta u dt \quad (12)$$

式中: k_0 是等效零序因子, 为 k 的模值; t_0 是故障前任意时刻。将式(12)两边对时间 t 进行积分, 可以得到式(13)。

$$\int_{t_a}^{t_b} u_m dt = l \left[\int_{t_a}^{t_b} (R_1(i_m + 3k_x i_0) dt + L_1(i_m + 3k_x i_0) \Big|_{t_a}^{t_b}) + R_K \int_{t_a}^{t_b} (\Delta i + 3k_0 i_0) dt - H \int_{t_a}^{t_b} \int_{t_0}^t \Delta u dt dt \right] \quad (13)$$

式中, a 、 b 是采样序列号。在式(13)中有三个未知变量, 分别为距离 l 、等效电阻 R_K 以及 H 。

因此, 对于所提算法式(13), 任何连续的三个采样间隔都应该满足, 只需对采样信号就行连续积分即可求出故障距离。

2 仿真实验

为验证和评价所提算法, 利用 PSCAD/EMTDC 搭建图 2 所示的仿真模型, 详细参数见附录 B, 对不同故障点进行仿真。故障类型为单相接地(A相接地, 表示为“Ag”)。

所研究的线路长为 300 km。电源 M 和电源 N 的相角差由 0° (无负载)到 30° (M 超前于 N, 重载)变化。

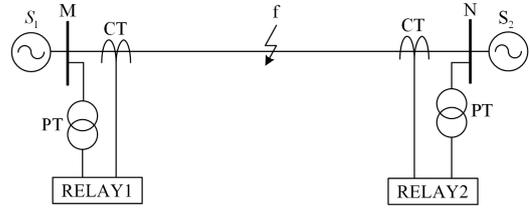


图 2 双端系统仿真模型

Fig. 2 Double-ended system simulation model

所提算法与传统算法的比较结果验证了所提算法的有效性。传统的单相接地故障测距可以用式(11)来表示, 将采样信号进行傅里叶变换后求解故障距离。

2.1 单相接地故障仿真分析

在不同的故障点发生 Ag 时, 仿真模型如图 2 所示, 单回输电线路, M、N 为两端母线, 其余参数见附录 B。将 PSCAD 仿真读取的数据经过 Matlab 运用新算法计算后, 所提算法和传统算法比较如图 3。

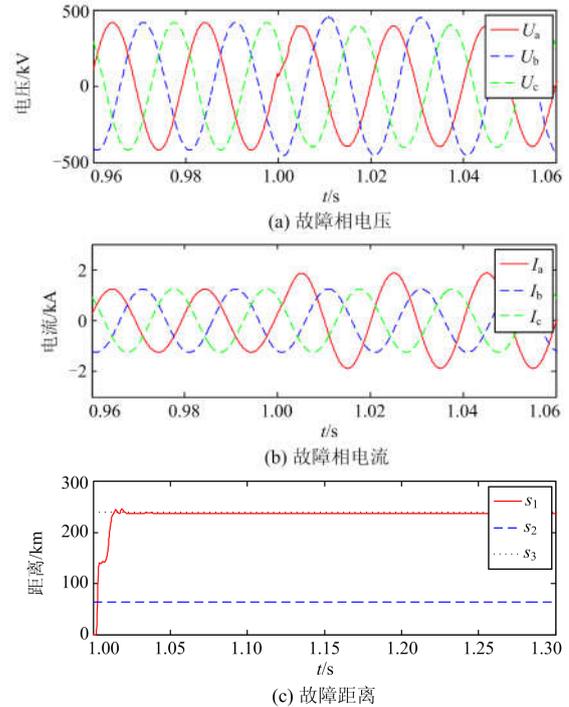


图 3 240 km 处发生过渡电阻为 300 Ω 的 Ag

Fig. 3 Estimated impedance for Ag fault with fault resistance of 300 Ω at 240 km

图中 s_1 : 所提算法所测的故障距离, s_2 : 传统算法所测的故障距离, s_3 : 实际故障距离, 下同。

图 3 示出了距离 M 端 240 km 处发生 A 相接地故障且过渡电阻为 300 Ω 时保护安装点的相电压、相电流和所测量的故障距离, 如图 3 所示, 新算法

