

消除漏电保护死区的新技术及其试验方法

李奎, 陆俭国, 武一

(河北工业大学, 天津 300130)

摘要: 为消除漏电保护死区, 提出基于剩余电流变化量法的漏电保护新技术。该技术是通过采用连续移动变化量法和窗口移动变化量法, 实现突变漏电电流、持续缓变漏电电流的识别与检测。根据剩余电流、突变漏电电流、持续缓变漏电电流进行漏电综合保护, 可以减少漏电保护拒动作。为检验新的漏电保护技术的可靠性和有效性, 提出了相应的试验方法。

关键词: 剩余电流变化量法; 突变漏电电流; 持续缓变漏电电流; 动作死区; 试验方法

Technology of eliminating dead zone of leakage current protection and its examining method

LI Kui, LU Jian-guo, WU Yi

(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A new technology is put forward based on residual current variation and the dead zone of leakage current protection is eliminated. The abrupt change and the slow change of leakage current are identified and detected by the continuous moving variation method and the window moving variation method. The examining method is put forward to verify the reliability and validity of the new technology.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50477017).

Key words: residual current variation method; abrupt change leakage current; continuous slow change leakage current; operating dead zone; examining method

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)20-0028-05

0 引言

漏电保护是低压用电保护中的一项重要保护技术, 广泛用于防止漏电火灾和防止人身触电伤亡事故的发生。特别是随着电力的发展, 漏电保护应用的范围越来越广, 要求也越来越高。根据电网中性点接地方式, 电网可分为 IT、TT、TN 系统。不同接地方式, 漏电保护方式也不同, 在 IT 系统中主要采用直流绝缘电阻监测技术进行漏电保护, 但这种方法不适合 TN 系统。低压配电系统以 TN 系统为主, 在 TN 系统中一般采用剩余电流技术进行漏电保护。为适应不同低压用电场合的漏电保护, 出现了不同保护类别的漏电保护形式, 主要有 AC 型和 A 型, 随着电子设备的增多, 又出现了 B 型的漏电保护器。

随着科学新技术的发展, 人们提出了很多漏电保护的新原理和新方法, 试图解决剩余电流保护技术的动作死区问题, 促进漏电保护技术的发展^[1~4]。例如: 有人提出根据触电电流波形对人身进行保护^[1], 但由于触电电流波形因人而异, 且漏电电流波形的暂态过程可能与触电电流波形相似, 因此触电电流波形与一般漏电电流的区分与识别存在问题, 因而采用这种方法的保护器的误动作和拒动作较多。还有人采用鉴相鉴幅漏电保护技术对人身进行保护^[4], 采用这种方法其保护正确率得到提高, 并在农网中得到应用, 但保护器仍然存在误动作, 且无法从根本上完全克服动作死区, 因此漏电保护死区问题一直没有很好的解决方法。能够克服漏电保护死区或者减少漏电保护死区而又不会产生误动作和新的拒动作, 一直是人们研究的重要内容。

本文在分析 AC 型剩余电流保护技术基础上, 提出了基于剩余电流变化量法的漏电保护理论, 根据剩余电流变化量的特征识别漏电电流。变化量法

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50477017)、新世纪优秀人才支持计划 (NCET-05-0259)、天津市科技支撑重点项目 (07ZCKFGX00600)

在电力系统的继电保护中得到广泛地应用^[5,6], 而在漏电保护领域的研究还不多。本文研究突变漏电和缓变漏电特征的数学表示方法, 建立剩余电流、突变漏电、缓变漏电的保护体系, 提高漏电保护的有效性和可靠性, 克服漏电保护技术中的动作死区。

1 剩余电流保护技术的问题

剩余电流保护技术是采用剩余电流互感器对剩余电流进行检测的。当没有剩余电流时, 从电源流出的电流与流入的电流相等, 在互感器中的电流向量和为零; 当有剩余电流时, 流出电流与流入电流不相等, 剩余电流互感器中的电流向量和为流出电流与流入电流的差, 在二次侧有感应信号产生。当剩余电流值达到动作值时, 互感器二次侧感应信号经放大后推动脱扣器使开关动作, 实现漏电保护。由于剩余电流互感器检测的是剩余电流, 在已存在剩余电流的情况下, 就存在漏电动作死区。在电网正常运行时有漏电流 I_1 , 如果在某时刻电网中设备产生故障漏电 (或有人触电), 其电流为 I_2 , 这时的剩余电流为 I , 见图 1。

