

基于参数识别的高阻接地距离保护算法

索南加乐, 王增超, 张健康, 仝小虎, 代玲, 康小宁

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

A Novel Distance Protection Algorithm for High Resistance Grounding Faults Based on Parameter Identification

SUONAN Jiale, WANG Zengchao, ZHANG Jiankang, TONG Xiaohu, DAI Ling, KANG Xiaoning

(Academy of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: In this paper, a novel distance protection algorithm for improving properties of relay in high resistance to ground fault was presented. This algorithm deduces a linear differential equation with three unknown quantities. The core idea of this algorithm is to regard the system after fault point as an inductance and the equation is inferred from accurate fault equation. Theoretical analysis and simulation results prove it applicable to short and mid-range transmission lines, also the bearing ability to high resistance fault and high accuracy of this algorithm, especially in the end of protection domain, which prevent the overreach happening. This algorithm is hoped to resolve the effect of fault resistance to distance protection and be a new and fast distance protection.

KEY WORDS: power system; high resistance grounding fault; distance protection; parameter identification; differential equation

摘要:为解决输电线路单相接地故障时距离保护耐过渡电阻能力不高的问题,提出一种新的具有3个系数的时域解微分方程距离保护算法。算法的核心思想是将故障点后系统等效为一个电感,通过列写故障时准确测距方程,推导出3系数的解微分方程算法。理论分析和EMTP仿真实验证明,该算法适用于中、短距离输电线路,耐过渡电阻能力高,尤其在末端时测距准确,在末端经高过渡电阻故障时,不存在超越问题。算法有望从根本上解决距离保护耐过渡电阻能力不高的问题,构成新型的快速距离保护。

关键词: 电力系统; 高阻接地故障; 距离保护; 参数识别; 微分方程

0 引言

距离保护在高压输电线路中获得广泛的应用。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51037005, 50877061)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51037005,50877061)。

传统距离保护耐过渡电阻能力不高、动作速度不够快的缺点限制了它的进一步应用。在高压输电线路中,单相接地故障是最常发生的故障,单相接地故障往往伴随着高过渡电阻,如果不能快速切除此类故障,会对系统稳定性和安全性造成更大的危害。

传统工频量^[1]和传统解微分方程^[2]的距离保护原理,由于方程中限制只能求解2个未知数,因此,它们一般假设保护安装处电流与故障电流同相位,这种假设在线路末端发生高过渡电阻接地故障时,会引起很大的测距误差,这是造成距离保护超越和误动的根本原因。

为了提高距离保护的耐过渡电阻能力,人们进行了大量的研究工作,提出了很多改进方法和新原理。零序电抗继电器^[3-4]、多相补偿距离继电器^[1]、序分量距离继电器^[1]在一定程度上提高了保护耐过渡电阻能力。由于保护安装处负序分量电流相位与零序分量相比,更接近于故障处电流相位,人们又提出了负序电抗继电器^[5-6]和采用负序分量的距离保护方程^[7]。为了消除测距的原理性误差,人们又引入了迭代法^[8-9],包括零序电流相位修正、零序电流修正和故障分量电流修正等,这一类方法可以在一定条件下精确求得故障距离,但是由于采用了迭代的方法,计算量比较大,存在伪根,不适用于距离保护。

文献[10-11]提出了行波测距式的距离保护;文献[12]将人工神经网络理论应用于距离保护;文献[13]提出采用贝瑞隆模型计算沿线电压,通过寻找电压最低点来确定故障点的方法;文献[14-15]采用了自适应的方法,也在一定程度上提高了耐过渡

电阻能力。

本文针对输电线路最常发生的单相接地故障，提出一种具有3个系数的时域解微分方程的距离保护算法，即基于参数识别的高阻接地距离保护算法。算法的核心思想是将故障点后系统等效为一个电感，通过列写故障时准确故障测距方程，推导出3系数的解微分方程算法。理论分析和EMTP仿真实验证明，该算法耐过渡电阻能力高，尤其在线路末端时测距准确，不存在超越问题，有望从根本上解决距离保护耐过渡电阻能力不高的问题。

