

自适应接地距离继电器

索南加乐¹, 许庆强^{1,2}, 宋国兵¹, 赵文涛³, 李瑞生⁴, 张克元⁴

- (1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏省南京市 210036)
- (3. 中兴通讯股份有限公司乌鲁木齐办事处, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830002)
- (4. 许继电气保护及自动化事业部, 河南省许昌市 461000)

摘要: 基于单相接地模型, 推导得到由故障点两侧零序阻抗角差异引起测量电抗的综合误差, 根据综合误差的具体情况对测量电抗进行补偿, 从而得到自适应接地距离继电器动作判据。新判据的多边形阻抗特性用纯电抗线来代替传统的电抗下倾线, 不再像传统距离保护那样盲目地缩小动作范围。在可靠防止距离保护超越误动作的前提下, 扩大了距离保护的动作范围。用 EMTP 进行了大量的数字仿真实验, 结果表明, 自适应阻抗动作判据能有效防止保护超越误动作, 也提高了区内故障的动作灵敏度。

关键词: 电力系统; 继电保护; 距离继电器; 过渡电阻

中图分类号: TM773

0 引言

在高压系统中, 单相接地故障往往占 80% 以上, 其他故障也往往是由单相接地故障发展起来的, 因此, 提高单相接地距离继电器的性能, 对于减少故障引起的损失、提高系统稳定性具有重要意义。现有各种接地距离继电器的表述方式各有不同, 性能特点也略有区别^[1~4]。分析、研究这些继电器的性能, 进而加以改进、提高, 成为继电保护研究的一个重要内容。

多边形特性阻抗继电器具有耐高过渡电阻的能力, 在现场得到较广泛的应用。对接地故障, 一般送电端的阻抗继电器由于过渡电阻上的附加阻抗呈阻容性而易于超越^[5]。多边形阻抗特性采用电抗下倾线来防止超越误动作, 下倾角是根据送电端保护在过渡电阻上引起测量电抗的最大误差来确定的。相当于无论两侧系统的相角差大小如何、也不管是送电侧还是受电侧, 都按照送电侧保护在过渡电阻上引起测量电抗的最大误差进行补偿。该方法能有效避免距离超越, 但它是靠盲目缩短保护范围来实现的, 降低了距离保护的性能。

本文对测量电抗的误差进行实时估算, 根据误差的正负来确定补偿方案。用自适应电抗线来代替传统的电抗下倾线, 很大程度上提高了距离保护性能。EMTP 数字仿真结果表明, 该自适应动作特性比传统的多边形阻抗特性有很大改善。

1 基本原理

参见图 1, 系统发生单相接地 (以 A 相接地为例), 假设被保护线路两侧母线处电压分别为 $\dot{U}_m$ 和 $\dot{U}_n$, 两侧母线流向线路的 A 相电流分别为 $\dot{I}_{mA}$ 和 $\dot{I}_{nA}$, 两侧线路中的零序电流分别为 $\dot{I}_{m0}$ 和 $\dot{I}_{n0}$, 故障点对地电流为 $\dot{I}_f$, 对地零序电流为 $\dot{I}_{f0}$, 过渡电阻为 R_f , 线路单位长度正序和零序阻抗分别为 $z_1 = r_1 + jx_1$ 和 $z_0 = r_0 + jx_0$, 故障点到保护安装处的电抗和阻抗分别为 X 和 Z 。

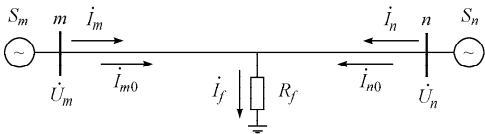


图 1 系统单相接地示意图
Fig. 1 Single-phase-to-ground fault model

m 侧的 A 相电压可以表示为:

$$\dot{U}_{mA} = (\dot{I}_{mA} + k_0 3\dot{I}_{m0})Z + \dot{I}_f R_f \tag{1}$$

式中: $k_0 = (z_0 - z_1)/(3z_1)$

对于单相接地, 有 $\dot{I}_f = 3\dot{I}_{f0}$ 。

对式(1)进行变换得到^[6]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mA} = jX[(\dot{I}_{mA} + k_x 3\dot{I}_{m0}) - jk_1(\dot{I}_{mA} + \\ k_r 3\dot{I}_{m0})] + \dot{I}_{m0} kR_f \end{aligned} \tag{2}$$