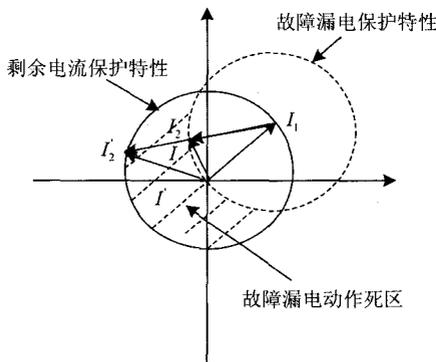


图 1 漏电保护动作死区产生示意图

Fig.1 Schematic diagram of operating dead zone of RCD

在图 1 中, 剩余电流保护特性动作曲线为一圆, 圆内为不动作区, 圆外为动作区。当存在剩余电流 I_1 (接近但小于剩余电流动作值) 时, 产生故障漏电流 I_2 (故障漏电流大于动作值), 此时应当进行故障漏电保护, 但由于通过剩余电流互感器只能检测出剩余电流 I , 此时其幅值小于动作值, 因此保护器不会动作, 也称拒动作。只有当故障电流达到 I_2 (远大于动作值) 时, 此时剩余电流互感器检测出的剩余电流 I 大于动作值时, 保护器才会动作。因此图 1 中虚线阴影部分为在有剩余电流 I_1 情况下的故障漏电保护动作死区。

由图 1 可知, 剩余电流 I_1 的位置不同, 故障漏电保护区域也不同, 但保护特性是以剩余电流 I_1 为

圆心的一个圆。当剩余电流 I_1 为零时, 故障漏电保护特性与剩余电流保护特性重合, 不存在故障漏电动作死区; 当剩余电流 I_1 接近剩余动作电流时, 故障漏电动作死区最大, 且当剩余电流 I_1 与故障漏电流 I_2 相位相反时, 引起动作时的电流最大。同时, 我们从图中可以看出, 故障漏电流 I_2 为剩余电流 I_1 变化到 I 的变化量, 简称剩余电流变化量, 是剩余电流 I_1 变化到 I 的变化量。

2 剩余电流变化量及故障漏电保护方法

2.1 剩余电流变化量的计算

剩余电流可以直接检测, 而漏电流不能直接检测, 需要根据剩余电流的变化量进行计算。以电源的周波为检测单位, 检测到的剩余电流是: $I_0, I_1, I_2, \dots, I_i, \dots$ 。任意 i 时刻的剩余电流变化量 (也就是新产生的故障漏电) 可以用式 (1) 表示。

$$I_{\Delta i} = I_i - I_m \quad (1)$$

式中: $I_{\Delta i}$ 是 i 时刻剩余电流变化量, I_i 是 i 时刻剩余电流, I_m 为 i 时刻前 m 时刻的剩余电流。

在检测剩余电流相角时, 需要选择一个参考相位, 一般选择 A 相电压的相位为参考相位, 对剩余电流幅值和相角进行检测, 如图 2 所示。可以检测出剩余电流的幅值 I , 同时也可以检测出相角 θ 。剩余电流是由各相漏电流叠加得到的, 当 C 相剩余电流 I_c 为零时, 根据 I 和 θ , 可以得到在 A 相和 B 相上的等效剩余电流 I_a 和 I_b , 从而实现了各相等效剩余电流的检测。当三相均有漏电时, 检测出的漏电流是抵消最小相的漏电流后, 其余两相不平衡的等效剩余电流, 即为 A 相和 B 相的漏电流与 C 相漏电流的向量差。

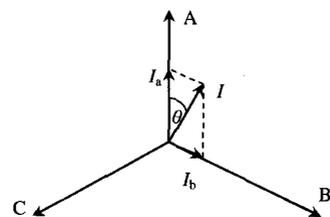


图 2 漏电电流的计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of leakage current calculation method

