

阶梯式不接地电网单相接地故障分析及保护实现

丁网林,温传新,骆 健

(国网电力科学研究院南京中德保护控制系统有限公司,江苏 南京 210003)

摘 要:分析了阶梯式供电中性点不接地系统中的零序电流特性,详细阐述了在级联线路发生区内外单相接地故障时流过线路两端的零序电流,指出传统的接地保护原理的不足。提出了基于线路两端零序差流与对端零序电流方向判别的接地保护原理。通过试验和现场运行情况表明了该保护原理的可行性。

关键词:不接地电网;单相接地保护;多级供电;零序差流

中图分类号:TM711

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2010)04-0012-04

为了保障供电的可靠性,35 kV 以下的供配电系统多为中性点不接地或经过消弧线圈接地的系统。大型工业用户的配电系统,同一电压等级的配电系统中阶梯式多级供电情况越来越多^[1]。这一方面是因为大型工业用户负荷比较分散决定的,另一方面阶梯式供电方式也可以提高工业用户的建设投资,保障供电的可靠性。但是阶梯式多级供电对继电保护的选择性也提出了更高的要求,对于相间过流保护通过带时限的配合可以很好地解决问题,但是对于线路的单相接地,传统的小电流接地选线,在本系统中就失去了选择性,有时还会造成上级保护的误判和误动。上级进线的误动,造成相应的母线失电,给用户造成巨大的损失。根据上述的分析可知,现有的小电流接地选线保护,对于阶梯式供电中性点不接地系统失去了选择性,实际应用中也经常出现误动的情况。首先分析了阶梯式不接地电网中发生单相接地故障时的电气量特殊,然后针对现有小电流接地选线用于阶梯式供电系统存在不足的现状,提出了一种可靠性高、选择性强的新方法,该方法很好地解决了用户现场的问题。

1 系统故障特征分析

1.1 阶梯式供电中性点不接地系统模型

如图 1 所示,为阶梯式 n 级供电系统的物理模型,规定进线侧电流正方向为线路流向母线,而出线侧电流正方向为母线流向线路。设第 n 段母线上所带出线条数为 m ,每条线路对地电容为 C_i^n ($i=1,2,\dots,m$),第 $n-1$ 段母线上出线条数为 j ,每条线路对地电容为 C_i^{n-1} ($i=1,2,\dots,j$),第 $n-2$ 段母线上出线条数为 w ,每条线路对地电容为 C_i^{n-2} ($i=1,2,\dots,w$)。不考虑相间电容,设系统电动势为 E ,不考虑级联系

统的电压压降。

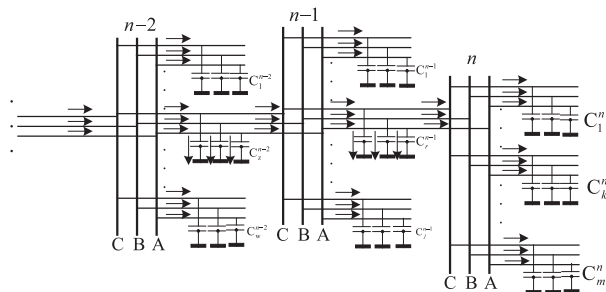


图 1 阶梯式 n 级供电系统物理模型

n 段母线上每条出线对地电容电流为:

$$I_{ni} = \dot{E} j\omega C_i^n \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

n 段母线的进线对地电容电流为:

$$I_{n\text{进}} = \dot{E} j\omega \sum_{i=1}^m C_i^n \quad (2)$$

同理, $n-1$ 段母线的进线电容电流为:

$$I_{n-1\text{进}} = \dot{E} j\omega \sum_{i=1}^m C_i^n + \dot{E} j\omega \sum_{i=1}^j C_i^{n-1} \quad (3)$$

1.2 单相接地物理量分析^[2,3]