1 参数识别的高阻接地距离保护算法推导

图1给出了三相系统发生a相经过渡电阻短路接地故障示意图，图2为对应的零序分量网络图。保护装置安装于m侧。图中 R_F 和 I_{Fa} 分别代表故障过渡电阻和过渡电阻上流过的电流。

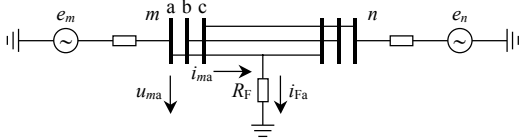


图1 单相经过渡电阻短路故障
Fig.1 Single-phase-to-earth fault

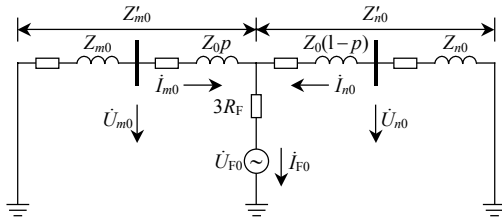


图2 零序分量网络图
Fig.2 Zero-sequence network

图1有如下2个等价的相量方程：

$$\dot{U}_{ma} = (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_Z)Z_1p + \dot{I}_{Fa}R_F \quad (1)$$

$$\dot{U}_{ma} = (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_R)r_1p + (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_L)j\omega L_1p + \dot{I}_{Fa}R_F \quad (2)$$

式中： p 为故障距离； R_F 为故障过渡电阻； $K_Z = (Z_0 - Z_1)/(3Z_1)$ ； $K_R = (r_0 - r_1)/(3r_1)$ ； $K_L = (L_0 - L_1)/(3L_1)$ 。写成式(2)形式是为了后面推导公式方便。

由于 \dot{I}_{Fa} 不可测量，式(2)不能求出故障距离 p 和过渡电阻 R_F 的准确值。单相接地故障时，有

$$\dot{I}_{Fa} = 3\dot{I}_{F0} = 3(\dot{I}_{m0} + \dot{I}_{n0}) \quad (3)$$

由图2零序故障分量网络图，可得到

$$\dot{I}_{Fa} = 3\dot{I}_{m0} \frac{Z_{\Sigma 0}}{Z'_{n0}} \quad (4)$$

式中： $Z'_{n0} = Z_{n0} + Z_0(l - p)$ ； $Z_{\Sigma 0} = Z'_{m0} + Z'_{n0} = R_{\Sigma 0} + j\omega L_{\Sigma 0}$ 。

假设图2零序故障分量网络中故障点之后的电阻为0，即式(4)中 $Z'_{n0} = R'_{n0} + j\omega L'_{n0}$ 的电阻部分 $R'_{n0} = 0$ ，此时 $Z'_{n0} = j\omega L'_{n0}$ ，则式(4)变为

$$\dot{I}_{Fa} = 3\dot{I}_{m0} \frac{Z'_{\Sigma 0}}{j\omega L'_{n0}} = 3\dot{I}_{m0} \frac{R'_{\Sigma 0} + j\omega L'_{\Sigma 0}}{j\omega L'_{n0}} \quad (5)$$

式中 $Z'_{\Sigma 0} = Z'_{m0} + j\omega L'_{n0}$ ，即分子分母中同时忽略了 Z'_{m0} 中电阻部分 R'_{m0} 。

将式(5)代入式(1)，可得到3系数解微分方程算法的工频量表达式：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ma} = & (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_Z)Z_1p + \\ & 3\dot{I}_{m0}R_F \frac{R'_{\Sigma 0}}{j\omega L'_{n0}} + 3\dot{I}_{m0}R_F \frac{j\omega L'_{\Sigma 0}}{j\omega L'_{n0}} \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)按照式(2)的形式重新写出，并将公式两边同乘以 $j\omega$ ，可以得到

$$\begin{aligned} j\omega \dot{U}_{ma} = & (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_R)r_1p j\omega + (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_L)j\omega L_1p j\omega + \\ & 3\dot{I}_{m0}R_F \frac{R'_{\Sigma 0}}{L'_{n0}} + 3\dot{I}_{m0}R_F \frac{j\omega L'_{\Sigma 0}}{L'_{n0}} \end{aligned} \quad (7)$$

