

配电网接地选线装置的研制

潘靖¹, 郝会锋¹, 何润华²

(1. 汕头供电局, 广东 汕头 515041; 2. 广州超高压局, 广东 广州 510000)

摘要: 针对配电网中性点经可控消弧线圈接地电网单相接地故障选线困难的实际, 提出接地选线新方法。给出了零序电流比幅接地选线法理论推导, 得到了小电流接地系统在正常运行和发生单相接地故障时系统主要物理量的计算公式。搭建了试验模型, 介绍了控制器的硬件结构及主要软件流程。硬件系统由 CPU 模块、模拟量采集模块、开关量输入/输出模块、液晶显示模块、电源模块和通信接口等模块组成。实验表明, 该装置运算速度快、选线准确、抗干扰能力强。

关键词: 谐振接地; 消弧线圈; 故障选线; 零序电流比幅接地选线

Research on faulty line selection device of distribution network

PAN Jing¹, HAO Hui-feng¹, HE Run-hua²

(1. Shantou Power Supply Bureau, Shantou 515041, China;

2. Guangzhou Bureau, CSG EHV Transmission Company, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The faulty line for the single phase grounding of the distribution network with neutral point earthed via controllable arc suppression coil can be selected by the zero-sequence-current-ratio method (ZSCR). The theoretical deduction of ZSCR is given and the calculation formulas for the main parameters of small current earthing system are presented for both normal and single-phase grounding conditions. Hardware structure and main software flow of the controller are introduced. The DSP chip TMS320LF2407 is used as hardcore, the system is made up of CPU module, analog data sampling module, switch input/output module, LCD display module, power module and communication interface module, etc. Experiments show that the equipment has fast calculation speed, good performance and high correctness.

Key words: resonance earth system; controllable extinction coil; faulty line selection; zero-sequence-current-ratio method

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)19-0048-05

0 引言

在中低压电网中, 当电容电流大于一定值时, 一般采用中性点经消弧线圈接地方式。由于消弧线圈的补偿, 使得接地残流过小, 在出现接地故障时选线困难。

目前, 国内外采用的新型故障选线方法有: 零序五次谐波电流选线法、零序暂态电流选线法、注入信号选线法及基于小波变换的接地选线法等。

第1种方法由于系统中5次谐波电流含量一般都比较小, 当弧道电阻比较大时选线特征不明显; 第2种方法受系统运行方式及故障状态影响较大, 抗干扰能力差, 现场运行可靠性不高; 第3种方法采用外加信号, 在原理上有所改善; 第4种方法暂态过程持续时间较短, 而且无法重现。但所有这些方法都需集中比较各条出线的零序电流大小或相位, 使得仪器接线复杂, 难以与馈线保护结合为一

体并在开关柜上就地安装。

小电流接地系统故障选线问题的解决, 可以使保护装置在发生单相接地故障时及时选出故障馈线, 并根据实际决定是否跳闸, 从而避免中性点在高电位运行带来的安全隐患, 将使“电网安全”与“供电可靠性”这两个相互制约因素在小电流接地系统中得到统一, 从而大大提高小电流接地系统运行水平。

1 零序电流比幅选线原理

假定电网有 N 回馈线, 若第 J 回馈线的 A 相通过弧道电阻 R_j 接地。故障馈线零序电容为 $C_{0j} = C_{aj} + C_{bj} + C_{cj}$, 泄漏导纳为 $G_{0j} = G_{aj} = G_{bj} = G_{cj}$; 非故障馈线零序电容为 $C_{0k} = C_{ak} + C_{bk} + C_{ck}$, 泄漏导纳为 $G_{0k} = G_{ak} = G_{bk} = G_{ck}$, ($k=1, 2, \dots, N, k \neq J$)。同

$$\text{时 令 } \sum_{k=1}^N G_{0k} = G_0, \quad \sum_{k=1}^N C_{ak} = C_a, \quad \sum_{k=1}^N C_{bk} = C_b,$$

$\sum_{k=1}^N C_{ck} = C_c$, $C_0 = C_a + C_b + C_c$, R_L 为消弧线圈的等值损耗电阻, 配电网等值电路图如图 1 所示。