1.2.1 P1 点发生 A 相接地时的零序电气量特征

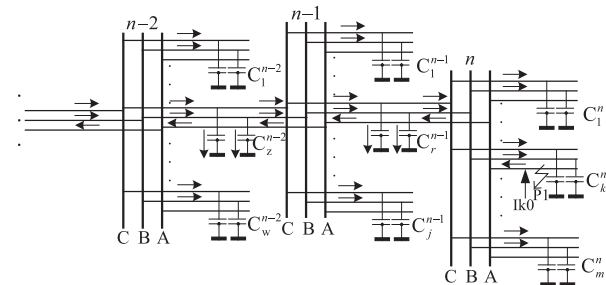


图 2 P1 点发生 A 相接地故障物理模型图

如图 2 所示,设第 n 段母线的第 k 条出线的 P1 点发生 A 相接地故障,则故障点处各相电压和零序电压为:

$$\dot{U}_{KA} = 0 \quad (4)$$

$$\dot{U}_{KB} = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{-j150} \quad (5)$$

$$\dot{U}_{KC} = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{j150} \quad (6)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} (\dot{U}_{KA} + \dot{U}_{KB} + \dot{U}_{KC}) = -\dot{E}_A \quad (7)$$

故障线路各相对地电容电流为:

$$\dot{I}_{KA} = -\dot{I}_{K0} \quad (8)$$

$$\dot{I}_{KB} = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{-j150} \times j\omega C_k^n \quad (9)$$

$$\dot{I}_{KC} = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{j150} \times j\omega C_k^n \quad (10)$$

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_{KA} + \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = 3\dot{U}_0 j\omega C_k^n - \dot{I}_{k0} \quad (11)$$

则非故障线路侧各相对地电容电流和零序电流为($i \neq k$):

$$\dot{I}_{iA} = 0 \quad (12)$$

$$\dot{I}_{iB} = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{-j150} \times j\omega C_i^n \quad (13)$$

$$\dot{I}_{iC} = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{j150} \times j\omega C_i^n \quad (14)$$

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_{iB} + \dot{I}_{iC} = 3\dot{U}_0 j\omega C_i^n \quad (15)$$

第 n 段母线进线各相对地电容电流和零序电流为:

$$\dot{I}_{nAin} = -\dot{I}_{k0} \quad (16)$$

$$\dot{I}_{nBin} = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{-j150} \times \sum_{i=1}^m C_i^n \quad (17)$$

$$\dot{I}_{nCin} = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{j150} \times \sum_{i=1}^m C_i^n \quad (18)$$

$$3\dot{I}_{n0in} = \dot{I}_{nAin} + \dot{I}_{nBin} + \dot{I}_{nCin} = 3\dot{U}_0 j\omega \sum_{i=1}^m C_i^n - \dot{I}_{k0}^* \quad (19)$$

设第 n 段母线与第 $n-1$ 段母线之间的级联线为第 $n-1$ 段母线的第 r 条出线, 则该条出线的对地电容电流和零序电流为:

$$\dot{I}_{rA} = -\dot{I}_{k0} \quad (20)$$

$$\dot{I}_{rB} = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{-j150} \times j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + C_r^{n-1} \right) \quad (21)$$

$$\dot{I}_{rC} = \sqrt{3} \dot{E}_A e^{j150} \times j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + C_r^{n-1} \right) \quad (22)$$

$$3\dot{I}_{r0} = \dot{I}_{rA} + \dot{I}_{rB} + \dot{I}_{rC} = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + C_r^{n-1} \right) - \dot{I}_{k0} \quad (23)$$

同理可得, 第 $n-1$ 段母线进线零序电流为:

$$3\dot{I}_{(n-1)0in} = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + \sum_{i=1}^j C_r^{n-1} \right) - \dot{I}_{k0} \quad (24)$$

设第 $n-1$ 段母线与第 $n-2$ 段母线之间的级联线为第 $n-2$ 段母线的第 z 条出线, 则该条出线的零序

电流为:

$$3\dot{I}_{z0} = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + \sum_{i=1}^j C_r^{n-1} + C_z^{n-2} \right) - \dot{I}_{k0} \quad (25)$$

