

配电网单相接地故障的综合选线方法及其实现

申东滨¹, 潘贞存¹, 张慧芬^{1,2}, 张帆¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘要: 为克服单一的接地选线方法无法满足小电流接地系统的各种情况, 从而不能做到 100% 正确选线的缺陷, 提高选线装置的正确动作率, 该文提出了一种综合的选线方案, 它以 4 种较有代表性且经实践证明较为有效的选线方法为基础, 采用模糊逻辑形成综合选线判据。给出了硬件实现的方案, 进行了 Matlab 仿真, 仿真结果表明该方法能够有效地提高选线的正确率。

关键词: 配电网; 接地选线; 模糊逻辑; DSP

中图分类号: TM77; TM72

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2005)18-0011-04

0 引言

近年来, 国内外在小电流接地系统单相接地故障选线原理和技术方面都进行了广泛而深入的研究与探索, 提出了基于不同故障特征的多种选线原理^[1], 研制了相应的接地选线装置, 不少装置已经投入电力系统应用, 在一定程度上解决了单相接地故障选线问题。然而, 由于小电流接地系统单相接地时故障特征不明显^[1], 且易受系统接线、接地方式、线路长短、电缆线径、负荷情况、互感器误差等诸多因素的影响, 所以到目前为止, 发展出的各种选线原理都存在着一定的局限性。目前尚没有任何一种单一选线方案能够适应小电流接地系统的各种情况, 做到 100% 正确地选线。

当小电流接地系统发生单相接地故障时, 由于系统的相间电压仍然对称, 故障电流为量值较小的对地电容电流或消弧线圈补偿后的残余电流, 不影响对低压用户的正常供电, 不需要瞬时切除故障, 因此有较为充裕的时间进行故障检测和判断, 可以采用较为严格、复杂的判据和算法。基于此, 本文提出一种基于模糊逻辑和复合判据的综合选线方法, 利用模糊逻辑将不同选线方法融合在一起, 进行综合决策, 确定故障线路。

1 判据分析和模糊模型的建立^[2,3]

为了构成基于模糊原理的复合判据, 首先应选取几个具有广泛代表性、相对较完善的选线判据, 并根据各自的特点设置其隶属度函数及有效区间。当故障发生时同时启动以上判据进行选线, 求出其相应的隶属度, 由分解定理求得对隶属度集合 A 的截集, 再根据系统预先设定的参数及重要的实时数

据对 A 中的元素进行模糊加权综合判决, 从而输出得到最终的故障选线结果。

本文综合了 4 种判据, 依次为“S 注入法, 基波零序电流比幅, 零序有功功率分量和暂态分量判据, 下面进行详细的分析。

1.1 注入法的隶属度函数

注入法^[4]的原理如下: 当发生单相接地故障时, 信号电流注入装置自动通过故障相的 PT 二次侧注入信号电流, 这个信号电流幅值很小, 为了便于检测, 信号频率不同于系统的固有频率。信号电流耦合到系统的一次侧, 只在故障线路上传输, 不会流到非故障线路和分支上去, 这是因为只有故障线路或分支才能构成注入信号电流的回路, 该方法适用于中性点不接地系统, 中性点经消弧线圈接地, 中性点经高阻接地等各种接地方式。隶属度函数定义如下

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x - \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \right] & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases} \quad (1)$$

x 为测量到的注入信号电流值, a₂ 为实际注入电流感应到一次系统的计算值, a₁ 为系统一次侧的阈值, 可取为 $\frac{1}{4} a_2$ 。

1.2 基波零序电流比幅判据^[5]的隶属度函数

这种判据主要针对中性点不接地系统。故障和非故障电流都是容性的, 该判据的基本原理即故障发生时, 故障线路基波零序电流等于所有非故障线路的电流之和, 电流幅值最大的线路即判定为故障线路。其优点是采用相对幅值比较, 避免了绝对值

整定等不确定因素,选线精度较高,但对于出线长度相差悬殊的系统有可能出现误判,因此设定其隶属度函数为

$$\mu_2 = \begin{cases} \left(\frac{1}{3I_{\max}}\right)^2 x^2 & 0 \leq x < 3I_{\max} \\ 1.0 & x \geq 3I_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

