DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2009.04.006

山区 35 kV 电网单相接地故障类型判断方法

刘渝根[1]， 谢彦斌[2]

（1. 重庆大学电气工程学院输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室，重庆 400044；
2. 邵阳学院电气工程系，湖南 邵阳 422000）

摘要： 为了克服山区 35 kV 电网消弧线圈的整定与三相电压的对称不能兼顾的矛盾，有必要对单相接地故障类型进行判断。笔者通过对山区 35 kV 电网建立等值电路图并进行仿真分析，得出电网分别发生永久金属性接地和电弧接地故障时故障相电压的特点和区别，据此提出了一种接地故障类型判断的判据及其实现电路，并讨论了接地电阻及电弧重燃时刻对故障判断的影响。仿真显示，该判据及其实现电路对上述故障类型的判断是相当准确的，且基本不受接地电阻及电弧重燃时刻的影响。该判据及其实现电路的提出，对于降低雷击跳闸率、提高山区 35 kV 电网的运行水平具有重要意义。

关键词： 35 kV 电网；单相接地故障类型；消弧线圈

中图分类号： TM727.1 **文献标志码：** A **文章编号：** 1001-1609(2009)04-0103-03

Judgement Method on Single-phase-to-ground Fault Type of 35 kV Grids in Mountainous Area

LIU Yu-gen[1], XIE Yan-bin[2]

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China; 2. Department of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China)

Abstract: In order to overcome the contradictory of setting the arc-suppression coil and symmetry of three-phase voltage in 35 kV mountainous area grid can not both take into account. it's necessary to make judgement on single-phase-to-ground fault type. In this paper, via building of equivalent circuit and simulation & analysis of 35 kV grids in mountainous area, voltage features of phase respectively in the aforesaid faults have been obtained as well as the differences between them, and judgement method for fault types and corresponding circuit are proposed with the discussion of influence of grounding resistance and arc re-burn time. Simulation result indicates that this judgement method and circuit gives a good performance for the judgement of fault types, and besides, there is basically no threat to its judging result from earthing resistance and re-burn time of arc. The proposal of this judgement method and circuit is of great significance in decreasing trip-out rate & improving operation level of 35 kV grids in mountainous area.

Key words: 35 kV grid; single-phase-to-ground fault; arc suppression coil

0 引言

我国的 35kV 电网有以下几个特点：①中性点非有效接地；②线路没有全线架设避雷线；③线路多数为 3～4 片绝缘子，本身绝缘水平较低；④线路三相不换位，三相对地电容不对称，山区更为严重。前 3 个特点使得 35 kV 电网易遭雷电直击而且雷击后绝缘子容易闪络，但其单相故障接地电弧往往能够自行熄灭。但实际工程中 35 kV 变电站架空线路总长度超过 100 km 时，单相接地电容电流一般会超过 10 A，这时故障处工频续流电弧过零熄灭后往往会发生重燃，使接地故障不能自动消失，并且会形成稳定燃烧、存在时间较长的间歇性电弧产生弧光接地过电压，因此我国规程规定 35 kV 电网单相接地电容电流超过 10 A 时需采用中性点经消弧线圈接地方式[1]。

但是，由于我国山区 35 kV 电网三相对地电容不对称度往往较大，导致中性点电压出现位移及三相电压不平衡。在中性点绝缘运行方式时中性点的电压位移往往可以满足规程要求，但中性点经按正常脱谐度整定的消弧线圈接地运行时，其位移电压就可能远远超出规程要求。因此运行人员往往会增大脱谐度以保证正常运行时中性点的位移电压满足规程要求，但当电网发生单相接地故障时，过大的脱谐度势必引起接地点补偿后残流的增大，不利于工

收稿日期：2008-11-18； 修回日期：2009-01-27

作者简介：刘渝根(1963)，副教授，从事电力系统过电压及接地技术研究。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