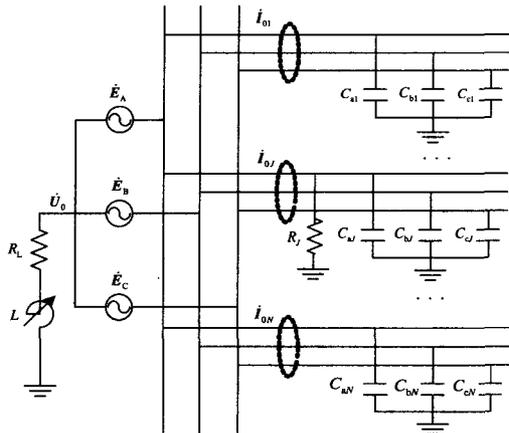


图 1 中性点经可控消弧线圈接地网络

Fig.1 Network with earth-connected through controlled extinction coil

假定三相线路对地电容相等, 即: $C_a = C_b = C_c, C_{aJ} = C_{bJ} = C_{cJ}$ 。

设通过消弧线圈支路的电流为 I_L , 则故障馈线的零序电流大小为:

$$I_{0J} = \frac{\sqrt{\left(3 \sum_{k=1, k \neq J}^N G_{0k} + \frac{1}{R_L}\right)^2 + \left(\omega \sum_{k=1, k \neq J}^N C_{0k} - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{R_J \sqrt{\left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_J} + 3G_0\right)^2 + \left(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} E_A \quad (1)$$

非故障馈线零序电流 I_{0k} ($k=1, 2, \dots, N \quad k \neq J$) 大小为:

$$I_{0k} = \frac{\sqrt{\left(3G_{0k}\right)^2 + \left(\omega C_{0k}\right)^2}}{R_J \sqrt{\left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_J} + 3G_0\right)^2 + \left(\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} E_A \quad (2)$$

在电网发生单相接地故障时, 由式 (1) 和 (2), 对 N 回馈线的零序电流两两进行比值: 故障馈线与非故障馈线两者的零序电流比值为:

$$\frac{I_{0J}}{I_{0k}} = \frac{\sqrt{\left(3 \sum_{k=1, k \neq J}^N G_{0k} + \frac{1}{R_L}\right)^2 + \left(\omega \sum_{k=1, k \neq J}^N C_{0k} - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{\left(3G_{0k}\right)^2 + \left(\omega C_{0k}\right)^2}} \quad (k=1, 2, \dots, N \quad k \neq J) \quad (3)$$

非故障馈线与非故障馈线的零序电流比值为:

$$\frac{I_{0m}}{I_{0n}} = \frac{\sqrt{\left(3G_{0m}\right)^2 + \left(\omega C_{0m}\right)^2}}{\sqrt{\left(3G_{0n}\right)^2 + \left(\omega C_{0n}\right)^2}}$$

$$(m, n=1, 2, \dots, N \quad m \neq n, m, n \neq J) \quad (4)$$

从式 (3) 可以看出, 含故障馈线零序电流比值会随着消弧线圈容量的变化 (从补偿状态退到空载) 而改变。从式 (4) 可以看出, 非故障馈线零序电流比值与消弧线圈电抗值无关, 在消弧线圈容量变化过程中维持不变。根据两式随消弧线圈容量的调节变化趋势的不同, 可以区别故障线路和非故障线路, 这就是“零序电流比幅式接地选线法”。这一方法考虑了线路泄漏电导和消弧线圈有功损耗的影响。

2 零序电流比幅选线装置的设计

2.1 选线装置的总体结构框架

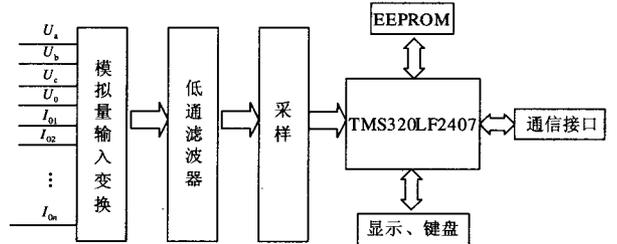


图 2 选线装置结构框图

Fig.2 Block diagram of the equipment

2.2 程序设计的总体原则

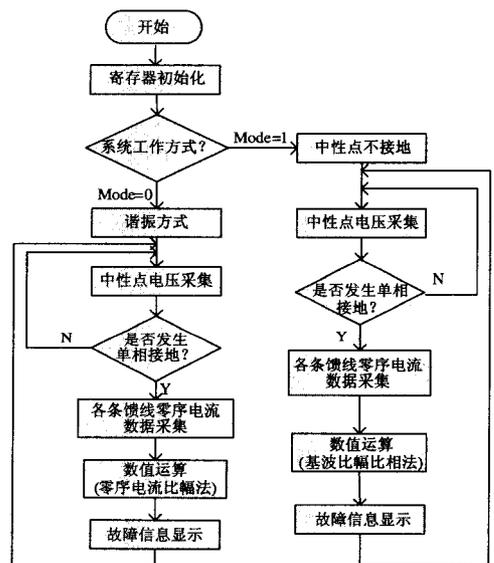


图 3 系统软件流程图

Fig.3 Flow diagram of system software

整个系统软件采用模块化结构设计，将各功能按模块化结构设计为可独立进行编程调试的子程序块，这样不仅便于程序的调试和连接，更有利于今后程序的移植、修改和实现功能扩展，而且利用现有的通用软件包，能达到事半功倍的效果。