式中: $k_x = (x_0 - x_1)/(3x_1)$; $k_1 = r_1/x_1$; $k_r = (r_0 - r_1)/(3r_1)$; $k = 3\dot{I}_{f0}/\dot{I}_{m0}$ 。

假定 k 为实数, 可将式(2)化为标准形式:

收稿日期: 2004-12-23; 修回日期: 2005-03-02。
教育部博士学科点基金资助项目(20010698015)。

$$\dot{U}_{m\Lambda} = jXI + \dot{I}_{m0}R_f' \quad (3)$$

式中: $\dot{I} = \dot{I}_{m\Lambda} + k_x 3\dot{I}_{m0} - jk_1(\dot{I}_{m\Lambda} + k_r 3\dot{I}_{m0})$; $R_f' = kR_f$ 。

将复数 $\dot{U}_{m\Lambda}$, $\dot{I}$ 和 $\dot{I}_{m0}$ 化为相量形式 $\dot{U}_{m\Lambda} = U_c + jU_s$, $\dot{I} = I_c + jI_s$ 和 $\dot{I}_{m0} = I_{fc} + jI_{fs}$ 。得到: $U_c + jU_s = jX(I_c + jI_s) + R_f'(I_{fc} + jI_{fs})$ 。从而得到方程组:

$$\begin{cases} U_c = -I_s X + I_{fc} R_f' \\ U_s = I_c X + I_{fs} R_f' \end{cases}$$

解得:

$$\begin{cases} X = \frac{U_s I_{fc} - U_c I_{fs}}{I_s I_{fs} + I_c I_{fc}} \\ R_f' = \frac{U_s I_s + U_c I_c}{I_s I_{fs} + I_c I_{fc}} \end{cases} \quad (4)$$

上述推导中假定 k 为实数,即认为故障点两侧零序电流同相位,对测距结果存在一定的误差,下面给出该误差的消除方法。

令 $\theta = \arg(\dot{I}_{f0}/\dot{I}_{m0})$, 则式(3)化为:

$$\dot{U}_{m\Lambda} = jXI + \dot{I}_{m0}e^{j\theta}R_f'' \quad (5)$$

式中: R_f'' 为 kR_f 的幅值。

对于高压和超高压输电系统, θ 值一般很小,因此可以得到 $e^{j\theta} \approx 1 + j\theta$, 则式(5)又可近似表达为:

$$\dot{U}_{m\Lambda} = jXI + \dot{I}_{m0}(1 + j\theta)R_f''$$

将该复数方程化为方程组:

$$\begin{cases} U_c = -I_s X + (I_{fc} - \theta I_{fs})R_f'' \\ U_s = I_c X + (I_{fs} + \theta I_{fc})R_f'' \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_c , U_s , I_c , I_s , I_{fc} 和 I_{fs} 都是实时测量到的量,对方程组(6)而言,它们是已知的常数,实际只存在 3 个变量,即 X , R_f'' 和 θ 。

因此方程(6)两边对 θ 求导时,只有 X 和 R_f'' 是 θ 的函数。将式(6)两端对 θ 求导,求出 X 和 R_f'' 在 $\theta=0$ 处的导数,得到:

$$\begin{cases} I_{fs}R_f'' = -I_s \frac{dX}{d\theta} + I_{fc} \frac{dR_f''}{d\theta} - I_{fs}\theta \frac{dR_f''}{d\theta} \\ I_{fc}R_f'' = -I_c \frac{dX}{d\theta} - I_{fs} \frac{dR_f''}{d\theta} - I_{fc}\theta \frac{dR_f''}{d\theta} \end{cases} \quad (7)$$

由于 $\theta=0$, 式(7)化简为:

$$\begin{cases} I_{fs}R_f'' = -I_s \frac{dX}{d\theta} + I_{fc} \frac{dR_f''}{d\theta} \\ I_{fc}R_f'' = -I_c \frac{dX}{d\theta} - I_{fs} \frac{dR_f''}{d\theta} \end{cases} \quad (8)$$

解式(8)得到:

$$\begin{cases} \frac{dX}{d\theta} = -\frac{I_{fs}^2 + I_{fc}^2}{I_s I_{fs} + I_c I_{fc}} R_f'' \\ \frac{dR_f''}{d\theta} = \frac{I_c I_{fs} - I_s I_{fc}}{I_c I_{fc} + I_s I_{fs}} R_f'' \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 R_f'' 为式(4)中得到的结果 R_f' , $dX/d\theta$ 的大小反映了故障点两侧零序阻抗角差异引起测量电抗的综合误差。测量电抗误差为 $\Delta X \approx \Delta\theta dX/d\theta$, 前面推导中 θ 的初值为 0, 因此 $\Delta\theta = \theta$ 。下面给出弧度 θ 的估算方法。