频续流电弧的熄灭和故障的自动消失，也就是消弧线圈没有有效发挥作用，造成的结果就是线路雷击跳闸率高[2]。

单相接地故障一般有永久金属性接地和电弧接地两种，显然，只有发生电弧接地故障时才需要投入消弧线圈。因此，正常运行时采用中性点绝缘运行方式，当发生单相接地故障时根据对故障类型的判断再投入消弧线圈，就可以既保证正常运行时三相电压的对称，又充分发挥消弧线圈的作用，从而降低线路雷击跳闸率。这里故障类型的判断是系统及时投入消弧线圈或排除故障的前提。因此，研究单相接地故障类型的判断对于降低雷击跳闸率、提高电网的运行水平具有重要的学术价值和工程实用价值。

现有的对于小电流接地系统的单相接地故障的反映和保护，通常是通过交流绝缘监视装置来实现的[3,4]。但是，该装置并不能区分故障是永久金属性接地还是电弧性接地。笔者基于电网分别发生上述两种故障时故障相电压的特点和区别，提出了一种接地故障类型判断的判据及其实现电路。

1 山区 35 kV 电网单相接地等值电路图的建立

根据山区35 kV 电网的特点可建立图 1 的等值电路图[5]：图 1 中 R_d 是故障点接地电阻（包括接地电弧电阻），R_s 是电源及站内设备等值电阻，L_s 是电源及站内设备等值电抗。C_a、C_b、C_c 及 U_{ao}、U_{bo}、U_{co} 分别是 A、B、C 相对地电容及对地电压。

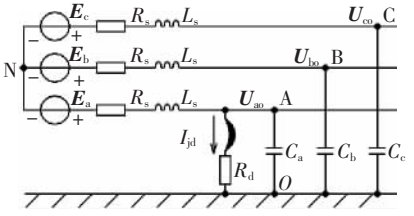

图 1 山区 35 kV 电网单相接地等值接线图

2 判据的提出

通过仿真分别可得故障相和中性点电压波形，见图 2、3。图 2 中的曲线为电弧接地时的故障相电压波形，此时中性点波形与其相似，只是相位有别，所以不再另给出其曲线；图 3 中的水平线为永久金属性单相接地故障时故障相的电压波形，另一近似为正弦波形的为中性点电压曲线。

由图 2、3 可以看出，对于故障相，当电网分别发生永久金属性和电弧接地故障时，波形相差非常明显；而对于中性点，其波形虽然也不同，但不如前者明显，也不如前者易于从电气上实现鉴别。所以，要区别这两种故障类型，宜从故障相电压波形的特点入手。

比较图 2、3 可知，发生永久金属性单相接地故障时故障相的电压幅值很低（约为 0），其波形近似为一条水平线；而电弧故障时其波形是周期性变化的，每工频周期内约有半周时间幅值约为 0（对应电弧燃烧期间），而另一个半周内则有一次从正峰值到负峰值的变化。因此如何检测这一周期性变化便成为鉴别故障类型的关键。