在高阻故障时在 20 ms 内可以得到准确的故障位置。而传统算法误差大, 远偏离实际故障位置。

图4示出了在不同位置发生过渡电阻为300 Ω单相接地故障时的测距结果, 所提算法在不同故障点能够准确测出故障距离, 而传统算法将误差过大, 远不满足误差要求。图5示出了在相同故障点发生过渡电阻为100 Ω和200 Ω单相接地故障时的测距结果, 由图5可知, 所提算法对不同的过渡电阻均能准确测距, 且精度比过渡电阻为300 Ω时高。

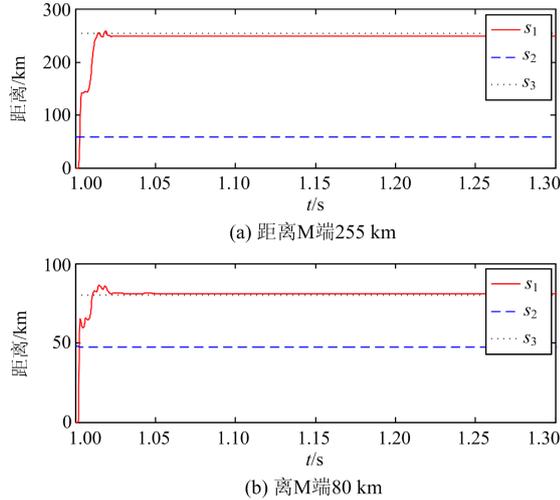


图 4 不同位置过渡电阻为 300 Ω 的 Ag

Fig. 4 Relay behavior for Ag fault with path resistance of 300 Ω at different locations

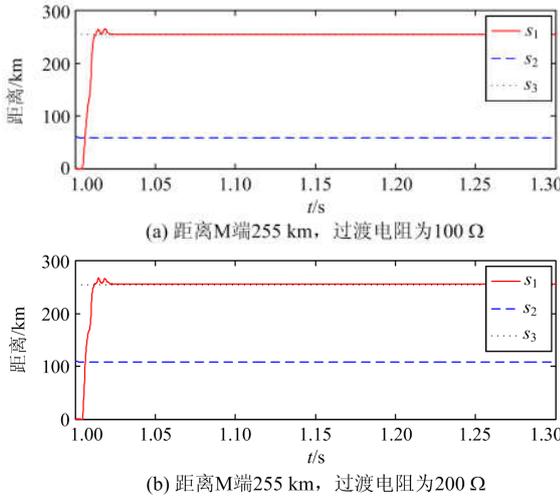


图 5 相同位置不同过渡电阻的 Ag

Fig. 5 Relay behavior for Ag fault with different path resistance at the same location

2.2 误差分析

算法误差定义为

$$E(\%) = \frac{X - X_c}{X_c} \cdot 100\% \quad (14)$$

其中: X_c 代表测量点和故障点之间的实际距离; X 为本文算法所计算的故障距离。为了进一步验证新算法, 给出了在不同典型故障情况下新算法与传统算法在各点的测量误差。

图 6 显示了所提算法和传统算法在不同故障位置对单相接地故障过渡电阻为 300 Ω。δ=30°(重载, 电源 M 超前于电源 N 的相角) 仿真模拟故障, 如图 5 所示, 新算法的最大误差小于 ±5%。因此, 该算法得到的故障距离能够满足误差要求。

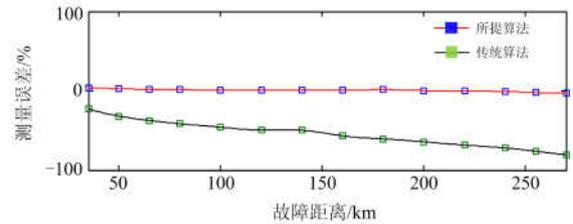


图 6 过渡电阻为 300 Ω A 相单相接地故障

Fig. 6 Ag fault with 300 Ω fault resistance

同时仿真了过渡电阻为 0 Ω(金属性接地)、100 Ω、200 Ω 时不同故障点的测距误差, 如图 7 所示, 所得测距结果误差均在 ±3% 以内, 远小于通常要求的 ±5%。因此本算法在不同的过渡电阻下均能准确测距。