其中: x 为测得的故障线路基波零序电流的幅值, $3I_{\max}$ 为所有被检测出线中最长线路中最大零序电流幅值。

1.3 有功分量判据的隶属度函数^[6]

该判据适用于中性点经高阻接地和经消弧线圈接地配电网。目前经消弧线圈接地系统多加装限压电阻 R_n ,当发生接地故障后 R_n 被短接之前,非故障线路不能与消弧线圈构成低阻抗回路,故其零序电流为本身接地电容电流,而故障线路经接地点与消弧线圈构成回路,其零序电流为所有非故障线路电容电流与 LR_n 支路电流的向量和,即包含流过 R_n 的有功电流^[6]。故障线路的故障电流由有功电流和无功电流组成,非故障线路只有无功电流。因此通过检测各线路有功电流可选出故障线路,该判据的隶属度函数定义如下:

$$\mu_3 = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x - \frac{a_1 + a_2}{2}\right)\right] & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1.0 & x > a_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中: x 为故障零序电流的有功分量; a_1 是一个对应系统参数的计算阈值,可以取为 $\frac{1}{3}a_2$, a_2 可以通过下式计算得到:

$$a_2 = \frac{U}{\sqrt{3}(\chi + R_n)}$$

其中: U 是线电压, χ 为消弧线圈的电阻, R_n 为限压电阻。

1.4 暂态量判据的隶属度函数

暂态时的故障电流远远大于稳态,而且均为高频电流,大约是稳态时的10倍。基于暂态分量的判据适用于中性点不接地和中性点过补偿系统。基本原理如下所述:暂态故障电流可以按照线路的角频率特性分解为不同频率的信号,其中某个频率的信号占主要成分,分析这个主频信号可知,故障线路暂态零序电流方向或者无功功率方向是从线路到母线,非故障线路是从母线到线路;故障线路暂态电流的幅值远大于任何一条非故障线路。该判据的隶属

度函数如下:

$$\mu_4 = \begin{cases} 0 & q_k(t) > 0 \\ 1.0 & q_k(t) < -q_z \end{cases} \quad (4)$$

$q_k(t)$ 代表了暂态电压和暂态电流的方向关联,表示如下:

$$q_k(t) = i_k(t) \frac{du_0(t)}{dt} \quad (5)$$

一般情况下,由于电网中绝缘被击穿引起的接地故障,经常发生在电压接近于最大值瞬间,此判据能够准确判断。当电压接近为零时发生故障,隶属度函数变得很小,且易受非故障线路的无效电流干扰而发生误判,应确保此判据失效为零,由其他判据进行判断, q_z 是一个设定的阈值,用来除去非故障线路的无效电流干扰,确保该判据在此时失效,不会发生误判。

以上设定了几种选线判据的模糊模型,但是隶属度函数的确定并不是绝对的,它是一种软函数,具有灵活性,在应用中可以根据网络运行方式进行调整,为增加确定性概率,还可以建立更多判据的模型。

2 基于模糊逻辑的复合判据的综合决策

所有变电站的出线组成一个集合,形成论域 $U = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_n\}$, n 是线路的顺序号。当配电网发生接地故障时,立刻启动以上讨论的方案分别进行运算和判断。各判据所得出的选线结果构成下面的模糊集合

$$A_i = \{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3}, \dots, \mu_{in}\} \quad (i=1, 2, 3, 4)$$

$i=1, 2, 3, 4$ 代表了四种判据的顺序号,通过下面的方法可以算出故障线路。

2.1 约减模糊集合

为了除去可信度小于50%的选线结果,利用模糊理论中的分解定理,取该模糊集 A 的 $\alpha=0.5$ 的截集,取 $\alpha=0.5$ 的水平集, $A_{0.5} = \{x | \mu_{ij} > 0.5, i=1, 2, 3, 4, j=1, 2, \dots, n\}$,然后把剔除的 μ_{ij} 按原判据位置补上0。通过该过程将可信度低的判据的隶属度置零,构成新模糊集。

$$A_i = \{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3}, \dots, \mu_{in}\} \quad (i=1, 2, 3, 4)$$