2 弧度 θ 的估算

众所周知,故障后的暂态过程可能引起距离保护超越误动作,为防止这种现象,距离保护采用反时限特性。比如:在故障开始初期的 20 ms 内,开放距离整定值的 30%; 20 ms ~ 40 ms 之间,开放 70%; 40 ms 以后,开放整定值的 100%。本文在估算 θ 时,可以认为故障点位于保护线路末端,原因如下: ①本文提出的自适应接地距离继电器的主要作用是防止距离保护超越误动作,其适用时刻为保护范围开放到整定值的 100% 以后,故障点基本位于线路末端; ②距离继电器严格地讲为阻抗平面上的区域分类,其性能主要表现在临界点,对于区内,测量阻抗的误差大小并不影响继电器的正确动作。

图 1 对应的系统零序等效网络如图 2 所示,假定 R_{L0} , X_{L0} 为输电线路总的零序电阻和电抗; X_{Tm} 为 m 侧母线背后的零序电抗; X_{Tn} 为 n 侧母线背后的零序电抗。

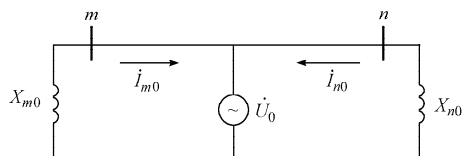


图 2 系统零序等效网络

Fig. 2 Zero sequence equivalent network of the system

由于认为故障点位于线路末端,结合图 2 得到:

$$\dot{I}_{m0}[jX_{Tm} + (R_{L0} + jX_{L0})] = \dot{I}_{n0}jX_{Tn}$$

从而 θ 可以表达为:

$$\begin{aligned} \theta &= \arg \frac{\dot{I}_{f0}}{\dot{I}_{m0}} = \arg \frac{\dot{I}_{m0} + \dot{I}_{n0}}{\dot{I}_{m0}} = \\ &= \arg \frac{R_{L0} + j(X_{L0} + X_{Tm} + X_{Tn})}{jX_{Tn}} = \\ &= \arg[R_{L0} + j(X_{L0} + X_{Tm} + X_{Tn})] - \frac{\pi}{2} \quad (10) \end{aligned}$$

式中: R_{L0} 和 X_{L0} 是已知量; X_{Tm} 可以由故障后保护安装处的零序电压和零序电流的比值实时计算得到; 而对侧母线背后的零序电抗 X_{Tn} 随着系统结构而变化,是未知量。

从式(10)可以看出,不论 X_{Tn} 如何变化, θ 都是一个负值。当 X_{Tn} 趋于 0 时, θ 达到最小值 $\theta_{\min}$, 即其绝对值达到最大值。 $\theta_{\min}$ 的大小为:

$$\theta_{\min} = \arg[R_{L0} + j(X_{L0} + X_{Tm})] - \frac{\pi}{2}$$

也就是说,将对端母线背后的零序阻抗认为是 0 来求 $\theta_{\min}$,下面用到补偿的部分都是用 $\theta_{\min}$ 来得到 ΔX 。由于 $\theta_{\min}$ 为负值,且 $\Delta X \approx \theta dX/d\theta$,因此当 $dX/d\theta > 0$ 时, $\Delta X < 0$,由式(4)计算出的电抗大于实际电抗,距离保护的保护区可能缩小,但不会引起超越误动作;当 $dX/d\theta < 0$ 时, $\Delta X > 0$,说明由式(4)计算出的电抗小于实际电抗,距离保护可能超越误动作。

自适应阻抗动作判据中用到的电抗(假定为 X')要根据 ΔX 的正负来进行补偿:如果 $\Delta X > 0$,则对式(4)求得的测量电抗 X 进行补偿,即 $X' = X + \Delta X$;如果 $\Delta X \leq 0$,不进行补偿,即 $X' = X$ 。

在 $\Delta X \leq 0$ 时,不对测量电抗 X 进行补偿的原因是:①不补偿只会缩小保护范围,不会引起距离超越误动作;②式(10)得到的是 θ 的最小值 $\theta_{\min}$,实际运行时不一定运行在该值,如果进行补偿的话,不易掌握补偿度,可能会因过补偿而引起距离超越。