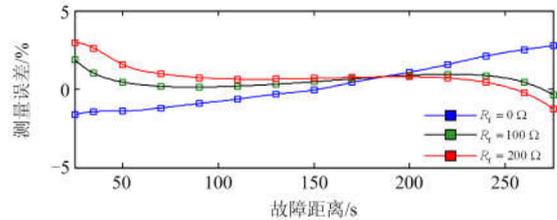


图 7 过渡电阻为 0 Ω、100 Ω、200 Ω 的 Ag

Fig. 7 Ag fault with 0 Ω, 100 Ω, 200 Ω fault resistance

通过以上仿真验证, 也可将所提出的算法扩展到相间故障和三相故障。对重载下不同过渡电阻在不同故障点以及不同故障类型进行仿真。表 1 示出了测量的故障距离和误差, 测量误差均在 ±3% 以内。

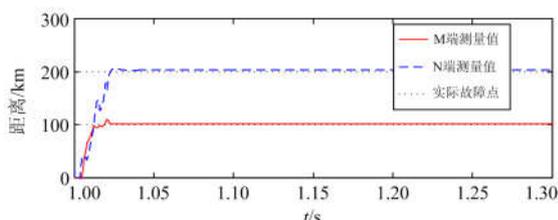
3 送端和受端测量结果分析

传统的故障测距会受到过渡电阻和负载电流的影响, 可能导致靠近送端(M 端)故障时出现较大的负误差或测距结果小于实际值, 而靠近受端(N 端)故障时出现正误差或测距结果大于实际值。为了分析送端和受端的故障距离, 图 8 给出了故障发生在距 M 端 100 km(故障点靠近 M 端)、200 km(故障点靠近 N 端)处且负载较大(M 端超前于 N 端的 δ 为 30°)的情况分析。结果表明, 该算法能够准确地计算出故障点到保护安装点的故障距离。

表 1 不同故障位置下不同故障类型的故障测距

Table 1 Fault distance for different fault types at different fault locations with different path resistance

实际位置	故障类型	过渡电阻/ Ω	测量距离/km	误差/%
100 km	Ag	0	99.27	-0.73
		150	100.73	0.73
		300	101.55	1.55
	BC	0	98.5	-1.50
		25	98.56	-1.44
		50	98.62	-1.38
ABC	0	98.4	-1.60	
	10	98.8	-1.20	
	20	98.5	-1.50	
240 km	Ag	0	244.91	1.96
		150	237.39	-1.09
		300	236.99	-1.26
	BC	0	241.00	0.42
		25	243.46	1.44
		50	243.40	1.42
	ABC	0	237.14	-1.19
		10	243.06	1.25
		20	242.50	1.04

图 8 过渡电阻为 300 Ω 、距 M 端 100 km 处单相接地故障
Fig. 8 Ag fault at 100 km from M with fault resistance of 300 Ω

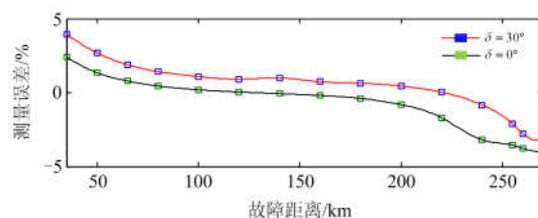
4 灵敏度分析

4.1 负载电流的影响

鉴于实际运行的输电线路不同时刻的负载电流可能不一样,对每一种算法的提出,都有必要评估负载电流的影响。本文在电源 M 超前于 N 的相角为 30° (重载)和为 0° (空载)两种极端条件下,对单相接地故障过渡电阻为 300Ω 的情况进行仿真计算。通过仿真计算证明,如图 9 所示,对于重载和空载,在过渡电阻最大为 300Ω 时,该算法的误差都在 $\pm 5\%$ 以内,满足一般故障的误差要求。因此,负载电流对本文所提算法的影响较小。

4.2 分布电容的影响

实际线路在运行时,可能会受到分布电容的影响,因此,在高阻故障时,也应将其考虑在内。而文中所有仿真数据及上文仿真结果,都是在输电线路利用分布参数模型进行的,因此仿真中已经计及了分布电容对本文所提算法的影响。由本文图 4—图