对式(7)进行傅里叶反变换，得到时域下3系数的解微分方程距离保护方程：

$$\begin{aligned} \frac{du_{ma}}{dt} = & x_1 \left[\frac{d(i_{ma} + K_R 3i_{m0})}{dt} r_1 + \frac{d^2(i_{ma} + K_L 3i_{m0})}{dt^2} L_1 \right] + \\ & x_2 i_{m0} + x_3 \frac{di_{m0}}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中，微分方程的3个系数 x_1 、 x_2 、 x_3 与故障距离 p ，过渡电阻 R_F 和故障点后系统零序电感 L'_{n0} 有着严格的对应关系：

$$\begin{cases} p = x_1 \\ L'_{n0} = \frac{x_3}{x_2} R'_{m0} - L'_{m0} \\ R_F = \frac{x_2 L'_{n0}}{3R'_{m0}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $R'_{m0} = R_{m0} + r_0p$ ； $L'_{m0} = L_{m0} + L_0p$ 。其中 R_{m0} 、 L_{m0} 可作为已知数，它们的求解方法参见文献[16]。

式(8)、(9)即为基于参数识别的高阻接地距离保护算法求解公式，它突破了传统距离保护算法仅求解2个未知数的局限，方程中含有3个未知数，考虑了对端系统对过渡电阻中电流的影响。

从推导过程可看出，由于未考虑线路分布电容的影响，本文算法仅适用于中、短距离输电线路。

2 算法理论误差分析

2.1 误差公式推导

为简单起见，以下推导工频稳态下 RL 模型的理论误差公式。

故障时准确电压电流方程和基于参数识别的高阻接地距离保护算法的工频量方程分别为

$$\dot{U}_{ma} = (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_Z)Z_1p + 3\dot{I}_{m0}R_F K \quad (10)$$

$$\dot{U}_{ma} = (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_Z)Z_1p_1 + 3\dot{I}_{m0}R_F K_1 \quad (11)$$

式中： $K = Z_{\Sigma 0} / Z'_{n0} = (Z'_{m0} + Z'_{n0}) / Z'_{n0}$ ； $K_1 = Z'_{\Sigma 0} / (j\omega L'_{n0}) = (Z'_{m0} + j\omega L'_{n0}) / (j\omega L'_{n0})$ ； p_1 为基于参数识别的高阻接地距离保护算法计算故障距离。

定义包含未知数 p 、 R'_{n0} 的二元函数 F 为

$$F(p, R'_{n0}) = \dot{U}_{ma} - (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_Z)Z_1p - 3\dot{I}_{m0}R_F K \quad (12)$$

式中 R'_{n0} 为零序网络中故障点后电阻部分。

计算 F 函数在 $p=p_1$ 及 $R'_{n0}=0$ 处的泰勒展开式，忽略高次项可得

$$F(p, R'_{n0}) = F(p_1, 0) + \frac{\partial F}{\partial p}(p - p_1) + \frac{\partial F}{\partial R'_{n0}}(R'_{n0} - 0) \quad (13)$$

其中

$$F(p_1, 0) = \dot{U}_{ma} - (\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_Z)Z_1p_1 - 3\dot{I}_{m0}R_F K_1 \quad (14)$$

由式(10)、(11)可得

$$\begin{cases} F(p, R'_{n0}) = 0 \\ F(p_1, 0) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)并整理后可得

$$p_1 - p = \left(\frac{\partial F}{\partial R'_{n0}}\right) / \left(\frac{\partial F}{\partial p}\right) R'_{n0} \quad (16)$$

求解式(16)中偏导数，可得到算法的误差公式：

$$p_1 - p = \frac{-K_{R_F} Z'_{m0}}{1 + K_{R_F} (Z_0 Z'_{n0} + j\omega L_0 Z'_{m0})} R'_{n0} \quad (17)$$

式中 $K_{R_F} = (3\dot{I}_{m0}R_F) / [(\dot{I}_{ma} + 3\dot{I}_{m0}K_Z)Z_1Z'_{n0}]$ ，为与故障过渡电阻有关的误差系数。