由式(19)可知, 在第 n 段母线出线发生故障时, 第 n 段母线进线零序电流为 n 段母线上每条出线对地电容电流之和与系统接地电流之差, 考虑系统接地电流肯定大于 n 段母线上每条出线对地电容电流之和, 所以第 n 段母线进线零序电流方向为母线流向线路。由式(23)可知对于 $n-1$ 段母线出线而言其零序电流方向为线路流向母线。同理由式(24)和式(25), $n-1$ 段母线进线零序电流方向为母线流向线路。 $n-2$ 段母线出线零序电流方向为线路流向母线。

由式(11)可知故障线路零序电流方向为线路流向母线。可见这种情况下, 级联线路零序电流方向和故障线路零序电流方向相同。

1.2.2 P2 点发生 A 相接地时的零序电气量特征

如图 3 所示, 当在 n 段母线与 $n-1$ 段母线之间的级联线 P2 点发生 A 相接地故障时, 同上分析过程可得各段母线的进线和出线的零序电流如下。

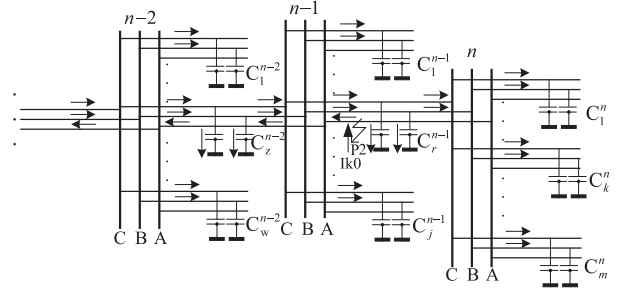


图 3 P2 点发生 A 相接地故障物理模型图

第 n 段母线进线零序电流为:

$$3\dot{I}_{n0in}^2 = 3\dot{U}_0 j\omega \sum_{i=1}^m C_i^n \quad (26)$$

第 $n-1$ 段母线出线(第 r 条出线)零序电流为:

$$3\dot{I}_{r0}^2 = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + C_r^{n-1} \right) - \dot{I}_{k0} \quad (27)$$

第 $n-1$ 段母线进线的零序电流为:

$$3\dot{I}_{(n-1)0in}^2 = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + \sum_{i=1}^j C_r^{n-1} \right) - \dot{I}_{k0} \quad (28)$$

第 $n-2$ 段母线出线的零序电流为:

$$3\dot{I}_{z0}^2 = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + \sum_{i=1}^j C_r^{n-1} + C_z^{n-2} \right) - \dot{I}_{k0} \quad (29)$$

1.2.3 P3 点发生 A 相接地时的零序电气量特征

如图 4 所示, 当在 $n-1$ 段母线与 $n-2$ 段母线之间的级联线 P3 点发生 A 相接地故障时, 同上分析过程可得各段母线的进线和出线的零序电流如下。

第 n 段母线进线零序电流为:

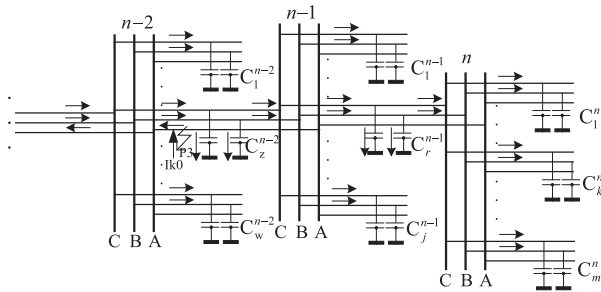


图 4 P3 点发生 A 相接地故障物理模型

$$3\dot{I}_{n0in}^3 = 3\dot{U}_0 j\omega \sum_{i=1}^m C_i^n \quad (30)$$

第 $n-1$ 段母线出线(第 r 条出线)零序电流为:

$$3\dot{I}_{r0}^3 = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + C_r^{n-1} \right) \quad (31)$$

第 $n-1$ 段母线进线的零序电流为:

$$3\dot{I}_{(n-1)0in}^3 = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + \sum_{i=1}^j C_r^{n-1} \right) \quad (32)$$

第 $n-2$ 段母线出线的零序电流为:

$$3\dot{I}_{z0}^3 = 3\dot{U}_0 j\omega \left(\sum_{i=1}^m C_i^n + \sum_{i=1}^j C_r^{n-1} + C_z^{n-2} \right) - \dot{I}_{k0} \quad (33)$$