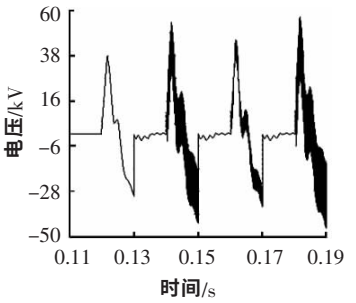

图 2 电弧性接地时故障相的电压波形

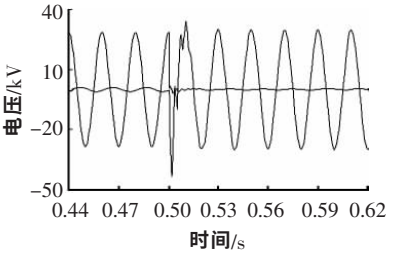

图 3 永久金属性接地时故障相与中性点电压波形

鉴于电压继电器的动作比较慢，也没有记忆功能，所以仅凭继电器是无法检测这种周期性的变化的，笔者给出一个电子检测与鉴别的方案，见图 4。

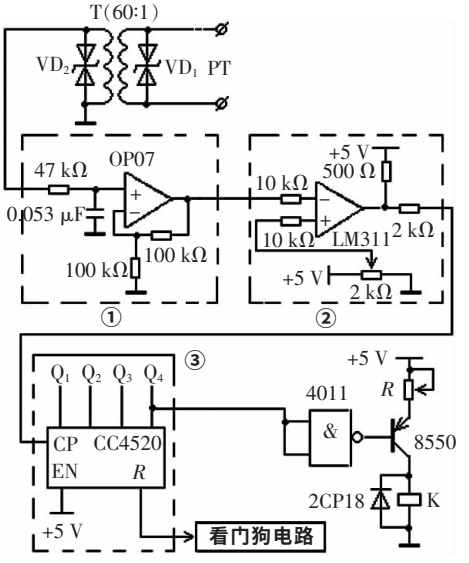

图 4 电弧性故障判断电路

其原理解释如下：

从故障相电压互感器 PT 过来的电压信号经变压器 T 降压、滤波器（图 4 中虚线框①所示）滤波后送到电压比较器（图 4 中虚线框②所示）与参考设定值比较，此参考值设置为略高于对应永久金属性接

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地的故障相电压信号水平，但又明显低于发生电弧性故障时的电压波峰值水平，这样对于永久金属性接地故障，电压比较器输出一直为低电平；而对于电弧性故障，电压波正峰值出现时输出为高电平，当其下降至低于设定值的水平之后，比较器输出变为低电平。由于电弧性接地是周期性发生的，相应地比较器就会输出一系列电平忽高忽低的方波，即一串脉冲。这一串脉冲输出至脉冲计数器（图 4 中虚线框③所示）进行计数，当累计到一定个数后就可以认为电网正发生电弧性接地故障，此时计数器输出端输出高电平，经反相后输出低电平使开关三极管接通，驱动继电器动作。很显然，对于永久金属性接地故障脉冲计数器不可能接收到那么多脉冲，因而继电器也不可能动作。这样，通过继电器的动作就可判断是否发生了电弧性单相接地故障。当然，也不能说继电器没动作就断定有永久性接地故障，此时可装设一零序电压继电器来判断是否发生了永久性接地故障。不过，一般小电流接地系统都设有交流绝缘监察装置，其核心就是一个零序电压检测装置，所以一般没必要再另设零序电压继电器。

电子元器件处理的信号幅值一般比较低（一般不超过几伏），所以在此设一个变压器 T(60:1)。考虑到电弧接地时电网电压存在振荡，故在变压器 1、2 次侧各设一个双极型瞬态电压抑制二极管（即 VD_1、VD_2），用以吸收浪涌高峰，其钳位电压分别为 200 V 与 6 V 左右。

滤波器[6]的作用是消除电网中谐波的影响，图 4 中滤波器为一个一阶有源低通滤波电路，其截止频率约为 64 Hz[$=1/(2\pi\times47\times10^3\times0.053\times10^{-6})$]。这样工频信号得以顺利通过，谐波信号会被抑制。

电压比较器[6]中的调节电阻用于调整参考值。这可以根据线路走廊地理情况及运行经验进行适当调整。

计数器[7]采用 4 位集成计数器 CC4520，当接收到 8 个脉冲时其 Q_4 位输出高电平至与非门 4011，驱动继电器动作，即发出电弧接地的信号。如果需要更多脉冲才发出信号，级联一个计数器即可。与非门的作用主要是提高负载能力，看门狗电路则用于定时复位计数器。

实际电网中发生单相接地故障时总是存在一定的接地电阻，同样电弧的重燃也并不一定总在电压峰值时刻，或多或少总有一点偏移，这些因素都不可避免会对中性点及各相电压存在一定的影响。下面将讨论这些因素对电弧性故障判断的影响。