当检测到的剩余电流位于 A 相与 B 相之间, C 相的剩余电流最小, 抵消后为 0, 可以通过式 (2) 对各相等效剩余电流进行计算。

$$\begin{cases} I_a = I \left(\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) \\ I_b = I \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}/2} \\ I_c = 0 \end{cases} \quad (0^\circ \leq \theta < 120^\circ) \quad (2)$$

当检测到的剩余电流位于 B 相与 C 相之间时，抵消后 I_a 为 0，当检测到的剩余电流位于 C 相与 A 相之间时，抵消后 I_b 为 0，计算公式与式(2)相似。

检测到 i 时刻和 m 时刻的剩余电流，由式 (2) 计算出各相等效剩余电流，将当前时刻的各相等效剩余电流和此时刻前的各相等效剩余电流相减，得到各相等效剩余电流的变化量，并能计算出此时刻新产生的故障漏电电流，即剩余电流变化量。如果三相剩余电流同时变化，即 A 相变化量为 $I_{\Delta a}$ ，B 相变化量为 $I_{\Delta b}$ ，C 相变化量为 $I_{\Delta c}$ ，当 $I_{\Delta c}$ 为最小时，则此时刻的剩余电流变化量 $I_{\Delta r}$ 可以通过式 (3) 计算，其幅角 θ_{Δ} 可以通过式 (4) 计算。

$$I_{\Delta r} = \sqrt{(I_{\Delta a} - I_{\Delta c})^2 + (I_{\Delta b} - I_{\Delta c})^2 - (I_{\Delta a} - I_{\Delta c})(I_{\Delta b} - I_{\Delta c})} \quad (3)$$

$$\theta_{\Delta} = \arctg \frac{\sqrt{3}(I_{\Delta b} - I_{\Delta c})/2}{(I_{\Delta a} - I_{\Delta c}) - (I_{\Delta b} - I_{\Delta c})/2} \quad (0^\circ \leq \theta_{\Delta} \leq 120^\circ) \quad (4)$$

当 $I_{\Delta b}$ 或 $I_{\Delta a}$ 为最小时，也可以计算出此时刻的剩余电流变化量，与式(3)和式(4)相似。从图 1 可以看出， I 是当前时刻的剩余电流， I_1 是此时刻前的剩余电流的电流，这两个电流是可以检测出来的，而 I_2 是此时刻的剩余电流变化量，也就是新产生的漏电电流，可以通过式 (3) 和式 (4) 计算。

当电网及用电设备的对地阻抗为阻性时，则式 (2) 计算的剩余电流为各相的剩余电流。当对地阻抗为非阻性时，式 (2) 计算的剩余电流不代表各相的剩余电流，是在各相上的等效剩余电流，从图 2 可知，剩余电流幅值 I 和幅角 θ 一定时，在各相上的等效剩余电流是唯一的。同时由式 (3) 和式 (4) 计算的是剩余电流变化量，计算结果与原来剩余电流无关，就是新产生的漏电电流。

2.2 突变故障漏电电流的检测

在电网中，故障漏电的产生一般为两种情况，一种是突变漏电，即突然发生故障漏电，引起剩余电流的突然改变，另外一种为缓变漏电，即故障漏电是缓慢变化的，引起的剩余电流变化也比较缓慢。基于这两种情况，可以采取不同的方法进行检测与保护。

为了检测突然发生的故障漏电，采用连续移动变化量法进行检测。连续移动变化量法是以一个周

波为检测单位，每个时刻的剩余电流与其前面固定时间间隔的剩余电流进行比较，计算出该时刻的突变漏电电流。一般情况下，突变漏电电流在 2 到 5 个周波内就会达到稳定状态，在这段时间后，突变漏电电流基本稳定。当选择检测间隔时间为 3 个周波时，式 (1) 可以改写为：

$$I_{\Delta i} = I_i - I_{i-3} \quad (5)$$

因此，在检测与计算时，只需要存储 i 时刻前

3 个剩余电流，即 I_{i-3} 、 I_{i-2} 、 I_{i-1} ，而不需要将所有历史数据记忆下来，减少了存储容量。

2.3 持续缓变故障漏电电流的检测

故障漏电变化缓慢时，在短时间内剩余电流变化不能反映故障漏电的本质。需要对剩余电流的变化进行持续检测。根据 i 时刻的剩余电流与 i 时刻前任意时刻的剩余电流，计算剩余电流变化量，实现缓慢变化故障漏电的检测。由于实际计算速度和容量的限制，无法将 i 时刻前的剩余电流全部记录下来。同时，随着时间的延长， i 时刻的剩余电流与 i 时刻前较长时刻的剩余电流相关性会减弱。因此，对于持续缓变的漏电电流采用窗口移动变化量法进行检测。