形成如下所示的 $4 \times n$ 的模糊矩阵

$$A = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \dots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \dots & \mu_{2n} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} & \dots & \mu_{3n} \\ \mu_{41} & \mu_{42} & \mu_{43} & \dots & \mu_{4n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 权重集

为每一个判据设置一个权重系数,形成一个权重集 $K = [k_1, k_2, k_3, k_4]$ 。

2.3 判断故障线路

求得加权后的模糊集

$$A = K \cdot A = [\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n]$$

$\{\mu_i | \mu_i \in A, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 中值最大的序号即为最终的故障线路,为了提高复合判据的可靠性,占百分比次之的结果亦可以供作选线结论参考。

3 仿真

为了验证上面所讨论的方法的正确性,给出下面的仿真例子。进行了 Matlab 仿真,仿真模型如图 1 所示。该系统为一个 35 kV/10 kV 变电所,带四条架空线路。这是一个中性点不接地系统。系统参数为:正序, $X_1 = 0.38 \Omega/\text{km}$, $R_1 = 0.17 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 9.7 \text{ nF/km}$;零序, $X_0 = 1.72 \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.23 \Omega/\text{km}$, $C_0 = 0.23 \text{ nF/km}$;线路长度: $L_1 = 20 \text{ km}$, $L_2 = 25 \text{ km}$, $L_3 = 15 \text{ km}$, $L_4 = 36 \text{ km}$ 。

使线路 L_1 末端发生全接地故障,只给出最后结果,得到权重集合 K 如下所示: $K = [1, 1, 0, 1]$ 。约减后的矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

我们可以得到最终结果,矩阵 $A = K \cdot A = [2.7 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。因此可以看出故障线路为 L_1 。

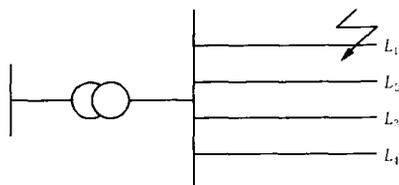


图 1 仿真系统模型

Fig 1 Model of simulation system

4 硬件实现

装置的硬件应能够支持上述的各种选线方法,并能够实现模糊综合判断。这就要求硬件系统应有较高的采集速度和精度,有较强的数据处理能力。为此,本文设计了一种多 CPU 协同工作的硬件方案,如图 2 所示。

各独立判据的数据采集及选线算法由不同的 DSP 完成,而模糊综合、人机接口、对外通信等功能

由管理 CPU 完成。

信号采集模块采用 TI 公司生产的 32 位浮点 DSP 芯片 TMS320C32^[7], TMS320C32 具有主总线 and 扩展总线,最高运行速度可达到 60MFLOPS/30MIPS,有一个串口和双通道 DMA 控制器,外部程序和存储器宽度可变。

管理 CPU 使用 UPD334D-40U6,是 STMicroelectronics 公司生产的一种新型芯片,80 管脚封装,有 46 个 D 口,有较快的处理运算速度。其内部有一个十位八通道的 AD,有 SPI, I²C 及两个通用串行口,可以方便同外围通信。基本不需要扩展存储器。PSD 模块可以完成地址解码和逻辑运算两大功能,大大减少外围的逻辑芯片。