本系统的软件流程图如图 3 所示。

软件可以按功能划分为 4 个独立的模块：硬件初始化模块、数据采集模块（母线的三相电压，中性点电压、各条馈线零序电流）、数据处理模块（算法模块）和键盘、显示模块。

3 零序电流比幅选线法的试验模型及结果分析

模拟小电流接地系统发生单相接地故障，观察、记录各回路零序电流的变化特点，验证了零序电流比幅式选线法的可行性。

3.1 试验模型

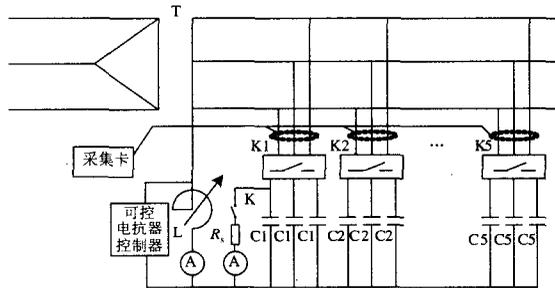


图 4 中性点经消弧线圈接地网络模拟实验图

Fig.4 Simulation circuit of network with neutral point earthed via controllable arc suppression coil

试验模型如图 4 所示，模拟 5 回馈线，空气开关 K1, K2, …, K5 的合分模拟馈线的通断，K 模拟接地的发生。T 为三相可隔离变压器。R_s 为可调电阻，模拟弧道电阻。零序互感器采集回路零序电流信号，该信号再由 USB 采集卡采集处理。电容 C 用来模拟对地电容大小，其大小改变相当于馈线长度的变化。试验电压为 380 V，可控电抗器输出感性电流在 0~1 A 范围内，可连续调节；考虑 R_s 取 0 Ω、20 Ω 两种情况。