文献[17]指出，距离保护正确动作的条件是测距误差不大于故障距离与保护整定距离之差：即当故障发生在保护范围末端时，测距最准确，测距误差为 0；当故障发生在保护范围内部或外部时，只

要测距误差小于允许误差，保护就不会拒动或误动。

2.2 线路末端故障时的计算距离误差分析

当被保护线路末端故障时， Z'_{n0} 即为对端系统的零序阻抗。对于 110kV 及以上电压等级，两侧变压器采用中性点直接接地方式的输电线路，当进行故障分析时， Z'_{n0} 即为变压器的漏阻抗，变压器的漏阻抗中电阻部分很小，可忽略不计，故可将其视作一个纯电感^[18]。即线路末端故障时， $R'_{n0}=0$ 。由误差式(17)，算法计算距离误差为 0，此时计算距离等于实际故障距离。

实际中一些系统由于线路两端变压器绕组形式和接线方式的不同， Z'_{n0} 中电阻值不能忽略， $R'_{n0}>0$ 。当不满足假设条件时，代入仿真部分 110kV 系统线路参数，由式(17)可以求出 $p_1 > p$ ，即此时计算距离大于实际故障距离，保护不会误动作。

由此可看出，当被保护线路末端故障，假设成立，本文算法不存在理论误差，计算距离是完全准确的。

2.3 线路末端母线附近故障时的计算距离误差分析

当线路末端母线附近故障时， Z'_{n0} 包括对端系统零序阻抗和故障点与对端系统之间线路部分零序阻抗。由于线路零序电阻不为 0，此时 $R'_{n0}>0$ 。

定义测距引用误差 $E = (p_1 - p) / l$ ，采用仿真部分 110kV 系统参数，图 3 给出了系统空载时，在线路末端附近发生故障时基于参数识别的高阻接地距离保护算法的测距引用误差曲线。图中：被保护线路长度为 50km， p 若大于 50km，表示故障点位于下一段线路； E 代表测距引用误差。

由图 3 可以得出：

- 1) 当被保护线路末端故障，满足假设条件，

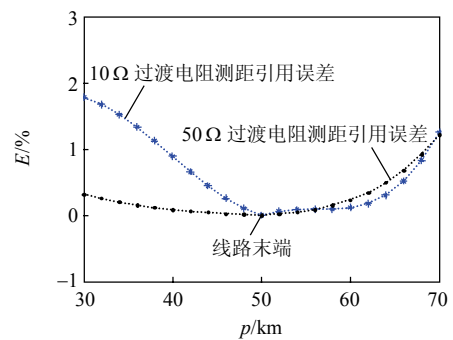


图 3 线路末端附近发生故障时基于参数识别的高阻接地距离保护的测距误差曲线

Fig. 3 Location error curves of the novel algorithm when faults nearby the end of the line

计算距离引用误差为 0，计算距离与实际故障距离相等；

2) 当被保护线路末端附近故障，不满足假设条件， $R'_{n0} > 0$ ，此时测距误差为正误差，即计算距离大于实际故障距离，距离保护不会发生超越。

上述性能保证了本文算法在线路末端故障不会发生超越的前提下，保护同样具有很强的耐过渡电阻能力。

3 仿真验证

针对本文提出的距离保护新算法，采用 EMTP 仿真软件，在中、短距离输电线路下进行仿真验证。

表 1 给出传统工频量距离保护、解微分方程法距离保护和本文方法仿真计算故障距离结果。仿真系统原理接线如图 1 所示，故障均为 a 相接地故障。

表 1 仿真计算距离

Tab. 1 Distance simulation results

故障距离/ km	过渡电阻/ Ω	计算距离/km		
		工频量距离保护	解微分方程法	本文方法
10	10	9.3	10.1	10.1
	20	10.1	10.3	10.3
	50	10.6	10.7	12.3
	100	10.7	11.2	19.7
20	10	17.8	19.8	20.0
	20	19.4	19.7	20.1
	50	19.6	19.4	20.8
	100	19.4	19.1	25.1
30	10	26.4	29.1	29.8
	20	28.2	28.4	29.5
	50	26.9	26.6	28.3
	100	25.0	24.7	43.4
40	10	34.8	36.8	39.1
	20	34.7	34.0	38.4
	50	28.8	27.9	46.7
	100	22.8	21.9	70.6
50	10	30.1	28.1	51.0
	20	14.4	12.1	50.3
	50	-15.9	-18.9	49.3
	100	-40.9	-45.2	49.0