窗口移动变化量法是将式 (1) 中的 m 设定为时间窗口的起始时间，在整个窗口时间内 m 值不变，计算出的变化量为持续剩余电流变化量。当 i 时刻与 m 时刻的间隔时间达到窗口时间时，用当前 i 时刻的剩余电流替代 m 时刻的剩余电流，形成一个新的时间窗口，因此一个窗口只需存储一个数据，减少了数据存储量。持续缓变漏电的变化率不同，应采用不同的 m 进行检测。为适应不同的持续缓变漏电的变化率，需要同时采用多个窗口时间进行检测。一般情况下，窗口时间的选择值为 1 s、10 s、30 s、60 s、120 s、180 s、300 s。

根据剩余电流变化量法实现突变漏电和缓变漏电的检测，并且检测的值与已存在的剩余电流无关。根据剩余电流值、突变漏电电流值和缓变漏电电流值进行漏电保护，既满足了剩余电流保护的動作条件，又正确检测出故障漏电，实现了漏电保护的无死区。

3 故障漏电保护特性的试验方法

如果检测出的突变漏电电流和缓变漏电电流与线路中已存在的剩余电流无关，就能实现故障漏电保护的動作无死区。動作无死区的漏电保护技术应符合目前国家标准所有的试验规定，同时还要对其进行补充试验，验证故障漏电保护的動作无死区。下面针对故障漏电保护特性的补充试验进行分析。

3.1 漏电动作电流的确定方法

(1) 突变漏电动作电流

施加的突变漏电电流与已存在的剩余电流的向量和大于剩余动作电流时,动作特性应符合当前国家标准的规定;当其向量和小于剩余动作电流时,按下面两种方法进行试验,并从中选最大的值规定为突变漏电动作电流。

1) 在剩余电流为 0 时,突然施加任意相角下的漏电电流,引起保护装置动作的最大值为突变漏电动作电流值。规定 A 相电压的相角为 0° ,突变漏电电流相角的优选值为: 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° 。

2) 在额定剩余不动作电流 $I_{\Delta no}$ 下,施加与额定剩余不动作电流相角差为 180° ,引起保护装置动作的漏电电流值为突变漏电动作电流。规定 A 相电压的相角为 0° 时,额定剩余不动作电流的相角为 30° 。施加的突变漏电电流幅值与额定剩余动作电流 $I_{\Delta n}$ 有关,优选值为: $0.4I_{\Delta n}$ 、 $0.45I_{\Delta n}$ 、 $0.5I_{\Delta n}$ 、 $0.55I_{\Delta n}$ 、 $0.6I_{\Delta n}$ 、 $0.65I_{\Delta n}$ 、 $0.7I_{\Delta n}$ 、 $0.75I_{\Delta n}$ 、 $0.8I_{\Delta n}$ 、 $0.85I_{\Delta n}$ 、 $0.9I_{\Delta n}$ 、 $0.95I_{\Delta n}$ 、 $I_{\Delta n}$ 、 $1.1I_{\Delta n}$ 、 $1.15I_{\Delta n}$ 、 $1.2I_{\Delta n}$ 、 $1.25I_{\Delta n}$ 、 $1.3I_{\Delta n}$ 。

试验时,允许任选某一优选值进行试验,直到与之相邻较小的值出现不动作的情况为止。突变漏电动作电流小于额定突变漏电动作电流,而大于额定突变漏电不动作电流。

(2) 持续缓变漏电动作电流

施加的持续缓变漏电电流与已存在的剩余电流的向量和大于剩余动作电流时,动作特性应符合目前国家标准的规定;当其向量和小于剩余动作电流时,按下面两种方法进行试验,并从中选最大的值规定为持续缓变漏电动作电流。