3.2 试验 1

5 条馈线的电容 C 都取同一值 4 μF，R_s = 0 Ω，即馈线 1 发生金属性接地时。

故障馈线 1 零序电流及其幅值的变化图如图 5(a)所示，非故障馈线 2 零序电流及其幅值的变化图如图 5(b)所示（馈线 3~5 类同），各馈线零序电流

比值如图 5(c)所示，3 条曲线从上至下依次为 $\frac{I_{01}}{I_{02}}$ 、

$$\frac{I_{03}}{I_{04}}、\frac{I_{04}}{I_{05}} \text{ (下同)}。$$

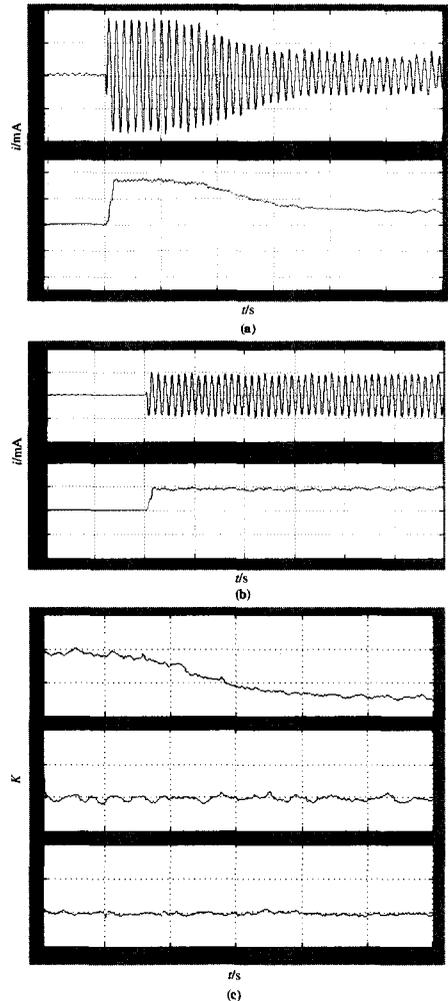


图 5 馈线零序电流及其幅值波形
Fig.5 Waveform of feeder ZSCR

当 R_s = 20 Ω，即馈线 1 发生非金属性接地时。各馈线零序电流比值如图 6 所示。

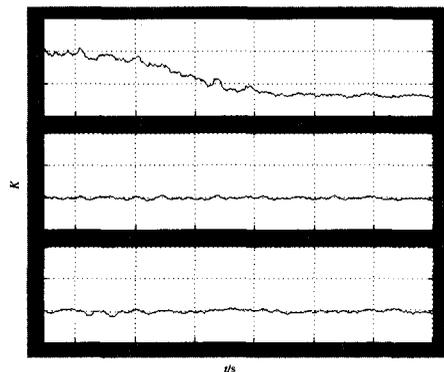


图 6 馈线零序电流及其幅值波形
Fig.6 Waveform of feeder ZSCR

从图中可以看出不论弧道电阻为 0 或 20 Ω , 非故障馈线零序电流之间的比值在发生单相接地故障前后总是保持不变, 而故障馈线零序电流与非故障馈线零序电流在发生单相接地故障前后有明显的变化趋势, 这可以作为区分故障线与非故障线的依据。

3.3 试验 2

馈线 1~5 的零序电容分别为 8 μF 、3 μF 、3 μF 、3 μF 、3 μF , 即馈线 1 的零序电容占整个电网零序电容的 40%。

各馈线零序电流比值如图 7 所示。

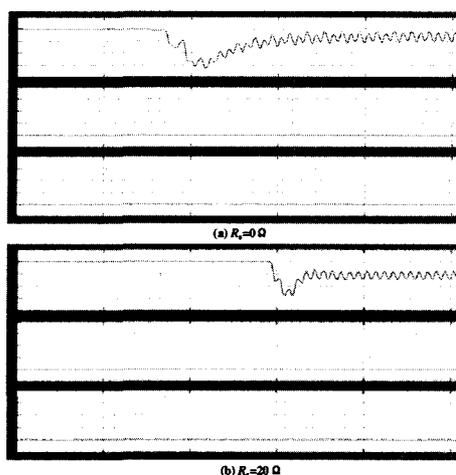


图 7 零序电流比幅波形

Fig.7 Waveform of ZSCR

3.4 试验 3

馈线 1~5 的零序电容分别为 1 μF 、5 μF 、4 μF 、4 μF 、6 μF , 即馈线 1 的零序电容占整个电网零序电容的 5%。

各馈线零序电流比值如图 8 所示。

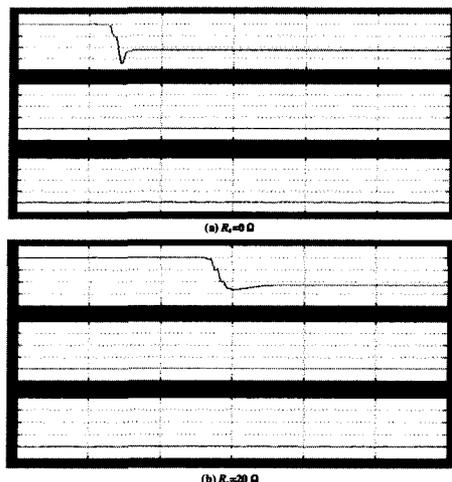


图 8 各馈线零序电流比幅波形

Fig.8 Waveform of each feeder ZSCR

分析图 5~图 8, 可以得到以下结论:

- 1) 消弧线圈补偿电容电流效果明显;
- 2) 故障馈线的零序电流幅值随着消弧线圈容量的调节有明显变化;
- 3) 故障馈线与非故障馈线两者的零序电流比幅值在发生单相接地故障后随着消弧线圈容量的调节有明显的变化;
- 4) 非故障馈线之间的零序电流比幅值在发生单相接地故障后随着消弧线圈容量的调节没有明显的变化, 基本上表现为一条直线。

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时零序电流比幅的变化特点表明, 采用零序电流比幅式选线原理是可行的。

4 结论

零序电流比幅选线法的核心在于能够通过改变消弧线圈容量以实现故障线路与非故障线路的比值发生变化, 特别适合配合具有跟踪补偿特点的消弧线圈的使用。选线装置以 TMS320LF2407 DSP 芯片为核心, 结构简单, 运算量小, 抗干扰能力强, 可靠性较高, 针对目前低压配网中自动调谐消弧线圈的应用日益广泛这一现实, 具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 桑在中, 张惠芬, 潘贞存, 等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2):11-12.
SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, et al. Protection for Single Phase to Earth Fault Line Selection for Ungrounded Power System by Injecting Signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(2):11-12.
- [2] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1):29-32.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, YU Yong-yuan, et al. New Methods for Control and Protection Relay in A Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Various Frequency Current[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1):29-32.
- [3] 龚静, 李英姿, 王亚慧. 基于 DSP 的小电流接地系统暂态首半波法实现[J]. 电工技术, 2006, (9):34-36.
GONG Jing, LI Ying-zi, WANG Ya-hui. Realization of DSP-Based Trickle Grounding System Temporary Status First-Half Wave Method[J]. Electric Engineering, 2006, (9):34-36.
- [4] 束洪春, 肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21):58-61.

