西门子高灵敏接地保护装置的原理分析及应用

曹团结，诸伟楠
(南京中德保护控制系统有限公司，南京 210003)

关键词：西门子；微机保护装置；高灵敏接地保护；单相接地故障；方向判定；TA 误差角补偿
中图分类号：TM 774

0　引言

目前国内对中性点非直接接地系统单相接地故障的保护，多采用集中式小电流接地选线装置。这类装置有的是按照传统理论，以系统自身电量的变化关系作为动作判据；有的是采用注入外部信号的方法，利用专用仪器检测感应信号以确定故障线路。但前一种方法多对零序电流互感器(TA)有特殊要求，有的甚至要求配用保护厂家专用的 TA；后一种方法由于感应信号电磁场的分布不具有严格的空间界限，致使故障选线的准确性受到限制，且自动化的水平不高。另外，这类装置的集中式的结构必然增加二次电缆及组屏占地等方面的负担，且不符合变电站自动化分层分布式的结构。针对这种情况，近年来国内外出现了一些将小电流接地保护功能分散于各间隔保护单元中的做法。本文根据南京中德保护控制系统有限公司多年来推广应用德国西门子公司保护测控装置的经验，介绍西门子公司在此方面的一些成熟做法。

1　高灵敏接地故障方向判定

西门子 7SJ 系列包括 7SJ531，7SJ512 及最近推出的面向 21 世纪的 7SJ62 等微机过流时间保护(含测控)继电器，在单一元件内，除具有一般线路馈线保护所必备的功能外，还包含一高灵敏接地故障保护，用以实现中性点不接地系统及补偿系统的单相接地保护。高灵敏接地故障保护可以实现零序电压和(或)零序电流接地故障检测(或)跳闸、接地选相、接地方向判定等功能，其中接地方向判定的原理与方法颇具特色，而其对 TA 误差角补偿的做法也值得我们参考。

接地故障方向判定的一个先决条件是零序电压检测及零序电流(幅值)检测都已启动。在西门子保护中，用于接地方向判定的方向特性曲线可随网络系统的不同而变换、调整。方向判定处理的不是接地电流的幅值，而是与可设定的方向特性成 90°正交的分量，文中暂把此电流分量称为有效分量。继电器根据式(1)计算零序有功功率 P_{ea} 和零序无功功率 P_{er}：

$$\begin{cases} P_{ea} = \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_t^{t+T} u_E(t)\, i_E(t)\,\mathrm{d}t \\ P_{er} = \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_t^{t+T} u_E(t-90^\circ)\, i_E(t)\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{1}$$

式中　$u_E(t)$，$i_E(t)$ 分别为零序电压和零序电流的瞬时值；T 为积分周期。

继电器利用零序电流的有效分量的大小(随选择的方向特性曲线的不同，有效分量可能是有功分量也可能是无功分量)来决定接地故障方向判定是否启动。所需零序电流有功和无功分量从功率分量中计算得出。继电器将零序有功功率、无功功率的方向与相应的零序电流的有效分量的大小一起作为接地方向判别的依据。

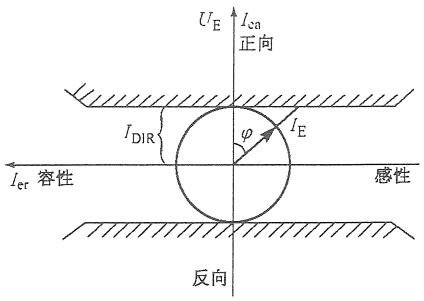
如图 1(a)所示，对中性点经消弧线圈接地的系统，用户可选择垂直于零序电压的直线作为方向特性。相应的零序电流有效分量即为与方向特性成直角的有功分量 $I_E\cos\varphi$。西门子称图 1(a)所示特性为以 $\cos\varphi$ 测量的方向特性。相应的以 $\sin\varphi$ 测量的方向特性如图 1(b)所示。除此之外，方向特性也可以 ±45°角旋转(如图 1(c)所示)。

对中性点非直接接地系统，一般可有如下分析。如图 2 所示，U_A，U_B，U_C 为系统正常运行时的三相对地电压，U_B'，U_C'，U_0 为系统发生单相接地(如 A 相)时，B，C 相电压及零序电压。

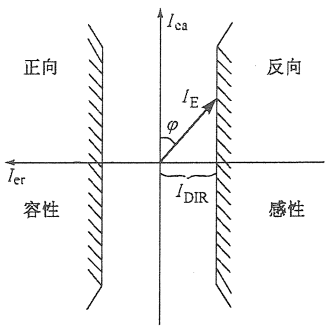
$\sum 3I_0$ 和 $3I_0$ 分别为中性点不接地系统中接地故障发生于不同方向时，流过保护安装点的接地电容电流，两者方向肯定是相反的。需要说明的是，对于一般线路，由于线路电阻及非完全金属性接地等原因，$3I_0$ 与 U_0 并不严格地成 90°，而一般在 70°左右，但最小一般不会小于 45°。对于不同方向的接地故障，利用零序功率的有功分量或无功分量的正负