3 与传统阻抗动作特性的比较

传统距离保护的接地阻抗继电器,以 A 相为例,其测量阻抗为:

$$Z_{JA} = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A + 3k_0 \dot{I}_0}$$

当经过渡电阻接地时,受两侧系统相角差的影响,过渡电阻上产生的附加阻抗可能呈现纯阻性、电阻电感性或电阻电容性,导致阻抗继电器的测量阻抗发生变化。相同的过渡电阻,负荷电流越大,测量阻抗的变化也越大。一般位于送电侧的阻抗继电器由于附加阻抗呈阻容性而易超越;受电侧阻抗继电器的附加阻抗呈阻感性而可能拒动^[5,7,8]。

不论是送电侧还是受电侧,传统距离保护都按照送电侧的测量阻抗特征来处理,即为防止超越,给测量电抗部分加上由两侧系统相角差引起测量电抗的最大误差值,对应为图 3 中下倾角为 α 的电抗线。

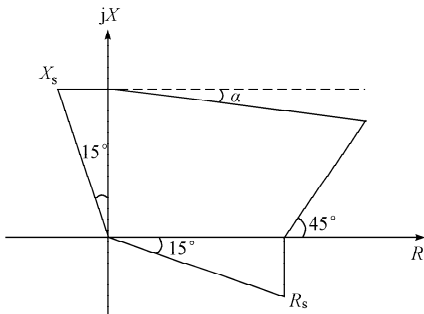


图 3 传统距离保护阻抗动作特性

Fig. 3 R-X characteristic of traditional protection

需要说明的是,下倾线是考虑到送电侧保护在过渡电阻上引起测量电抗的最大误差,实际系统运行时,保护可能在送电侧,也可能在受电侧,并且大部分情况不是运行在最大负荷状态,因此,用固定的下倾线来防止超越的措施是盲目、保守的方法。

图 4 为自适应距离保护阻抗动作特性。下面来观察自适应阻抗判据的动作性能,从送电侧和受电侧两方面,分别与传统阻抗动作特性进行比较。

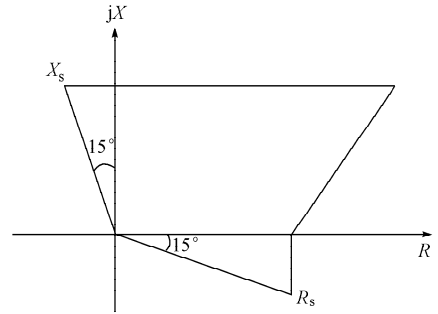


图 4 自适应距离保护阻抗动作特性

Fig. 4 R-X characteristic of adaptive protection

首先分析保护位于送电侧、保护范围末端发生接地故障的情况,参见图 5。

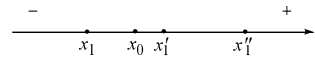


图 5 送电侧补偿前后的测量阻抗

Fig. 5 Measured impedance at sending end before and after compensating

假定真正的故障电抗为 x_0 ,受故障点两侧零序阻抗角差异的影响,补偿前的测量电抗为 x_1 (送电侧测量电抗较真实值小),用传统的下倾线的方法,相当于将测量电抗从 x_1 补偿到 x_1'' ,因为下倾线是考虑到最大负荷电流引起测量电抗部分的最大误差,在绝大部分情况下,系统并不是运行在最大负荷, x_1'' 比 x_0 要大很多;而自适应测量阻抗则是根据系统运行情况得到测量电抗误差的大小,将测量电抗从 x_1 补偿到 x_1' ,能有效防止超越;且其补偿度较前者小,能更准确反映故障点位置,在不超越的情况下扩大了保护范围。

保护位于受电侧的情况参见图 6,真正的故障电抗为 x_0 ,假定补偿前的测量电抗为 x_1 ,传统方法相当于将测量电抗从 x_1 补偿到 x_1' ,本文中的自适应阻抗算法对 x_1 不进行补偿,提高了区内故障动作灵敏度。

