

小电流接地系统电弧接地选线方法的研究

陈奎, 唐轶

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 根据大量的实际和6 kV模拟实验的故障录波数据,分析了影响小电流接地系统单相接地故障选线可靠性的原因。分析了发生电弧接地时接地电流、故障线路、非故障线路零序电流的特点,以及采样频率对首半波原理的影响。在此基础上提出了1/6波原理的选线方法,介绍了利用上述原理的接地选线装置的硬件结构及软件流程,并经现场运行证明了选线的准确性和可靠性。

关键词: 电弧接地; 接地选线; 首半波; 1/6波

中图分类号: TM713; TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2005)16-0005-05

0 引言

我国配电网和大型工矿企业的供电系统大多数采用中性点不接地系统,即小电流接地系统;它包括中性点不接地系统、中性点经消弧线圈接地系统也称谐振接地系统、中性点经电阻接地系统。其中以采用中性点不接地系统居多,过去城市电网以架空线为主系统接地电流较小,大多数采用中性点不接地系统,但近几年来随着城市电网的改造,电缆供电线路逐渐增加,城市电网也改用中性点经消弧线圈接地或经电阻接地的运行方式^[1]。

据调查单相接地故障占电力系统整体故障的80%以上^[1],并且短路故障很多也是由单相接地故障发展而成的,因此对于小电流接地系统的单相接地保护国内许多学者进行了大量的研究,提出了多种接地故障选线原理:如零序电流原理、零序无功方向原理、零序有功方向原理、首半波原理、谐波原理、信号注入原理、导纳原理、能量原理,以及这些原理与小波变换、神经网络等相结合的原理等^[2-10]。这些原理和方法同现代微电子技术相结合应用于生产实践中解决了很多接地选线的问题,但是误选、拒选现象仍占相当大的比例。现今许多变电所对于单相接地故障还是采用手动拉闸判断故障线路的方法,降低了系统供电的可靠性。可见开发和研制具有高可靠性、高灵敏性和快速性的选择性接地保护装置,对提高供电可靠性和安全性具有很高的现实意义。

1 影响接地选线可靠性的原因

为了掌握小电流接地系统单相接地故障时电气信号的实际特征,作者研制了具有32路同时采样的故障录波仪,其中包括28路零序电流、4路零序电

压量,采样频率为12 kHz采样,14位采样精度、记录时间为11个工频周期。这种录波仪分别安装在以电缆为主的中性点不接地电网、中性点经消弧线圈接地电网;以架空线为主的中性点不接地电网、中性点经消弧线圈接地电网;电缆、架空线相当的中性点不接地电网、中性点经消弧线圈接地电网;共计8台。自从2002年至今共记录了将近100个故障信息,并在6 kV电网进行了200多次模拟实验。从这些数据分析可见影响小电流接地选线的原因主要有:

1) 单相接地故障的性质影响选线的可靠性。从录波数据分析可见小电流接地系统的单相接地故障可分为:稳态接地、非稳态接地以及由最初的非稳态接地发展为稳态接地;而稳态接地又分为金属性接地、低阻接地、高阻接地;非稳态接地主要为电弧接地以及间歇性电弧接地或中间伴随稳态过程电弧接地等多种情况。而对于稳态接地故障,由于零序电流中暂态分量很少,造成基于暂态保护的拒动。

2) 零序电流互感器特性差和不一致的问题,同样是影响选线可靠性稳态的一个因素。小电流接地系统发生单相接地故障时因为故障线路与非故障线路的电气特征区别就不是特别明显,当互感器再存在一定的误差时(幅值、相位、波形等)必然造成选线的困难,尤其是对于高阻接地故障;如:相位误差对方向性保护的可靠性造成影响、幅值误差对基于幅值原理保护的可靠性造成影响;并且线路的不平衡电流同样也影响保护的准确性和可靠性。

3) 系统中谐波分量的影响,现代配电网中大量应用电力电子设备,使得负荷本身产生大量谐波,且电网馈线上谐波电流没有明确的规律可循,这种谐波必然对基于谐波原理保护装置造成影响。如煤矿

上主提升机由于采用电力电子装置,其起动电流大、起动频繁,其造成的谐波成分又不确定,必然影响基于5次谐波保护的可靠性。

2 小电流接地系统单相电弧接地的特点

当小电流接地系统发生单相接地故障时其等效电路如图1所示。

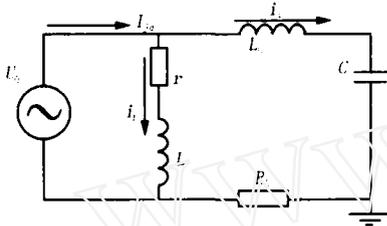


图1 单相接地等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of single-phase-to-ground fault