收稿日期：2000-07-17；修回日期：2000-08-11。

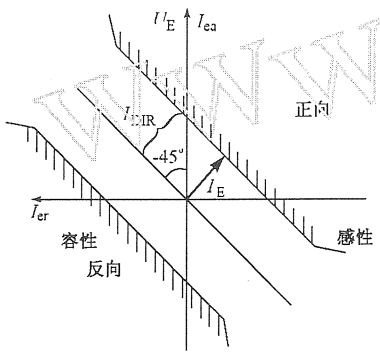
© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 以cos φ测量的方向特性



(b) 以sin φ测量的方向特性



(c) 以cos φ测量和-45°角校正的方向特性

I_{DIR}为用于方向判定的有效分量的设定门限值(I_{ee}>/P DIR)

图1 接地方向特性

Fig. 1 Directional characteristics of earth fault

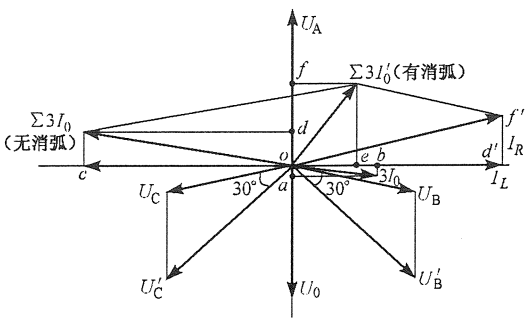


图2 非直接接地系统相量图

Fig. 2 Phasor diagram of the non-earthed system

号即可方便地加以区分。

取决于$3I_0$与U_0的相角关系，亦即考虑到容性电流的绝对优势，图2中$\sum 3I_0$的无功分量oc远比有功分量od大，$3I_0$的无功分量ob远比有功分量oa大。因此中性点不接地系统中利用零序功率的无功分量具有更高的灵敏度。正方向故障时，零序功率无功分量$P_{er}>0$，反方向时，$P_{er}<0$。

对中性点经消弧线圈接地的系统，情况大有不同。由于消弧线圈产生的感性电流I_L叠加于故障点的容性电流之上，随着系统运行方式的改变、故障位置的不同，总的零序电流$\sum 3I_0'$既可能是容性的，也可能是感性的。$\sum 3I_0'$的位置既可能在U_0坐标轴的左侧，也可能在其右侧。对于通常采用的过补偿方式，$\sum 3I_0'$出现在U_0轴的右侧，其无功分量oe的方向与$3I_0$的无功分量ob相同。无功分量的方向显然不可以作为方向判定的依据。在这种情况下，只有总的零序电流电阻性分量(主要由消弧线圈的损耗形成的)of可用于方向的判定，图中表现为of方向与oa的方向相反。考虑到od分量的不确定性，在整定计算中只需计算由消弧线圈产生的有功分量$d'f'$($d'f'=df$)即可。正方向接地故障中，$P_{ea}>0$，反方向时，$P_{ea}<0$。

总的说来，中性点不接地系统中接地方向的判定可以应用以sin φ测量的方向特性，其判据为：正方向接地故障时，$P_{er}>0$，且I_{er}大于设定值；反方向接地故障时，$P_{er}<0$，且I_{er}大于设定值。

中性点经消弧线圈接地系统中接地方向的判定可应用以cos φ测量的方向特性，其判据为：正方向时，$P_{ea}>0$，且I_{ea}大于设定值；反方向时，$P_{ea}<0$，且I_{ea}大于设定值。

用于方向判定的有效分量的设定门限值(即$I_{ee}>$/P DIR，图1中记为I_{DIR})整定范围为3 mA～1 200 mA。

不接地系统中的有效分量为零序电流的容性分量，由于故障线路上将流过全系统非故障元件的对地电容电流之和，通常即以此故障电流的一半作为整定值。

中性点经消弧线圈接地系统中的有效分量为零序电流的电阻性分量，此分量主要是由消弧线圈的损耗产生的。根据西门子公司的建议，经验整定值为期望可得到的有功电流的一半。例如某10 kV系统，全系统对地电容电流为20 A，中性点经某型号消弧线圈接地，过补偿度为10%，线圈额定工作电压为$10.5/\sqrt{3}$ kV，总有功损耗为4.83 kW。由此可知单相接地时流经故障线路的零序电流电容性分量约为2 A，电阻性分量约为797 mA。若采用的线路零序TA变比为150/5，则反映到二次的电阻分量约为26 mA，$I_{ee}>$/P DIR即可整定为13 mA。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于用于方向判定的有效分量一般极小，它要求测量器件及测量方法具有极高的精度。为可靠地检测到极小的接地电流，继电器配备一专用高精度接地零序电流输入端，通常接入零序窗式 TA 二次电流。此输入端上输入电流不宜过大，一般要求在 1 A 以下，可检测的最小二次电流为 3 mA。