3　接地电阻与电弧重燃时刻对故障判断的影响

一般来说 C_a、C_b、C_c 差别不会太大，据有关现场实测数据，它们之间相差一般不超过 10%[8]，所以可令 $C_a=C_b=C_c=C_o$。同样，阻抗 R_s 和 jwL_s 也远远小于 C_o 所对应的容抗，为了分析方便，忽略阻抗 R_s 和 jwL_s。

设永久金属性接地时故障点电压为 $U_{a(yj)}$，电弧性接地时故障点电压为 $U_{a(arc)}$。设故障相为 A 相（见图 1），同时分别设接地电阻为 R_d，电弧在时刻 t_a（相对点 O 偏移度数为 α）燃烧，见图 5。根据节点电压法，可得

$$U_{a(yj)}=U_{ph}/\sqrt{1+(3wC_oR_d)^{-2}} \tag{1}$$

$$U_{a(arc)}=\sqrt{\frac{\int_a^{\pi}(\sqrt{2}\,U_{a(yj)}\cos wt)^2\mathrm{d}t+\int_{\pi}^{T+t_a}(\sqrt{2}\,U_{ph}\cos wt)^2\mathrm{d}t}{T}}=\sqrt{\frac{U_{a(yj)}^2+U_{ph}^2}{2}+(U_{ph}^2-U_{a(yj)}^2)\left(\frac{2\alpha+\sin 2\alpha}{4\pi}\right)} \tag{2}$$

式（1）、（2）中，$Z_{co}=1/(jwC_o)$，U_{ph} 为相电压。

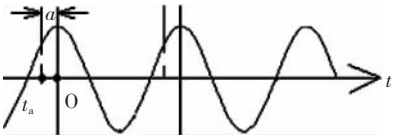

图 5　电弧重燃时刻与角度示意图

根据式（1）可得故障相电压与接地电阻的关系，见图 6。

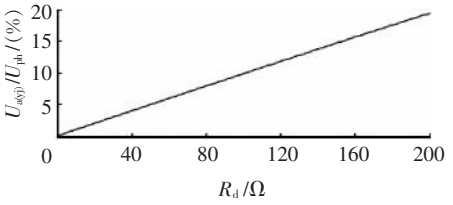

图 6　故障相电压与接地电阻的关系

由图 6 知，当接地电阻 R_d 较小时，$U_{a(yj)}<<U_{ph}$。由此可见，只要实际的接地电阻不太大，则永久金属性接地时故障相电压的幅值就远小于相电压值，相应地比较器输出就保持为低电平，因而不会对比较器的判断造成影响。此外，还可以根据实际情况调整电压比较器的参考值，以确保比较器输出为低电平。

对于电弧性接地，熄灭时故障相的电压接近正常情况下的相电压，即有一个幅值从负到正峰值的变化过程（见图 3），相应地比较器的输出电平也会由低变高；电弧燃烧时其电压幅值实际上就是对应条件下 $U_{a(yj)}$ 的幅值，由上面讨论知，此时比较器输出仍为低电平。至于电弧重燃时刻的影响，根据内部过电压理论，则主要体现在故障瞬时故障相电压的暂态峰值上（$U_{max}=2U_\infty-U_{(0-)}$），并不会改变其电压的基本特征或变化规律。

仿真结果显示，在接地电阻不超过几十欧姆的

（下转第 110 页）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

率,方便设备的维护和更新,减少变电站寿命周期内的总体成本。

5 结语

电子式互感器的诞生是互感器传感准确化、传输光纤化和输出数字化发展趋势的必然结果。电子式电流互感器是电网动态观测、提高继电保护可靠性和数字电力系统建设的基础装备,将在现代电力系统中发挥重要的基础测量作用。随着微机保护的广泛应用,二次保护设备不再需要高功率的输出信号。电子式互感器以其高精度、高可靠性、宽频带等特点和在实际应用中表现的优良特性表明:ETA/ETV 完全能够适应电力计量和继电保护数字化、自动化的发展潮流,并将成为未来互感器发展的主流方向。

参考文献:

[1] IEC 61850.Communication Networks and Systems in Substation:Part9-1·Geneva:International Electro Technical Commission[S].2003.