装置备有远传接口,可以根据需要以 RS-232、RS-485 方式与变电站微机监控系统通讯。

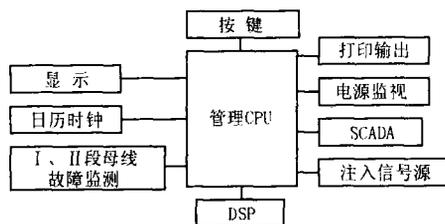


图 2 硬件原理图

Fig 2 Hardware schematic diagram

5 结论

利用多重判据进行综合判断,是提高小电流接地系统单相接地故障选线保护正确动作率的有效途径。本文基于模糊逻辑,对 4 种具有广泛代表性、相对比较成熟、经实践检验选线准确率较高的选线方案进行了综合。给出了各种方案的隶属度函数和有效域,介绍了模糊综合的方法。仿真计算表明,这种方法具有广泛的适应性和较高的选线准确率。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京:中国电力出版社,2000.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonance Grounding of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 肖静,潘贞存,丛伟,等. 基于模糊综合决策的配电网单相接地故障选线的研究 [A]. 2002 83-88.
XIAO Jing, PAN Zhen-cun, CONG Wei, et al. The Study on Selective Grounding Fault Protection of Networks on Floating Neutral Based on Fuzzy Principle [A]. IEEE/CSEE International Conference on Power System Technol-

- ogy Proceedings 2002 83-88
- [3] 贺仲雄,赵大勇. 模糊数学及其派生决策方法 [M]. 中国铁道出版社, 1992
HE Zhong-xiong, ZHAO Da-yong Fuzzy Mathematics and Deriving the Decision Method [M]. Beijing: China Railway Press, 1992
- [4] 桑在中,潘贞存,李磊,等. 小电流接地系统单相接地故障选线测距和定位的新技术 [J]. 电网技术, 1997, 21 (10): 50-52, 55.
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun, LI Lei, et al A New Approach of Fault Line Identification Fault Distance Measurement and Fault Location for Single Phase-to-ground Fault in Small Current Neutral Grounding System [J]. Power Systems Technology, 1997, 21 (10): 50-52, 55.
- [5] 唐轶,陈奎,陈庆. 小电流接地系统单相接地电流安全测量方法 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (18): 53-55.
TANG Yi, CHEN Kui, CHEN Qing A New Method for Measuring Single-phase-ground Current in System with Neutral Earthed via Peterson Coil [J]. Automation of Electric of Power Systems, 2000, 24 (18): 53-55.
- [6] 王广学. 智能电力系统线路零序电流保护整定计算程序 [J]. 继电器, 1999, 27 (4): 14-17.
WANG Guang-xue Brainpower Zero-sequence Current Protection Setting Program for Power System [J]. Relay, 1999, 27 (4): 14-17.
- [7] Kundur TMS320C3X User's Guide [Z]. Texas: Texas Instruments Incorporated, 2001.

收稿日期: 2004-12-28; 修回日期: 2005-03-04

作者简介:

申东滨 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; Email: sdb163@163.com

潘贞存 (1962 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统继电保护和安全自动控制;

张慧芬 (1970 -), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统配电网故障检测。

Comprehensive fault line selection method and its realization for single phase earth fault in distribution networks

SHEN Dong-bin¹, PAN Zhen-cun¹, ZHANG Hui-fen^{1,2}, ZHANG Fan¹

(1. School of Electric Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Information Science and Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China)

Abstract: Any individual fault line selection criterion can not select the faulty feeder correctly and completely during all conditions at present. A comprehensive fault line selection method is proposed in this paper in order to improve the correct rate of fault line selection criterion and perfect the performance of line selecting equipment. Fuzzy logic, based on four effective methods, is adopted to form comprehensive fault line selection criterion. MATLAB simulation gives satisfactory result that the comprehensive method can improve the correct rate of fault line selection. In the end, hardware design plan is described to develop fault line selection equipment.

Key words: distribution network; fault line selection; Fuzzy logic; DSP

(上接第 10 页 continued from page 10)

收稿日期: 2004-11-20; 修回日期: 2005-01-12

作者简介:

王树春 (1977 -), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护检修工作。Email: wangshuchun@jxep.com.cn

Markov model for reliability analysis of dual-redundant relays

WANG Shu-chun

(Jiaxing Electric Power Bureau, Jiaxing 314033, China)

Abstract: Protective relays play a very important role in electric power system. It is of vital importance to make sure that all relays are working perfectly. This paper presents a mathematical method to analyze the reliability of relay and establishes two Markov models for dual-redundant relays. The reliability of 500kV bus protection and 500kV line protection is analysed as well. The results shows that the models established in the paper are useful in maintenance decision.

Key words: protective relays; reliability analysis; Markov model; unavailability