从上面 P2 点和 P3 发生 A 相接地的零序电气量特征的分析可知,对于级联线路,作为进线侧的零序电流方向均由母线流向线路,作为出线的零序电流方向均由线路流向母线。总之各级级联线路流过的零序电流与故障线路的零序电流方向相同。

1.3 传统接地保护及漏电保护特性分析及缺陷

1.3.1 基本原理介绍

传统的小电流接地保护原理有:

- (1)基于零序电流和零序电压的五次谐波原理^[4];
- (2)基于出线端的零序功率方向的原理^[5,6]。

1.3.2 缺陷分析

(1)对于单级供电中性点不接地系统,只有出线端的零序电流,不存在级联线路零序电流的问题,所以传统的利用零序电流方向的小电流接地保护原理方法能很好地解决不接地系统单相接地造成的问题。

(2)对于阶梯式多级供电中性点不接地系统,当某级母线的出线发生单相接地故障时,由 1.2 分析可知,该级母线以上的各级级联线路流过的零序电流与故障线路的零序电流方向相同,大小相似,利用零序电流方向很难保证故障识别的选择性。

2 新型保护原理

2.1 同一条线路既作进线又作出线电流特性分析及解决

2.1.1 P1 点发生 A 相单相接地故障分析

当 P1 点发生 A 相接地故障时,第 n 段母线与第 $n-1$ 段母线之间的级联线路在 $n-1$ 侧(出线端)的零序电流见式(23),其方向为线路流向母线,在 n 侧(进线端)的零序电流见式(19),其方向为母线流向线路。对于重要负荷线路正常都装设光纤差动保护,则级联线路在 $n-1$ 侧(出线端)的零序差流为:

$$\dot{I}_{rd0} = 3\dot{I}_{r0} + 3\dot{I}_{n0in} = 3\dot{U}_0 j\omega C_r^{n-1} \quad (34)$$

由式(34)易知当第 n 段母线出线故障时,级联线路在 $n-1$ 侧(出线端)的零序差流为级联线路本身零序电容电流的大小,方向为由母线流向线路。此零序差流方向与故障线路的零序电流方向相反。

2.1.2 P2 点发生 A 相单相接地故障分析

当 P2 点发生 A 相接地故障时,第 n 段母线与第 $n-1$ 段母线之间的级联线路在 $n-1$ 侧(出线端)的零序电流见式(27),其方向为线路流向母线,在 n 侧(进线端)的零序电流见式(26),其方向为线路流向母线,则级联线路在第 $n-1$ 段母线出线侧零序差流为:

$$\dot{I}_{rd0}^2 = 3\dot{I}_{r0} - 3\dot{I}_{n0in} = 3\dot{U}_0 j\omega C_r^{n-1} - \dot{I}_{k0} \quad (35)$$

由式(35)易知当第 n 段母线与第 $n-1$ 段母线之间的级联线路发生单相接地故障时,级联线路在 $n-1$ 侧(出线端)的零序差流为系统接地电流与该级联线路本身电容电流之差,方向为由线路流向母线。此零序差流方向与故障线路的零序电流方向相同。

2.1.3 P3 点发生 A 相单相接地故障分析

同 2.1.3 分析,当 P3 点发生 A 相接地故障时,级联线路在第 $n-2$ 段母线出线侧零序差流方向为线路流向母线。此零序差流方向与故障线路的零序电流方向相同。

此时第 n 段母线与第 $n-1$ 段母线之间的级联线路在 $n-1$ 侧(出线端)的零序电流见式(31),其方向为线路流向母线,在 n 侧(进线端)的零序电流见式(30),其方向为母线流向线路,则级联线路在第 $n-1$ 段母线出线侧零序差流为:

$$\dot{I}_{rd0} = 3\dot{I}_{r0} - 3\dot{I}_{n0in} = 3\dot{U}_0 j\omega C_r^{n-1} \quad (36)$$