1) 在剩余电流为 0 时,以 30 s 上升至额定持续缓变漏电动作电流的速度施加任意相角下的漏电电流,引起保护装置动作的最大值为持续缓变漏电动作电流值。规定 A 相电压的相角为 0° 时,持续缓变漏电电流相角的优选值为: 30° 、 90° 、 150° 、 210° 、 270° 、 330° 。

2) 在额定剩余不动作电流(相角为 0°)下,以 30 s 上升至额定持续缓变漏电动作电流的速度施加相角差为 180° 的漏电电流,引起保护装置动作的漏电电流值为持续缓变漏电动作电流。

持续缓变漏电动作电流应小于额定持续缓变漏电动作电流,但大于额定持续缓变漏电不动作电流。

3.2 在额定漏电动作电流及额定漏电不动作电流下保护特性的试验

按现行的标准进行保护特性试验时,试验回路中没有预先施加剩余电流。为验证故障漏电保护无死区,在试验回路中,应预先施加任意剩余电流,

该电流应不超过试品的剩余动作电流。预先施加的剩余电流优选值为 0 、 $0.1I_{\Delta n}$ 、 $0.2I_{\Delta n}$ 、 $0.3I_{\Delta n}$ 、 $0.4I_{\Delta n}$ 、 $0.5I_{\Delta n}$ 、 $0.6I_{\Delta n}$ 、 $0.7I_{\Delta n}$,相角优选值从 0° 开始,间隔 30° ,直到 330° 。

额定突变漏电动作电流下的保护特性的试验是:在预先施加剩余电流条件下,施加额定突变漏电不动作电流,且与预先施加剩余电流的向量和不超过试品的剩余动作电流,试品应不动作;施加额定突变漏电动作电流,无论其与预先施加剩余电流的向量和是否大于剩余动作电流,试品应动作。突变漏电电流与已存在的剩余电流的相角差优选值从 0° 开始,每隔 15° 进行一次试验,直到 345° 。

在额定剩余不动作电流下,突然施加相角差为 180° 的额定突变漏电动作电流,测量漏电保护装置动作的时间。该时间规定为额定突变漏电动作电流下的动作时间,其值应满足规定的要求。

额定持续缓变漏电动作电流下的动作特性的试验是:在预先施加剩余电流条件下,以规定的时间上升至额定持续缓变漏电动作电流的速度施加持续缓变漏电电流,当上升至额定持续缓变漏电不动作电流,试品应不动作;当上升至额定持续缓变漏电动作电流,试品应动作。持续缓变漏电电流与已存在的剩余电流的相角差优选值从 0° 开始,每隔 15° 进行一次试验,直到 345° 。试验时,规定的时间优选值为: 5 s、10 s、30 s、60 s、120 s、180 s、300 s。

4 结束语

本文对漏电保护技术进行了分析,有效地克服漏电保护动作死区。主要取得以下结论:

(1) 提出采用剩余电流变化量法进行故障漏电保护新方法,并推导出剩余电流变化量的计算公式。

(2) 提出突变漏电和缓变漏电的检测方法,采用连续移动变化量法实现突变漏电电流的检测,采用窗口移动变化量法实现持续缓变漏电电流的检测。

(3) 规定了突变漏电动作电流和缓变漏电动作电流的测量方法,规定试验电流与已存在剩余电流的相角差为 180° 时的测量结果为动作电流值。

(4) 规定了额定突变漏电动作电流和额定缓变漏电动作电流下的保护特性的试验方法,作为现行标准的补充,可以有效地检验突变漏电和缓变漏电保护是否与已存在的剩余电流无关。

参考文献

- [1] 滕松林,杨校生.触电漏电保护器及其应用[M].北京:机械工业出版社,1994.
TENG Song-lin, YANG Xiao-sheng. Leakage Current Operated Protective Device and Its Application[M].

Beijing: China Machine Press, 1994.

[2] Kidd A L, Scholes G H. Successful Selection and Operation of Overcurrent and Residual Current Protective Measures[A]. In: Proceedings of the International Conference on Installation Engineering Designing and Maintaining Successful Systems[C]. 1998.