采用 110 kV 系统参数进行仿真：输电线路总长度 $l = 50$ km；输电线路参数为 $r_1 = 0.105 \Omega/\text{km}$ ， $L_1 = 1.258 \text{ mH}/\text{km}$ ， $C_1 = 0.0092 \mu\text{F}/\text{km}$ ， $r_0 = 0.315 \Omega/\text{km}$ ， $L_0 = 3.774 \text{ mH}/\text{km}$ ， $C_0 = 0.0031 \mu\text{F}/\text{km}$ ； m 侧系统 $L_{m0} = 11.6 \text{ mH}$ ， $L_{m1} = 30.8 \text{ mH}$ ； n 侧系统 $L_{n0} = 23.1 \text{ mH}$ ， $L_{n1} = 61.6 \text{ mH}$ 。采样频率为 10 kHz，数据处理软件

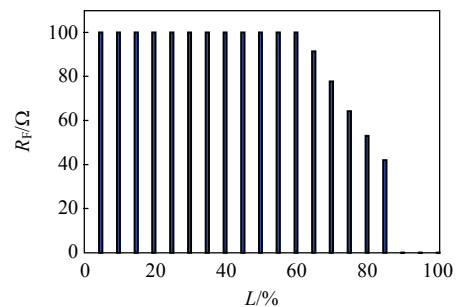
为 Matlab。

工频量距离保护采用全周傅式滤波；解微分方程法和本文算法数据经低通滤波器处理，滤波器截止频率为 100 Hz，取故障后 10 ms 数据构成数据窗。

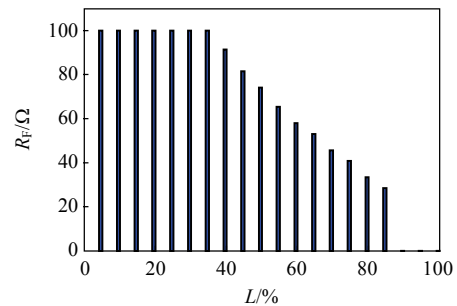
由表 1 可看出：传统的工频量距离保护和解微分方程法在故障发生在被保护线路首端时，计算距离比较准确，受过渡电阻影响比较小；当故障发生在被保护线路末端附近时，随着故障过渡电阻的增大，计算距离产生很大的负误差，引起距离保护的超越。

基于参数识别的高阻接地距离保护算法当故障发生在被保护线路末端时，计算距离十分精确，不受过渡电阻影响；当故障点接近被保护线路末端时，随着过渡电阻增大，计算距离产生正误差，保护不会误动作；当故障发生在线路内部时，随着过渡电阻增大，本文算法产生一定的计算误差，但不影响保护的正确动作。

图 4、5 分别给出了 110 kV 系统和 500 kV 系统下基于参数识别的高阻接地距离保护算法的耐过渡电阻能力。保护整定区为线路全长的 90%。500 kV 系统线路长度为 $l = 80$ km，具体线路参数为 $r_1 = 0.021 \Omega/\text{km}$ ， $L_1 = 0.898 \text{ mH}/\text{km}$ ， $C_1 = 0.0129 \mu\text{F}/\text{km}$ ，



(a) 送电侧($\delta = 20^\circ$)



(b) 受电侧($\delta = -20^\circ$)

竖线代表保护动作；空白区代表保护不动作。下同。

图 4 110 kV 系统耐受过渡电阻动作特性
Fig. 4 Operating characteristic of bearing earth-resistance in 110 kV system