由式(36)易知此时该级联线路零序差流方向为母线流向线路。此零序差流方向与故障线路的零序电流方向相反。所以利用级联线路零序差流方向可以保证在级联线路上一级发生故障时,该级联线路不会误动。

2.2 新型判据原理

2.2.1 差流原理

由 2.1 分析可知,当级联线路发生区外的单相接地故障时,由出线端计算出的零序差流大小为本线路的电容电流,方向为自上级母线流向线路;当发生区内故障时,计算出的零序差流大小为系统接地电流与下级各个线路电容电流之差,远大于区外故障时的零序差流,方向为自线路流向上级母线。因此,通过设定零序差流的门槛和判断差流方向可以有效地进行单相接地故障地判别。

2.2.2 方向比较(纵联方向)

由上 2.1 分析可得,当级联线路下级母线出线发生单相接地故障时,线路末端(进线端)的零序电流方向为由母线流向线路。而当线路本身发生区内单相接地故障时,线路末端的零序电流方向为由线路流向母线。而级联线路上级线路发生单相接地故障时,可以通过首端的零序电流方向判别。因此,在传统的基于零序功率方向判据基础上,增加线路出线侧零序差流方向的判断,可以可靠地判别线路本身区内故障与下级母线出线发生的故障。

3 具体装置的实现

根据上面分析可得,级联线路故障时基于零序差流的动作方程为:

$$\begin{cases} \alpha \leq \arg \frac{\dot{I}_{d0}}{\dot{U}_0} \leq \pi - \alpha \\ |\dot{I}_{d0}| > I_{d0set} \\ |\dot{U}_0| > U_{0set} \end{cases} \quad (37)$$

式中: \dot{I}_{d0} 为级联线路零序差流; \dot{U}_0 为线路首端(出线端)保护安装处测得零序电压; I_{d0set} 为零序差流启动值; U_{set} 为零序电压启动值。

基于方向比较原理的动作方程为:

$$\begin{cases} 0 \leq \arg \frac{\dot{I}_{x0}}{\dot{U}_{x0}} \leq \pi - \alpha \\ |\dot{I}_{x0}| > I_{0set} \\ |\dot{U}_{x0}| > U_{0set} \end{cases} \quad (38)$$

式中: \dot{I}_{x0} , \dot{U}_{x0} 分别为首末端的零序电流和零序电压。

动作区域分别如图 5、图 6 所示。

4 结束语

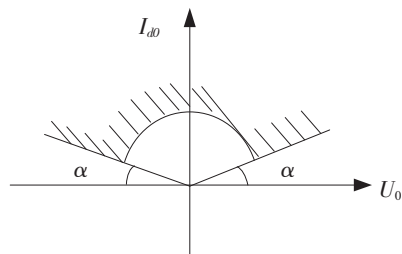


图 5 考虑偏移角的零序差流、电压方向保护原理动作区域

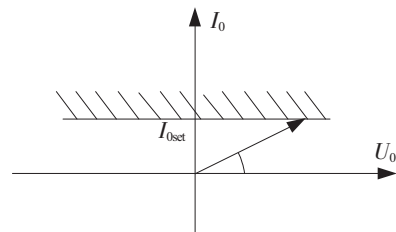


图 6 基于两端方向比较的动作区域

分析了阶梯式供电中性点不接地系统中发生单相接地故障时的零序电流特性,特别是发生区内和区外故障时级联线路中出线侧和进线侧电流的大小和方向。在指出传统的接地保护原理的不足的基础上,详细阐述了在级联线路发生区内单相接地故障与下级母线出线发生单相接地故障时流过线路两端的零序电流。提出了基于线路两端零序差流与对双端零序电流方向判别的接地保护原理。通过试验和现场运行情况表明了该保护原理的可行性。

参考文献:

- [1] 黄德有,李永实.井下采区变电所的合理供电方式[J].煤炭技术,2000,19(5):16-17.
- [2] 张保会,尹项根.电力系统继电保护.第1版[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [3] 唐涛,诸伟楠,杨仪松,等.发电厂与变电站自动化技术及其应用[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [4] 黄强,王毅,刘思佳.五次谐波法对小电流接地系统的故障定位[J].仪表仪器用户,2008,15(1):122-124.
- [5] 向小民,雷雨.中性点不接地系统单相接地选线方法的研究[J].四川电力技术,2007,30(6):61-64.
- [6] 陈奎,唐轶.小电流接地系统单相接地故障选线的研究[J].高电压技术,2007,33(11):180-184.