图 9 过渡电阻为 300 Ω 单相接地故障Fig. 9 Ag fault with 300 Ω fault resistance

9 仿真结果表明,不论何种故障在考虑分布电容的影响时,对 500 kV 典型线路在极端情况 300Ω 发生单相接地故障时,最大误差都小于 $\pm 5.0\%$ 。因此,分布电容对新算法的影响很小。

5 结论

本文基于保护安装处单端量的故障信息,提出了一种高阻接地故障时利用保护安装点电压电流变化量准确补偿由于高阻故障故障点两端故障电流相位不一致引起的误差,能够完全利用可测量表达带过渡电阻故障时的回路方程,减小由于两端电流分量相位不一致带来的误差。适用于超高压交流输电线路,得到以下结论:

1) 对不同故障点过渡电阻在 $0\sim 300 \Omega$ 变化,发生单相接地故障时,所提算法均能在 20 ms (一个周波) 内测出故障点位置,且在极端情况过渡电阻达 300Ω 时误差均在 $\pm 5\%$ 以内,过渡电阻较低时测量误差在 $\pm 3\%$ 以内。过渡电阻越高,所提算法精度比传统算法精度越高。

2) 所提算法也可扩展到相间故障和三相故障,针对发生以上类型的高阻故障进行仿真测距,误差在 $\pm 3\%$ 内,因此所提算法不仅局限于单相接地故障。

3) 考虑负荷电流及分布电容的影响,在重载和空载情况下进行仿真验证,在过渡电阻最大为 300Ω 时显示测距结果仍满足误差要求,保证了对于所有影响测距结果的故障类型均能准确测量故障点位置。

附录 A

故障前后故障点电压关系的推导

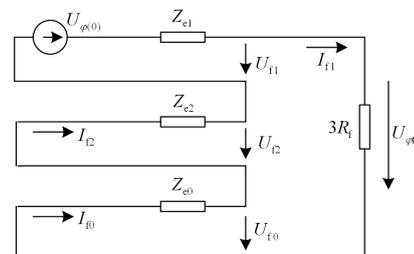


图 10 单相接地故障序网图

Fig. 10 Diagram of single-phase ground fault sequence network

$$I_{f1} = \frac{U_{f(0)}}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0} + 3R_f} \quad (\text{A-1})$$

$$U_f = I_f R_f = 3I_{f1} R_f = \frac{3R_f U_{f(0)}}{Z_{e1} + Z_{e2} + Z_{e0} + 3R_f} \quad (\text{A-2})$$