其中: U_0 为零序电压; C 为电网的三相对地电容; L_0 为三相线路和电源变压器的等值电感; R_0 为零序网络等值电阻; r 、 L 为消弧线圈等值电阻和电感。

对于中性点不接地系统可以认为消弧线圈电感 L 和阻抗 r 为无穷大。由图1可知:

$$\begin{cases} i_d = i_L + i_c \\ R_0 i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int i_c dt = U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi) \\ r i_L + L \frac{di_L}{dt} = U_{\phi m} \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{\phi m}$ 为系统相电压幅值。

解式(1)可得:

$$i_d = i_c + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \cdot \right.$$

$$\sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega t) e^{-\frac{t}{\tau_c}} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (2)$$

式中: I_{Cm} 为暂态电容电流的幅值; I_{Lm} 为暂态电感电流幅值; τ_c 为暂态电容电流衰减时间常数; τ_L 为暂态电感电流衰减时间常数。

$$\omega_f = \sqrt{\frac{1}{L_0 C} - \left(\frac{R_0}{2L_0}\right)^2} \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_0 C}}$$

由式(2)可见电弧接地电流有基波电流和暂态电流组成,且暂态电流远远大于稳态电流;并且电容的暂态电流远大于消弧线圈电感的暂态电流。因此对于电弧接地故障当通过判断暂态电流来判断故障线路时,消弧线圈的影响可以忽略不计。

图2为在6 kV供电系统下模拟各种电弧接地的实验波形。

通过实验室模拟实验和现场故障记录结果可见,电弧接地一般发生在故障相电压处于幅值附近,

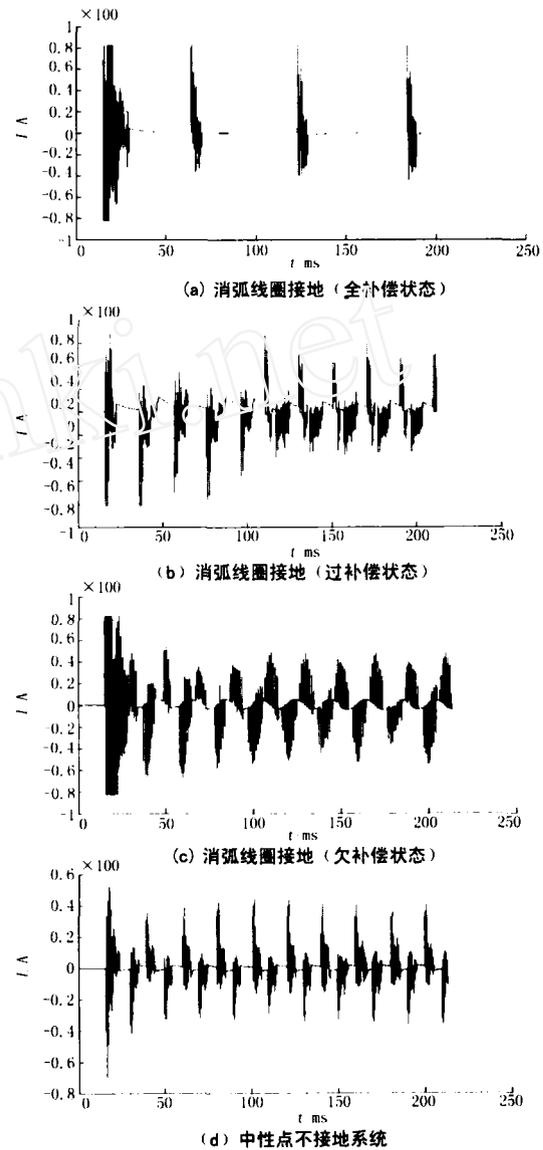


图2 电弧接地时接地电流波形

Fig. 2 Current wave of arcing grounded fault

不论是中性点不接地还是中性点经消弧线圈接地,其暂态电流主要为暂态电容电流,其频率与系统参数、变压器型号等因素有关。当系统电容电流较小时容易熄弧、中性点经消弧线圈接地尤其是全补偿时也容易熄弧。通过现场记录数据和大量实验数据发现,其暂态频率位于1 000 ~ 1 500 Hz之间。