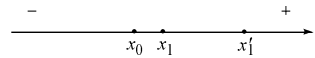


图 6 受电侧补偿前后的测量阻抗

Fig. 6 Measured impedance at receiving end before and after compensating

由基本原理和阻抗动作特性可以看出,与传统接地距离保护动作特性相比,自适应阻抗动作特性有以下优点:①由于按照系统实际运行情况进行了补偿,阻抗动作特性的上边界由盲目补偿得到的下倾线变成了自适应的纯电抗线,阻抗继电器的动作特性更加容易实现;②在相同的整定值时,自适应阻抗动作判据耐受过渡电阻的能力增强;③在相同的整定值时,自适应阻抗动作判据避越负荷阻抗的能力增强。

4 数字仿真和分析

系统模型如图 1 所示,其中 m, n 为线路保护装置安装处。 m 端和 n 端背后系统参数分别为: $Z_{m1} = (1.051\ 5 + j43.176)\ \Omega$, $Z_{m0} = j29.092\ 5\ \Omega$; $Z_{n1} = (1.057\ 7 + j44.92)\ \Omega$, $Z_{n0} = j37.47\ \Omega$ 。线路为 300 km, 500 kV 的超高压输电线路,采用集中耦合参数为: $r_0 = 0.114\ 8\ \Omega/\text{km}$, $\omega l_0 = 0.718\ 6\ \Omega/\text{km}$; $r_1 = 0.020\ 83\ \Omega/\text{km}$, $\omega l_1 = 0.282\ 1\ \Omega/\text{km}$ 。

衡量距离继电器的性能好坏主要体现在其防止超越的能力,而不是耐高阻能力,因此一般都是在金属性短路或经小过渡电阻情况下验证其动作特性。

考虑 m 侧的保护,在线路末端发生单相接地故障,用传统接地阻抗继电器和本文中自适应距离继电器的测量电抗进行比较。表 1、表 2 和表 3 分别是过渡电阻为 $0\ \Omega$, $10\ \Omega$ 和 $20\ \Omega$ 时两种算法得到的电抗值测量结果。

表 1 过渡电阻为 $0\ \Omega$ 时电抗值测量结果比较
Table 1 Comparison of the measured reactance by two ways with the fault resistance be $0\ \Omega$

相位差/(°)	绝对误差/ Ω			相对误差/(%)		
	传统算法	式(4)算法	自适应算法	传统算法	式(4)算法	自适应算法
0	-0.010	-0.110	-0.010	-0.010	-0.012	-0.010
-30	0.015	0.016	0.015	0.018	0.018	0.018
-45	-0.005	-0.002	-0.003	-0.006	-0.002	-0.003
30	0.009	0.010	0.011	0.011	0.012	0.013
45	0.026	0.028	0.029	0.031	0.033	0.034

表 2 过渡电阻为 $10\ \Omega$ 时电抗值测量结果比较
Table 2 Comparison of the measured reactance by two ways with the fault resistance be $10\ \Omega$

相位差/(°)	绝对误差/ Ω			相对误差/(%)		
	传统算法	式(4)算法	自适应算法	传统算法	式(4)算法	自适应算法
0	-1.057	-4.300	0.700	-1.249	-5.081	0.826
-30	13.208	-5.422	1.255	15.607	-6.407	1.483
-45	21.361	-6.608	1.872	25.241	-7.808	2.212
30	-11.029	-3.809	0.455	-13.032	-4.500	0.538
45	-14.501	-3.673	0.400	-17.135	-4.340	0.472

表 3 过渡电阻为 $20\ \Omega$ 时电抗值测量结果比较
Table 3 Comparison of the measured reactance by two ways with the fault resistance be $20\ \Omega$

相位差/(°)	绝对误差/ Ω			相对误差/(%)		
	传统算法	式(4)算法	自适应算法	传统算法	式(4)算法	自适应算法
0	-2.070	-8.562	1.440	-2.446	-10.117	1.702
-30	32.655	-12.527	2.964	38.585	-14.802	3.502
-45	58.153	-17.592	5.275	68.714	-20.787	6.233
30	-19.301	-6.945	0.843	-22.806	-8.207	0.996
45	-24.171	-6.488	0.657	-28.561	-7.667	0.777

由表 1~表 3 可以得出如下结论:

1)在金属性接地时,用传统算法、式(4)算法和本文中的阻抗自适应算法,都能得到比较准确的测量电抗。

2)传统阻抗算法在经过渡电阻接地时,送电端的阻抗继电器会超越,且两侧系统相角差越大越容易超越;受电端的阻抗继电器会拒动,同样,相角差越大,保护拒动的可能性就越大。