作者简介:

丁网林(1971-),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事变电站综合自动化和微机保护的研究开发和应用;
温传新(1978-),男,江苏南京人,工程师,主要从事变电站综合自动化和微机保护的研究开发和应用;
骆健(1977-),女,江苏南京人,工程师,主要从事变电站综合自动化和微机保护的研究开发和应用。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [2] LIN Y H, LIU C W, YU C H. A New Fault Location for Three-terminal Transmission Lines using Two-terminal Synchronized Voltage and Current Phasors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 452-459.
- [3] 董新洲, 葛耀中. 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(8): 47-53.
- [4] 陈 铮, 苏进喜, 吴欣荣, 等. 基于分布参数模型的高压输电线路故障测距算法[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 31-33.
- [5] Novodel D, HART D G. Unsynchronized Two-terminal Fault Location Estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 130-137.
- [6] 全玉生, 王晓蓉, 杨敏中, 等. 工频双端故障测距算法的鲁棒性问题和算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 28-32.
- [7] 王亚强, 焦彦军. 超高压长线路故障测距研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(1): 20-23.
- [8] 施世鸿, 何奔腾. 基于分布参数模型的双端非同步故障测距算法[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 84-87.
- [9] 滕 林, 刘万顺, 李 营, 等. 一种实用的新型高压输电线路故障双端测距精确算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 24-27.
- [10] 辛振涛, 尚德基, 尹项根. 一种双端测距算法的伪根问题与改进[J]. 继电器, 2005, 33(6): 36-38.
- [11] 程 立, 杨华春, 贺仁睦. 一种实用的高压输电线路故障双端测距算法[J]. 现代电力, 2003, 20(5): 40-43.

作者介绍:

丁士长(1980-), 男, 安徽安庆人, 硕士, 从事电力系统通信和继电保护方面的研究工作;

宋国兵(1972-), 男, 河南信阳人, 副教授, 主要从事电力系统继电保护的科研与教学工作;

刘林林(1985-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的科研工作;

许庆强(1976-), 男, 江苏常州人, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

Research of Fault Location Algorithm Using Two-terminal Data

DING Shi-chang¹, SONG Guo-bing², LIU Lin-lin², XU Qing-qiang³

(1. Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Jiangsu Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: There will be false root in the fault location using two-terminal data if the unsynchronized data is considered. In this paper, the generation of the false root is represented. The algorithm of fault location, having no use for distinguishing the false root and using unsynchronized data of two-terminal, is introduced. It utilizes searching and iteration methods to locate the fault point according the regularity of fault component voltage along the transmission line while its astringency and the exclusivity are proved. The algorithm adopted distributed parameters which can eliminate the influence of the line capacitance is realized easily. The result of simulation shows that the algorithm has a high precision and a low sensitivity to the fault resistance, inception angle and unsynchronized data of two-terminal, while the method has a high speed of astringency.

Key words: transmission line; fault location; astringency; unsynchronized data of two-terminal

(上接第 15 页)

Realization About Single-phase Ground Protection of Ladder Ungrounded Distributed Power System

DING Wang-lin, WEN Chuan-xin, LUO Jian

(State Grid Electric Power Research Institute Nanjing Sino-German Protection & Substation Control Systems Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: The characteristics of zero sequence current in ladder ungrounded distributed power system are discussed. The zero sequence currents of two sides in connection line are analyzed in detail when line internal and external single-phase ground fault occurrence. The shortage of traditional single-phase ground fault protection principle is pointed out. The new principle is proposed based on the direction relation between zero sequence currents of two sides in connection line and the direction relation between zero-sequence differential current and zero sequence currents. The test and site operation results show the superiority of this technology.

Key words: ungrounded power grid; single-phase ground protection; multi-level power supply; zero-sequence differential current