3 基于首半波原理的接地选线原理

首半波原理是基于接地故障发生在相电压接近最大值的瞬间这一假设而提出来的。当相电压接近最大值时,若发生接地故障,则故障相电容通过故障线路向故障点放电,故障线路电感和分布电容使电流具有衰减振荡的特性。对于中性点经消弧线圈接

地系统,由于暂态电感电流的最大值应在接地故障发生相电压经过零值的瞬间,而接地故障发生在相电压接近最大值瞬间时,消弧线圈中的暂态电感电流接近于零,其过渡过程与中性点不接地系统相同。则在这种故障情况下的电流首半波中,暂态电流的最大值远大于稳态电流;而零序电流的相位,故障线路与非故障线路存在 180° 的相差。因此,可以利用故障后暂态电流首半波的方向来判断故障线路。但是故障并不一定发生在相电压峰值出现前后的瞬间里,在相电压过零前后发生的接地故障,其首半波电流暂态分量就会很小,再计及过渡电阻的影响,则容易引起误判。

4 电弧接地选线方法

由式(2)可见接地电流由稳态分量和衰减的暂态分量两部分组成,中性点不接地系统的稳态电流为系统的稳态电容电流,暂态电流由故障相电压骤减引起的放电电容电流,和由非故障相电压骤增引起的充电电容电流,前者直接经对地电容流入大地,衰减较快,称为暂态电容电流。后者先经变压器或发电机中性点分配到非故障相,再经对地电容流入大地,回路电感大衰减较慢,称为暂态电感电流。对于中性点经消弧线圈接地系统,其接地电流除有以上部分组成外,还包括消弧线圈本身产生的稳态电感电流和衰减相对较慢的暂态电感电流。不论电网的中性点为不接地系统还是消弧线圈接地系统,暂态接地电流的幅值和频率主要由暂态电容电流所确定,且故障线路零序电流初始时刻的极性与零序电压的极性相反,而非故障线路零序电流初始时刻的极性与零序电压的极性相同,故障线路与非故障线路零序电流初始时刻方向相反。图3为一实际记录的全补偿电网(电网电容电流 34 A ,消弧线圈补偿电流 32.4 A)的故障线路与某一非故障线路的零序电流波形。根据记录的故障数据分析可见对于中性点不接地系统,中性点经消弧线圈接地系统(包括全补偿、欠补偿、过补偿)都满足此特点。因此可以根据首半波的方向来判断故障线路。但是暂态电容电流的衰减速度与系统的参数等许多因素有关,当计算暂态分量时间较长时计算结果必然受到稳态分量的影响,而计算时间太短则可靠性较差,因此必须找出一个能够满足所有电网的计算时间和采样频率,来保证首半波算法的可靠性和准确性。

通过对100多次具有电弧接地特性的故障数据进行分析发现,其频率主要集中在 $1\ 000\sim 1\ 500$

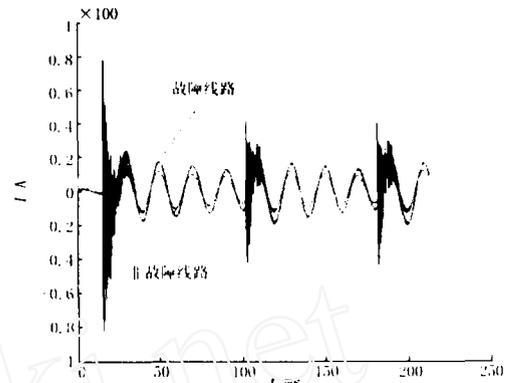


图3 全补偿运行方式下故障线路与某一非故障线路的零序电流波形

Fig. 3 Zero-sequence current wave of fault line and healthy line in complete compensation state

Hz,且在故障后 $3\sim 7\text{ms}$ 时故障线路与非故障线路的高频零序电流几乎为零,变为以基波为主的稳态信号,直到下次起弧。表1为中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统在不同采样频率下进行选线正确性的分析结论。

表1 电弧接地时采用首半波的选线正确率

Tab. 1 Right percentage of using initial half wave in arcing fault

	采样频率/kHz					故障次数
	12	9	6	3	1	
中性点不接地	71%	71%	71%	46%	40%	69次
中性点经消弧线圈接地	77%	77%	75%	44%	38%	48次 过18次 全17次 欠13次