2 TA 误差角补偿

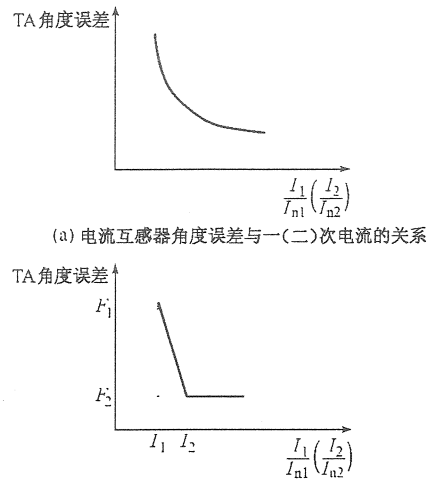
如前所述，经消弧线圈接地的系统只可使用电阻性零序电流分量用于方向判定，而当发生接地故障时，电阻性电流比容性电流小得多，按照西门子公司的叙述，在最不利的情况下，有功分量可能仅为无功分量的 1/50。因此，如果电流互感器不能将电流一次值准确地转换，高精度算法的优点将不能充分发挥。

为精确测量一次电流，西门子公司采用两项措施：一是如前所述在继电器中为高灵敏接地故障检测设计专用的高精度测量回路，另一措施是在软件中对电流互感器的误差（主要是相位误差）进行补偿。分析如下。

电流互感器的接线确定以后，其实际的二次负荷阻抗亦已确定，在电流互感器正常工作范围内（额定值附近及以下），其角度误差与一次电流的关系如图 3(a) 所示。因为二次阻抗已为定值，此曲线的横坐标亦可看成是二次电流值（图中横坐标为一（二）次电流值与相应额定值的比值）。

图 3(b) 为继电器模拟 TA 角度误差的近似特性曲线。由于继电器只能测量二次电流，对误差曲线的描述只能用二次值来表示。继电器只需用户输入图示两点坐标值，整条曲线的其他点的坐标即可推知。由于 TA 的二次电流相位通常超前于一次电流相位，即一般 TA 误差为正值，所以继电器给出的角度误差整定范围（0.0°～5.0°）为 0 或正数。继电器根据无功电流来校正角度误差。

考虑到我国电力系统零序 TA 的应用情况，零序 TA 的角度误差特性一般不易得到，致使 TA 角度误差补偿不便使用（角度误差设为0.0°）。即便如此，根据南京中德保护控制系统有限公司与浙江嘉兴供电局在某变电站合作进行的现场一次试验的结果仍可证明，接地方向判定具有足够的灵敏性和可靠性。由第 1 节给出的例子中亦可看出，当消弧线圈有功损耗电流转化到二次侧的量值不致过小时，装置的灵敏性是可以满足要求的。因为此时由 TA 误差角补偿得到的修正量对实测电流的补偿作用不很明显。



(a) 电流互感器角度误差与一（二）次电流的关系

(b) 继电器模拟电流互感器角度误差近似特性曲线

图 3 电流互感器角度误差特性图

Fig. 3 Diagram of the characteristics of the current transformer angle error

3 结语

原理分析表明，西门子 7SJ 系列微机保护对中性点非直接接地系统单相接地故障的保护功能全面、硬件精度高、算法优良。继电器在国内运行记录及现场试验的结果也证明了其高灵敏性和高可靠性。相信随着城网、农网改造工作的不断推进，西门子 7SJ 系列微机保护继电器会在我国电力系统中发挥更大的作用。

曹团结，男，工程师，主要从事变电站自动化系统的设计和调试工作。

诸伟楠，男，副教授，高级工程师，主要从事电力系统的教学、科研及变电站自动化系统的设计工作。

PRINCIPLE ANALYSIS AND APPLICATION OF SIEMENS HIGH SENSITIVE PROTECTION DEVICES FOR DETECTING EARTH FAULT

Cao Tuanjie, Zhu Weinan

(Nanjing Sino-German Protection & Substation Control Systems Ltd, Nanjing 210003, China)

Keywords: SIEMENS; microcomputer-based relay protective device; high sensitive earth fault protection; single-phase earth fault; direction determination of earth fault; correction of error angle of current transformer

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net