[3] Nomura K, Hisalsune F, Yamada T. The Present State and Future Trends in Circuit Breakers and Earth Leakage Circuit Breaker[J]. Mitsubishi Denki Giho(Japan), 1995, 69 (4).

[4] 李奎, 陆俭国, 瞿建喜. 新型鉴相鉴幅漏电流继电器的研究[J]. 低压电器, 2001, (4):12-14.
LI Kui, LU Jian-guo, QU Jian-xi. Study on Intelligent Protective Relay with Discriminating Phase and Amplitude of Residual Current[J]. Low Voltage Apparatus, 2001, (4):12-14.

[5] 戴学安. 继电保护原理的重大突破—综论工频变化量继电器[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(1): 41-47.

DAI Xue-an. A Brief Discussion on the Protection Relay Based on Power Frequency Variation Principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(1):41-47.

[6] 苏斌, 贺家李, 董新洲, 等. 快速工频量高频方向保护的新方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(6):37-40.
SU Bin, HE Jia-li, DONG Xin-zhou, et al. New Scheme of High Speed Power Line Carrier Protection based on Power Frequency Voltages and Currents[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2000, 12(6):37-40.

收稿日期: 2008-01-03; 修回日期: 2008-03-29
作者简介:

李奎(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电器可靠性理论与试验技术、继电保护智能化理论与技术。 E-mail:likui@hebut.edu.cn

(上接第 19 页 continued from page 19)

[6] 夏岩, 刘明波, 邱朝明. 带有复杂分支子馈线的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2002, 25(4) : 40-44.
XIA Yan , LIU Ming-bo, QIU Zhao-ming. Reliability Assessment of Distribution Networks with Complex Subfeeders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 25(4): 40-44.

[7] 谢开贵, 周平, 周家启. 基于故障扩散的复杂中压配电系统可靠性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4) : 45-48.
XIE Kai-gui, ZHOU Ping, ZHOU Jia-qi. Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Radial Distribution Network Based on Fault-Spreading-Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4):45-48.

[8] 李志民, 李卫星, 刘迎春. 辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 25(20)

LI Zhi-min, LI Wei-xing, LIU Ying-chun. Fault-Traversal Algorithm of Radial-Distribution-System-Reliability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 25(20).

[9] Billinton R, LI W Y. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods[M]. New York and London: Plenum Press, 1994. 209-254.

收稿日期: 2008-01-31; 修回日期: 2008-03-23
作者简介:

方水平(1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配网规划、电力系统稳定与控制等; E-mail:flevel@tom.com
管霖(1970-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为小波理论及其在电力系统中的应用、人工智能、电力系统稳定与控制。

(上接第 27 页 continued from page 27)

值负误差最大的情况, 或者两相相位误差同时达到最大的情况, 但这现象仍应当考虑。显然, 对于短线路, 相间距离 I 段需要考虑的条件比接地距离 I 段更加苛刻一些。

接地距离超越主要是由于幅值误差引起, 而相间距离超越主要是由于相位误差引起, 即引起它们误差的原因不同, 因此, 在校验保护特性时, 接地距离与相间距离均需要校验。

综上所述, 在确定线路具体多长才能投入距离保护的问题上, 不应当仅仅局限于线路的长度, 而要综合考虑系统的大小、即系统阻抗的大小, 然后根据公式(6)、公式(9)推导出适合的线路长度。

文中没有考虑经过渡电阻故障时, 因对侧电源助增所导致的超越问题, 这是通过零序电抗器来避

免超越, 因此, 不在文中考虑范围。

对于工频变化量距离继电器, 在定值 $<1/I_n$ 应退出, 此处不再详细推导。

参考文献

[1] 何奔腾, 周春霞. 短线路两相短路时距离保护误差分析[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(11).
HE Ben-teng, ZHOU Chun-xia. Error Analysis of Distance Relay Protection in Phase-to-Phase Short Circuit Fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11).

收稿日期: 2008-06-02; 修回日期: 2008-07-26
作者简介:

刘玮(1973-), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护管理工作。 E-mail:liuweihyp@163.com