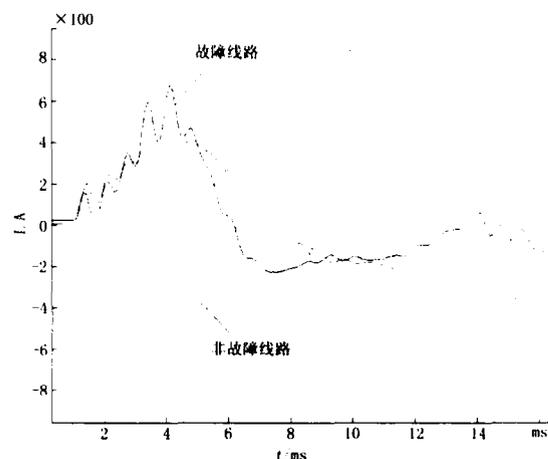


图4 首半波法选线错误时的波形图

Fig. 4 Wave of using initial half wave in wrong detecting fault line

通过分析中性点不接地系统中20次误选和中性点经消弧线圈接地系统中的12次(6 kHz采样频率)误选原因可知,主要是因为高频信号衰减速度

较快,当采用首半波(10 ms)分析时信号相位发生变化所致,如图4所示。而对于6 kHz以下的采样频率其错选的原因主要是因为采样频率低无法准确还原高频信号的特征(如相位、幅值等)。

为了提高选线的可靠性和准确性,对上述117次故障数据进行分析发现,如采用 $p_i = \sum_{j=1}^n u_{0,j} \times i_{i,j}$ 可发现故障线路和非故障线路的绝对值在故障发生后的3~5 ms时达到最大,并且相位相差180°。因此只要根据不同的采样频率选择不同的n即可得到准确结论。表2为不同采样频率计算故障初始时刻到故障后3.33 ms时的正确选线正确率。

表2 1/6波电弧接地选线正确率

Tab.2 Right percentage of using modified initial 1/6 wave in arcing fault line selection

	采样频率/kHz					故障次数
	12	9	6	3	1	
中性点不接地	100%	100%	100%	58%	22%	69次
中性点经消弧线圈接地	100%	100%	100%	52%	17%	48次 过18次 全17次 欠13次

由表2可见对于系统采用中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统(不论采用全补偿、欠补偿还是过补偿)只要保证足够的采样频率就可以保证选线的准确性。

5 基于判断接地故障类型的微机选线装置的实现

1) 硬件构成

图5为基于接地故障类型判别的微机接地选线装置硬件结构图。

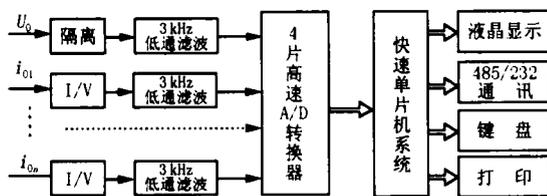


图5 基于接地故障类型判别的微机接地选线装置硬件结构

Fig.5 Hardware frame of microprocessor fault line selection based on distinguishing earth fault type

由上述分析可知,稳态分量法对电弧接地故障无效,而1/6波暂态法对稳态接地故障无效,必须对不同故障类型采用不同方法才能提高选线的准确

性,故障类型判别和稳态选线方法另文论述。

该装置具有1路零序电压检测通道和30路零序电流检测通道。为保证采样的快速性和精度而采用了4片高速16位A/D转换器(内含采样保持器),以及快速单片机系统。液晶显示器可显示故障线路和故障开始时间和结束时间及零序电压值。通讯方式可以在RS485和RS232之间进行选择。键盘用来对动作值整定、故障追忆以及自检的操作。并且本装置配有打印机可对故障线路号、故障时间等进行打印。

为保证在12 kHz的采样速率下能够对采样信号进行还原,设计了截止频率为3 kHz的低通滤波器。为能够随时检测零序电流互感器的幅值和相位误差而设计了具有自检线圈高精度的电流式零序电流互感器。可通过键盘来随时检测各个零序电流互感器的特性,并可对采样数据进行修正。

2) 软件流程

本装置的软件采用结构化设计,其除主程序外还包括以下几部分子程序:中断采样子程序、零序电压计算子程序、1/6波计算子程序、中断通讯子程序、自检子程序、显示器子程序、故障追忆子程序、打印子程序等。其主程序如图6所示。