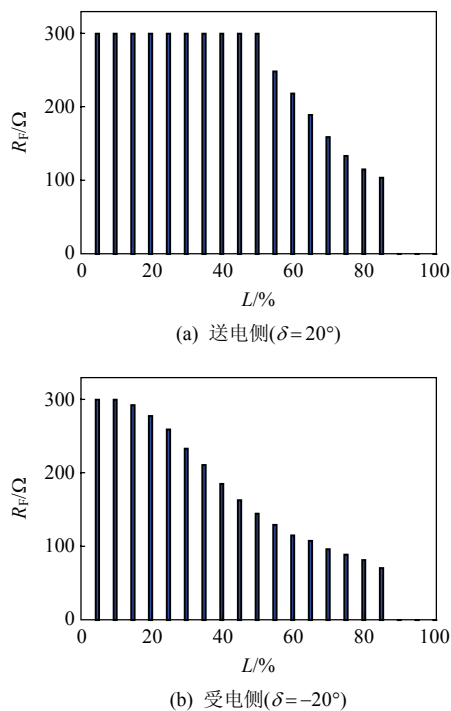


图 5 500 kV 系统耐受过渡电阻动作情况

Fig. 5 Operating characteristic of bearing earth-resistance in 500 kV system

$r_0=0.115 \Omega/\text{km}$, $L_0=2.288 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0=0.0052 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

图中： L 表示故障点位置占线路全长的百分比， $L=p/l \times 100$ ； $\delta = \delta_m - \delta_n$ 表示两侧系统电势夹角， δ_m 和 δ_n 分别为 m 侧和 n 侧系统电势角。仿真中以线路全长的 5% 为计算间隔，仿真过渡电阻从 0Ω 开始，110 kV 系统最大校验电阻为 100Ω ，500 kV 系统最大校验电阻为 300Ω 。当连续 6 个点计算距离小于保护整定距离，即认为保护动作。

由图 4、5 可看出：在 110 kV 系统和 500 kV 系统，保护分别安装在送电侧和受电侧，基于参数识别的高阻接地距离保护算法都具有很强的耐过渡电阻能力。由图 4(a)、5(a) 可知，在送电侧线路全长 80% 处，110 kV 系统耐过渡电阻能力达到 52Ω ，500 kV 系统达到 113Ω ，远优于传统距离保护。

基于参数识别的高阻接地距离保护算法计算距离误差主要包括：1) 使用差分代替微分时引入的计算误差；2) 不考虑线路分布电容引入的误差。在仿真中采用低通滤波器滤除分布电容引起的暂态分量。

4 结论

本文针对发生高阻接地故障时传统距离保护

耐过渡电阻能力不高，在线路末端发生故障保护容易超越的问题，提出了一种具有 3 个系数的时域解微分方程的距离保护算法，即基于参数识别的高阻接地距离保护算法。理论分析和仿真实验证明，本文提出的方法具有以下特点：

1) 当在线路末端故障时，测距方程可以精确地计算故障距离；当在线路末端附近故障时，测距方程计算故障距离偏大，保护不会误动作，不存在超越问题。

2) 与传统距离保护算法相比，本文算法耐过渡电阻能力显著提高，高过渡电阻故障时计算距离误差小。

3) 不受故障暂态和非周期分量影响，故障暂态越丰富，方程越容易求解。

4) 适用于中、短距离高压输电线路。

本文方法需要一次系统准确电气量测量值，传统电磁型互感器由于只能准确测量工频量，不能满足这种要求；随着电子式互感器的应用和普及，该方法有望得到实际应用。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 163-165.
Zhu Shengshi. Principle and technology of high-voltage grid relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 163-165(in Chinese).
- [2] 孙荣智, 温渤婴, 董新洲, 等. 输电线路微机距离保护中解微分方程算法的分析与改进[J]. 现代电力, 2006, 23(4): 15-18.
Sun Rongzhi, Wen Boying, Dong Xinzhou, et al. Analysis and improvement of algorithm for solving differential equation in computer distance protection of transmission line[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(4): 15-18(in Chinese).
- [3] 范春菊, 于会萍, 郁惟镛, 等. 零序电抗继电器抗过渡电阻能力分析[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(10): 7-10.
Fan Chunju, Yu Huiping, Yu Weiyong, et al. Ability analysis of zero-sequence reactance relay against transient resistance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(10): 7-10(in Chinese).
- [4] 王宾, 董新洲, 薄志谦. 零序电抗继电器在特高压输电线路上的适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 46-50.
Wang Bin, Dong Xinzhou, Bo Zhiqian. Analysis on the zero-sequence reactance relay application in ultra-high-