[2] BRAND K P.The Standard IEC 61850 as Prerequisite for Intelligent Applications in Substations[C]//Power Engineering Society General Meeting,2004:714-718.

[3] STEINHAUSER F.New Challenges with Substations Utilizing Communication Networks[C]//Power Tech. Conference Proceedings, Bologna,2003:225-229.

[4] SHEPHARD B,JANSSEN M C,SCHUBERT M.Standardised Communications in Substations[C]//Developments in Power System Protection,2001,Seventh International Conference on IEE,Amsterdam,2002:543-547.

[5] 李红斌,余春雨.电子式互感器数字输出的研究[J].高电压技术,2004,30(2):10-12.

[6] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等.基于 IEC 61850 标准的采样值传输模型构建及映射实现[J].电力系统自动化,2004,28(21):38-42.

[7] 黄智宇,段雄英,张可畏,等.电子式高压互感器数字接口的设计及实现[J].电力系统自动化,2005,29(11):87-90.

[8] 段雄英,邹积岩.小波变换在电子式电力互感器误差校正中的应用[J].电工技术学报,2002,17(6):93-96.

[9] 钱 政,梅志刚,罗承沐.电子式互感器中数据采集系统的实现与误差补偿[J].高压电器,2004,40(1):37-39.

[10] OATES C D M,BURNETT A J,JAMES C.The Design of High Performance Rogowski Coils [C]//International Conference on Power Electronics,Machines and Drives,2002:568-573.

[11] NIEWCZAS P,CRUDEN A,MICHIE W C,et al.Error Analysis of an Optical Current Transducer Operating with a Digital Signal Processing System[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2000,49(6):60-65.

(上接第 102 页)

的方法,从而为电力用户获取更为直接的温度参数提供了新的途径;分析了 GIS 红外温度监测的特点,有效地克服了 GIS 中导体的低发射率和 SF_6 气体的温室效应问题,并将此问题转化为普通的红外测温问题。GIS 温度在线监测的实现,将在及时发现异常温升、避免引发严重故障中发挥重要作用。

参考文献:

[1] 刘卫东,黄瑜珑.GIS 局部放电特高频在线检测和定位[J].高压电器,1999,35(1):11-15.

[2] 金力军,胡 青,邱国海,等.GIS 电晕放电监测[J].高电压技术,2005,31(3):25-27.

[3] 徐淦卿,陈 钰,程东杰.红外物理与技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,1989.

[4] 陈 衡,侯善敬.电力设备故障红外诊断[M].北京:中国电力出版社,1999.

(上接第 105 页)

情况下,上述电弧性故障判断电路对故障类型的判断非常准确;在接地电阻达到几百欧姆以上时,通过调整比较器的参考值其判断结果也相当准确。

4 结语

(1)笔者提出的单相接地故障类型判断方法简单可靠,电路所需元件全部是常用元件,易于维护,工程实用价值高。

(2)如果单相接地电阻比较高时,应该适当调高比较器的参考值设定水平,以保证判断电路的可靠性。这有赖于线路走廊的地理条件及运行经验。

参考文献:

[1] 张纬钹,何金良,高玉明.过电压防护及绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,2002.

[2] 刘渝根,丁伯剑,袁 涛.山区 35 kV 电网中性点新型运行方式研究[J].高电压技术,2006,32(1):32-34.

[3] 税正中,施怀瑾.电力系统继电保护[M].重庆:重庆大学出版社,1997.

[4] 牟道槐,李玉盛,马良玉.发电厂变电站电气部分[M].重庆:重庆大学出版社,1996.

[5] 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.

[6] 戴伏生,毛兴鹏,王好贤,等.基础电子电路设计与实践[M].北京:国防工业出版社,2002.

[7] 阎 石.数字电子技术(第 4 版)[M].北京:高等教育出版社,2001.

[8] 丁伯剑.山区 35 kV 电网中性点新型运行方式研究[D].重庆:重庆大学电气工程学院,2004.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net