6 结论

本文利用大量的实验数据和现场录波数据分析了影响小电流接地系统单相接地故障选线可靠性的

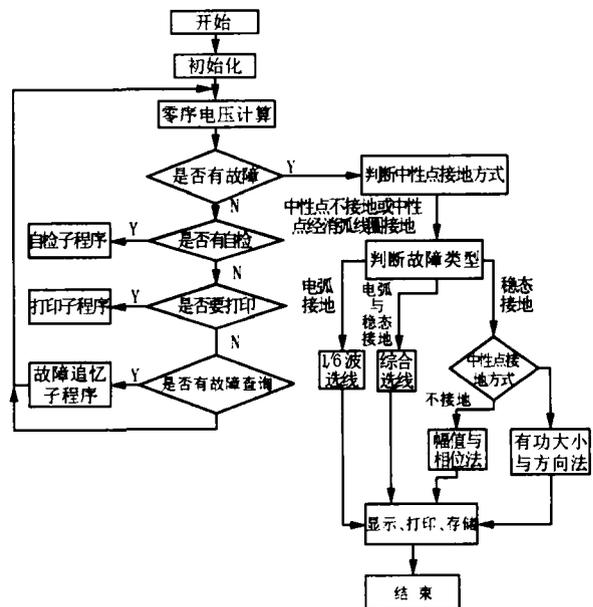


图6 本装置主程序流程图

Fig.6 Flow chart of main program

原因,及其对各种保护方法的影响。在此基础上提出了对于不同类型的单相接地故障采用不同的选线方法,并根据实际记录数据对首半波原理进行了修正,给出了实现首半波选线所必须的采样频率,以及初始暂态分量的最大时刻。开发出了基于故障类型判别的综合选线装置。自2003年3月起,已经有10套装置应用到6kV和10kV电网,经现场运行表明该装置选线准确、可靠,具有较高的推广价值。

参考文献:

- [1] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
LI Fu-shou. Ineffective Neutral Grounding Systems[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press,1993.
- [2] 马珂,张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J]. 继电器,2003,31(5):65-70.
MA Ke, ZHANG Bao-hui. Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or Compensated Neutral Networks[J]. Relay, 2003, 31(5):65-70.
- [3] 肖白,束洪春,高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器,2001,29(4):16-20.
XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng. Survey of the Methods of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral[J]. Relay, 2001,29(4):16-20.
- [4] Detjen E R, Shah K R. Grounding Transformer Applications and Associated Protection Schemes[J]. IEEE Trans on Industry,1992,28(4).
- [5] Chaari O, Miullier M, Brouaye F. Wavelets; a New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying[J]. IEEE Trails Oil PWRD, 1996, (3): 1301-1308.
- [6] 牟龙华. 接地保护与故障点定位[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.
MU Long-hua. Grounding Protection and Fault Location[M]. Xuzhou :CUMT Press,2000.
- [7] 蔡旭. 基于偏磁消弧线圈的综合增量法单相接地保护[J]. 电力系统自动化,2003,21(10):68-72.
CAI Xu. Protection for Detecting Single-phase-to-ground Fault Feeder Based on Synthesis Increment Principle In-resonant Grounded Power Distribution System with Arc-suppression with Magnetic Bias[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(10):68-72.
- [8] Akiyama S, Dube L, Ametani A. Digital Fault Location for High Resistance Ground Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1999,14(1):80-85.
- [9] Hanninen S, Lehtonen M. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 44:155-161.
- [10] Givelberg M, Lysenko E, Zelichonok R. Zero Sequence Directional Earth-fault Protection with Improved Characteristics for Compensated Distribution Networks[J]. Electric Power Systems Research, 1999,52:217-222.

收稿日期: 2004-11-16; 修回日期: 2005-01-06

作者简介:

陈奎(1973-),男,博士研究生,从事电力系统自动化和继电保护领域的教学、研究工作; E-mail:ckhbxtlc73@sina.com

唐轶(1957-),男,教授,博导,从事电力系统自动化和电能质量控制领域的教学、研究工作。

Analysis of detecting fault line of arcing grounded fault in isolated neutral system

CHEN Kui, TANG Yi

(China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on the fault data of lots of practical and 6kV simulation experiments, the causes of influencing the security of single-phase-to-ground fault in isolated neutral system were analyzed. This paper set up the way of detecting fault line based on distinguishing the types of earth fault. And this paper introduced the hardware and software flow chart based on above-mentioned principle. The veracity and reliability were approved by field running.

Key words: arcing fault; grounded-line selection; initial half-wave; 1/6 wave