3)在经过过渡电阻接地时,不论是送电侧还是受电侧,用本文中的自适应距离继电器得到的测量电抗都比真实值略大一点,即不会出现超越现象。

4)在两侧电势相位差为 0 ,即没有负荷电流时,与其他两算法相比,式(4)算法存在较大的误差。有负荷电流时,式(4)算法的测量精度比传统算法高,而本文中的自适应算法的精度则又比式(4)算法提高很多。

5)自适应距离继电器的测量电抗能比较准确地反应故障点位置,受负荷的影响比较小,耐过渡电阻的能力比较强。

5 结语

本文提出了自适应接地距离继电器,在有效防止超越的情况下扩大了距离保护的范 围,大大提高了距离保护的性 能。EMTP 数字仿真表明,与传统的多边形阻抗继电器相比,该自适应距离继电器的性能明显优越,具有一定的实用价值。

参 考 文 献

[1] 王梅义. 电网继电保护应用. 北京:中国电力出版社,1999.
WANG Mei-yi. The Utility of Power System Network Protection. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

[2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术. 第 3 版. 北京:中国电力出版社,2005.
ZHU Sheng-shi. The Principle and Technique of High Voltage Network Protection. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[3] 李岩,詹奕,陈德树,等. 单相补偿接地距离继电器统一形式的研究. 电力系统自动化,2002,26(10):28—31.
LI Yan, ZHAN Yi, CHEN De-shu et al. The Uniform Formula of Earth Fault Distance Relay with Single-phase Compensation.

- Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 28—31.
- [4] 毛鹏, 杨立璠, 杜肖功. 基于零序分量的距离继电器. 电力系统自动化, 2003, 24(10): 60—66.
- MGO Peng, YANG Li-fan, DU Xiao-gong. Study of the Distance Relay Based on Zero Sequence Components. Automation of Electric Power Systems, 2003, 24(10): 60—66.
- [5] 许正亚. 输电线路新型距离保护. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- XU Zheng-ya. New Type Distance Protection of Power Line. Beijing: China Hydraulic and Hydroelectricity Press, 2002.
- [6] 张永浩, 禹成七. 基于故障附加状态的测距式距离继电器. 华北电力大学学报, 1998, 25(2): 31—35.
- ZHANG Yong-hao, YU Cheng-qi. Measuring Distance Relay Based on Additional Fault State. Journal of North China Electric Power University, 1998, 25(2): 31—35.
- [7] 林湘宁, 刘沛, 井嵘. 基于 DSP 实现多边形阻抗特性最佳判据的选择. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 62—68.
- LIN Xiang-ning, LIU Pei, JING Rong. Optimal Implementation

of Polygon Impedance Characteristics Using DSP Technique. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(14): 62—68.

- [8] 陈朝晖, 黄少锋, 陶惠良, 等. 新型阻抗选相方法. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 51—56.
CHEN Zhao-hui, HUANG Shao-feng, TAO Huiliang et al. Research on the New Phase Selector Based on Impedance Measurement. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 51—56.

索南加乐(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护的教学和研究工作。E-mail: suonan@263.net

许庆强(1976—),男,博士,研究方向为电力系统高压输电线路继电保护。E-mail: q q xu@sohu.com

宋国兵(1972—),男,博士,研究方向为输电线路故障测距。

Adaptive Earth Fault Distance Relay

SUONAN *Jia-le*¹, XU *Qing-qiang*^{1,2}, SONG *Guo-bing*¹, ZHAO *Wen-tao*³, LI *Rui-sheng*⁴, ZHANG *Ke-yuan*⁴

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 210036, China)

(3. Zhongxing Telecom Ltd, Ürumqi 830002, China)

(4. XJ Electric Protection and Automation Department, Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on case of single-phase-to-ground fault, this paper derives the combined error of measured reactance in proportion to the distance to the fault, and provides a new adaptive impedance criterion through error correction. A new reactance line in the polygon impedance characteristic of the proposed criterion is suggested to replace the declinational reactance line. This does not need to reduce the protection zone any more as conventional way to prevent the relay from overreaching. The protection zone of the proposed distance relay is greatly increased without any danger of mal-operation. The performance of the relay is extensively tested by using EMTP. The simulation results show that the relay can be used to avoid transient overreaching effectively and has high sensitivity for the internal fault.

This work is supported by Doctoral Fund of the State Education Ministry of China (No. 20010698015).

Key words: power systems; protective relaying; distance relay; fault resistance