附录 B

仿真模型：电压等级为 500 kV，长度为 300 km 的输电线路模型。输电线路的正序参数为

$$R_1 = 0.022 \Omega/\text{km}$$

$$X_1 = 0.28 \Omega/\text{km}$$

$$X_{C1} = 0.24114 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$$

零序参数为

$$R_0 = 0.1828 \Omega/\text{km}$$

$$X_0 = 0.86 \Omega/\text{km}$$

$$X_{C0} = 0.57875 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$$

参考文献

- [1] 侯建兰, 马冰, 谢小荣, 等. 电网暂态电压稳定的主要影响因素量化分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 28-34.
HOU Jianlan, MA Bing, XIE Xiaorong, et al. Quantitative analysis of main factors influencing transient voltage stability of power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 28-34.
- [2] XU Z Y, JIANG S J, YANG Q X. Ground distance relaying algorithm for high resistance fault[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(1): 27-35.
- [3] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 陈学伟, 高厚磊, 向珉江. 基于电子式互感器微分输出的改进 R-L 模型距离保护算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 283-293.
CHEN Xuewei, GAO Houlei, XIANG Minjiang. Improved R-L model distance protection algorithm based on differential output of electronic transducers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 283-293.
- [5] 贺家李, 李永丽, 郭征. 特高压输电线路继电保护配置方案: 特高压输电线路的结构与运行特点[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 1-6.
HE Jiali, LI Yongli, GUO Zheng. Relay protection for UHV transmission lines: part one construction and operation characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 1-6.
- [6] 李欣唐, 员志皓, 孟昭勇. 一种适于高阻接地短路的故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 15-18.
LI Xintang, YUAN Zhihao, MENG Zhaoyong. A new fault location method for high resistance grounding short circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 15-18.
- [7] 侯俊杰, 樊艳芳. 基于分布参数模型的风电系统长距离送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 26-33.
HOU Junjie, FAN Yanfang. Time domain distance protection for long distance outgoing line of wind power system based on distributed parameter model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 26-33.
- [8] 王丰华, 穆卡, 张君, 等. 基于参数修正的输电线路两端不同步测距方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 95-101.
WANG Fenghua, MU Ka, ZHANG Jun, et al. Asynchronous two-terminal fault location method of transmission line based on parameter modification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 95-101.
- [9] 郑涛, 王可坛, 刘校销, 等. 可消除过渡电阻影响的单相接地距离保护研究[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4045-4055.
ZHENG Tao, WANG Ketan, LIU Xiaoxiao, et al. Research on single phase grounding distance protection against transition resistance[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4045-4055.
- [10] 李振兴, 王新, 田斌. 基于沿线电压分布规律的快速故障测距[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 112-120.
LI Zhenxing, WANG Xin, TIAN Bin. A fast fault location method based on distribution voltage regularities along transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 112-120.
- [11] 董新洲. 小波理论应用于输电线路行波故障测距的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
DONG Xinzhou. Application of wavelet theory to traveling wave fault location of transmission lines[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [12] 夏远洋, 李啸骢, 陈飞翔. 基于 FastICA 的输电线路行波故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 138-143.
XIA Yuanyang, LI Xiao'en, CHEN Feixiang. FastICA based traveling wave fault location algorithm for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 138-143.
- [13] 闫红艳, 高艳丰, 王继选. 同杆双回路行波故障测距的关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 120-128.
YAN Hongyan, GAO Yanfeng, WANG Jixuan. Research

- on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(4): 120-128.
- [14] 林圣, 何正友, 陈鉴. 基于行波时频特征的单端故障测距方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(1): 258-264.
LIN Sheng, HE Zhengyou, CHEN Jian. A single terminal fault location method based on time-frequency characteristic of traveling wave[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(1): 258-264.
- [15] 冯腾, 董新洲. 双端行波故障测距装置性能测试方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(9): 114-120, 128.
FENG Teng, DONG Xinzhou. Performance test method of two-terminal traveling wave fault locator[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(9): 114-120, 128.
- [16] 王博, 谷昌瑞, 吉晓筱, 等. 基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(5): 120-127.
WANG Bo, GU Changrui, JI Xiaoxiao, et al. Research on improved distributed fault location method based on multi-point fault's traveling wave detection[J]. *Power Engineering Technology*, 2017, 36(5): 120-127.
- [17] 彭楠, 程真何, 崔玉, 等. 半波长输电线路行波传播特性及故障测距[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(1): 86-94.
PENG Nan, CHENG Zhenhe, CUI Yu, et al. Travelling wave propagation characteristics and fault location of half-wavelength transmission lines[J]. *Power Engineering Technology*, 2020, 39(1): 86-94.
- [18] XU F, DONG X. A novel single-ended traveling wave fault location method based on reflected wave-head of adjacent bus[C]// 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, 2014: 1-5.
- [19] XU Z Y, HUANG S F, RAN L, et al. A distance relay for a 1000 kV UHV transmission line[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(4): 1795-1804.
- [20] 姜宪国, 李博通, 张云柯. 基于电压序量变化量的超高压混合线路故障测距方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(12): 3578-3583.
JIANG Xianguo, LI Botong, ZHANG Yunke. A fault location method for extra-high voltage mixed lines based on variation of sequence voltage[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3578-3583.
- [21] 王锋, 于九祥, 别朝红. 高阻接地短路的精确测距方法[J]. *电力系统自动化*, 1997, 22(2): 48-50.
WANG Feng, YU Jiuxiang, BIE Chaohong. Accurate ranging method for high resistance grounding short circuit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1997, 22(2): 48-50.
- [22] XU Z Y, XU G, LI R. A new fault-impedance algorithm for distance relaying on a transmission line[J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1384-1392.
- [23] 杨奇逊, 黄少峰. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

收稿日期: 2019-05-17; 修回日期: 2019-06-11

作者简介:

李 跃(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: liyue_0729@126.com

郑 涛(1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: zhengtao_sf@126.com

(编辑 葛艳娜)