SHU Hong-chun, XIAO Bai. A Transient-based Study of Fault Line Selection for Single-phase Faults on Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 58-61.

[5] 陈志亮,范春菊.基于 5 次谐波突变变量的小电流接地系统选线[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5):37-41.

CHEN Zhi-liang, FAN Chun-ju. Fault Line Selection for Small Current Neutral Grounding System based on the Fifth Harmonic Current Mutation in Distribution System[J]. Proceedings of CUS-EPSSA, 2006, 18(5):37-41.

[6] 蔡旭,刘勇,胡春强,等.新型偏磁式谐振接地与保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6):44-49.

CAI Xu, LIU Yong, HU Chun-qiang, et al. New Resonance Earth System with Magnetic Bias and Its Protection[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(6):44-49.

[7] 戴剑锋,张艳霞,侯喆.小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(3):43-47.

DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia, HOU Zhe. Application of Wavelet Reconstruction Algorithm in Phase-to-Ground Fault Detection of Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2004, 28(3):43-47.

[8] 齐郑,陈炯聪,杨奇逊.基于小波变换和LMS自适应滤波器的单相接地选线方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 58-61.

QI Zheng, CHEN Jiong-cong, YANG Qi-xun. Selection of Single-phase to Ground Fault Line Based on Wavelet Transform and LMS Adaptive Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 58-61.

[9] 陈炯聪,齐郑,杨奇逊.基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8):88-91.

CHEN Jiong-cong, QI Zheng, YANG Qi-xun. A Fault Line Detection Device for the Non-Solidly Grounded

System Based on Fuzzy Sets Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 88-91.

[10] 尹忠东,刘虹,陈柏超,等.磁阀式可控电抗器的研究[J]. 变压器, 1998, 35(7):1-4.

YIN Zhong-dong, LIU Hong, CHEN Bai-chao, et al. A Study on Magnetic Valve Controllable Reactor[J]. Transformer, 1998, 35(7):1-4.

[11] 王坚,卢继平,薛毅.新型小电流接地故障选线装置的设计[J]. 继电器, 2004, 32(14):36-40.

WANG Jian, LU Ji-ping, XU Yi. New Design of Fault Line Selection Device for Indirectly Grounding Power System[J]. Relay, 2004, 32(14):36-40.

[12] 潘永刚.小电流接地选线模拟实验系统的研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2002.

PAN Yong-gang. Research and Constitution of Simulative Experimental Systems for Small Current Fault Detection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002.

[13] 陈柏超,陈维贤,尹忠东.10kV电网新型自动调谐消弧线圈及控制装置[J]. 中国电力, 1997, 30(9): 70-71.

CHEN Bai-chao, CHEN Wei-xian, YIN Zhong-dong. A New Controllable Arc-Extinguishing Reactor for 10 kV Networks and Its Control System[J]. Electric Power, 1997, 30(9):70-71.

收稿日期: 2008-06-15; 修回日期: 2008-07-15

作者简介:

潘靖(1981-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统过电压及抑制; E-mail:panjing11@sohu.com

郝会锋(1978-), 男, 硕士, 研究方向为配电网运行及管理;

何润华(1977-), 男, 硕士, 研究方向为电力电子与FACTS技术。

(上接第 17 页 continued from page 17)

无源修正, 应用电路综合的方法实现了电压互感器的π型等值电路。该方法还可用于 T 型等值电路的建模和电流互感器的建模。由于采用无源修正技术, 保证了模型的稳定性, 为 GIS 站内的电磁传导干扰计算打下基础。

参考文献

[1] 张重远, 梁贵书, 崔翔. 气体绝缘变电站内 PT 的特快速暂态仿真建模[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 84-87.

ZHANG Zhong-yuan, LIANG Gui-shu, CUI Xiang. Modeling of Potential Transformers in Gas Insulated Substation for the Very Fast Transient Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 84-87.

[2] Gustavsen B. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3):1052-1061.

[3] Gustavsen B, Semlyen A. Enforcing Passivity for Admittance Matrices Approximated by Rational Functions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 97-104.

收稿日期: 2007-12-19; 修回日期: 2008-02-20

作者简介:

孟凡超(1978-), 男, 工程师, 研究方向为发电机励磁与继电保护; E-mail:mfc@dys.hbpc.com.cn

张绍军(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电磁兼容。