- voltage AC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 46-50(in Chinese).
- [5] 王宾,董新洲,薄志谦. 特高压交流长线路零序电抗继电器动作特性分析及改进[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 60-64.
Wang Bin, Dong Xinzhou, Bo Zhiqian. Analysis and improvement of zero sequence reactance relay with application in ultra-high-voltage long AC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 60-64(in Chinese).
- [6] 李斌,常文华,赵长兵,等. 超高压输电线路接地电抗继电器研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 8-12.
Li Bin, Chang Wenhua, Zhao Changbing, et al. Earthing fault reactance relay of EHV transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 8-12(in Chinese).
- [7] Xu Z Y, Jiang S J, Yang Q X. Ground distance relaying algorithm for high resistance fault[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2009, 4(1): 27-35.
- [8] 张哲,陈德树. 高压输电线路故障测距中的伪根问题及其改进方法[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(6): 11-17.
Zhang Zhe, Chen Deshu. False root and its modification for fault locating on electric power transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(6): 11-17(in Chinese).
- [9] 张艳霞,李志果. 基于单端电气量的故障测距算法[J]. 天津大学学报, 2006, 39(8): 928-931.
Zhang Yanxia, Li Zhiguo. Fault location algorithm based on signal terminal electrical data[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(8): 928-931(in Chinese).
- [10] 葛耀中,董新洲,董杏丽. 测距式行波距离保护的研究(一): 理论与实现技术[J]. 电力系统自动化, 2002, 8(6): 34-40.
Ge Yaozhong, Dong Xinzhou, Dong Xingli. Travelling wave-based distance protection with fault location, part one: theory and technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 8(6): 34-40(in Chinese).
- [11] 束洪春,司大军,陈学允. 输电线路行波测距式距离保护方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(4): 1-5.
Shu Hongchun, Si Dajun, Chen Xueyun. Study on distance protection scheme based on traveling wave fault location[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(4): 1-5(in Chinese).
- [12] 段玉倩,贺家李. 基于人工神经网络的距离保护[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 67-70.
Duan Yuqian, He Jiali. Distance relay protection based on artificial neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 67-70(in Chinese).
- [13] 薛士敏,贺家李,李永丽. 特高压输电线基于贝瑞隆模型的距离保护[J]. 继电器, 2005, 33(19): 1-4, 13.
Xue Shimin, He Jiali, Li Yongli. Distance protection based on Bergeron model for UHV transmission lines[J]. Relay, 2005, 33(19): 1-4, 13(in Chinese).
- [14] 杨兰,张艳平,杨庭芳. 高压电网自适应接地距离保护研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 134-137.
Yang Lan, Zhang Yanping, Yang Tingfang. Study of the adaptive ground distance protection for high voltage network[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 134-137(in Chinese).
- [15] 张华中,王维庆,朱玲玲,等. 双回输电线路自适应距离保护[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 209-213.
Zhang Huazhong, Wang Weiqing, Zhu Lingling, et al. Adaptive distance protection of double-circuit transmission line[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 209-213(in Chinese).
- [16] 索南加乐,齐军,陈福锋,等. 基于R-L模型参数辨识的输电线路准确故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 119-125.
Suonan Jiale, Qi Jun, Chen Fufeng, et al. An accurate fault location algorithm for transmission lines based on R-L model parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 119-125(in Chinese).
- [17] 索南加乐,顾嘉,薛晓辉. 基于工频量补偿算法的长线路距离保护[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 57-60.
Suonan Jiale, Gu Jia, Xue Xiaohui. Distance protection based on frequency-domain compensation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 57-60(in Chinese).
- [18] 阎治安,崔新艺,苏少平. 电机学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 80-107.
Yan Zhi'an, Cui Xinyi, Su Shaoping. Electrical machinery[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006: 80-107(in Chinese).



索南加乐

收稿日期: 2011-03-31。

作者简介:

索南加乐(1960),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统继电保护的教学与科研工作, relay@mail.xjtu.edu.cn;

王增超(1987),男,硕士,研究方向为电力系统继电保护, wxinba@126.com。

(责任编辑 谷子)