

西门子 7SJ 系列微机保护继电器小电流接地系统 单相接地故障保护原理的分析

陈济良

(中国联合工程公司, 浙江省 杭州市 310022)

ANALYSIS ON PRINCIPLE OF SIEMENS 7SJ SERIES MICRO-PROCESSOR BASED PROTECTIVE RELAY FOR SINGLE PHASE TO GROUND FAULT OCCURRED IN SMALL CURRENT NEUTRAL GROUNDING SYSTEM

CHEN Ji-liang

(China United Engineering Corporation, Hangzhou 310022, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The zero sequence voltage measurement, zero sequence current measurement, faulty phase detection, grounding direction judgment and CT error angle compensation, are included in Siemens 7SJ series micro-processor based protective relays to process the single phase to ground fault occurred in small current neutral grounding system. Above mentioned modules are described and the principle to judge the grounding direction by use of zero sequence power component is emphatically analyzed.

KEY WORDS: Power system; Micro-processor based protective relay; Single-phase to ground fault; Small current neutral grounding system

摘要: 西门子系列微机保护继电器处理小电流接地系统单相接地故障的功能模块包括零序电压检测、零序电流检测、接地选相、接地方向判定及 CT 误差角补偿等。作者对以上各部分进行了详细介绍, 并着重分析了其利用零序功率分量方向进行接地方向判定的原理方法。

关键词: 电力系统; 微机保护继电器; 单相接地故障; 小电流接地系统

1 引言

西门子 7SJ 系列包括 7SJ513、7SJ512 及最近推出的面向 21 世纪的 7SJ632、7SJ621 等微机过流时间保护(含测控)继电器^[1], 在单一元件内, 除具有一般线路馈线保护所必备的功能外, 还含有高灵敏接地保护的功能, 用以实现中性点不接地系统及补偿系统的单相接地保护。它也可用于中性点直接

接地系统实现高阻抗接地故障的保护, 用以作为一般接地故障保护的后备。依据继电器不同的型号及相应的电流电压输入, 高灵敏接地故障保护可实现零序电压和(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。

以下对各功能模块的原理与实现方法作基本分析。

2 零序电压检测

零序电压的获得有两种途径^[2], 一种是直接输入 PT 开口三角电压, 另一种是由三相电压通过公式 $U_0 = |U_a + U_b + U_c| / \sqrt{3} = \sqrt{3}U_0$ 来计算获得。此处三相电压和除以 $\sqrt{3}$ 是考虑 PT 一次绕组额定相电压、二次绕组额定相电压与开口三角绕组额定相电压之比, 一般为 $\frac{U_n}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3}$, 后两者的比值为 $\sqrt{3}$ 。为保证可靠稳定地检测电压偏移, 可以调整延长零序电压检测时间。

3 接地故障选相

在 7SJ513、7SJ512、7SJ632 和 7SJ621 型保护继电器中都可以输入三相电压, 在判定零序电压越限后, 装置首先进行接地相判定。故障相的判定方法为: 在其它两相电压超过设定的高门限值的同时, 自身电压低于设定低门限值的相即为故障相。此方法对于不接地系统或补偿系统均适用。由于单

相接时接地相电压为零，而其它两相的对地电压抬升至 $\sqrt{3}$ 倍，故容易确定用于接地选相的两个电压门限值。

4 零序电流检测

7SJ 系列继电器零序电流检测的功能以零序电流的幅值作为接地故障检测的主要判据。当用于中性点直接接地或经低阻抗接地系统时可作为高阻抗接地的保护；用于中性点非直接接地系统时，如果系统总的接地电容电流 $\Sigma 3I_0$ 比 $3I_0$ 大得多，例如 $\Sigma 3I_0 > (5 \sim 6)3I_0$ 时（一般终端变电站低压侧出线大多在十几条以上，此条件的灵敏度将会受到很大的影响），为可靠地检测到极小的接地电流，继电器配备有一组专用高精度接地零序电流输入端，通常接入零序窗式 CT 二次电流。此输入端上输入电流不宜过大，一般要求在 1A 以下，可检测的最小二次电流为 3mA。零序电流检测可以设定两段时限特性，每段均可设为正、反方向或不带方向，根据需要其低值段可设定为定时限或反时限特性。

5 高灵敏度接地故障方向判定

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）检测都已起动。

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进行变换与调整。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，在后面的叙述中，暂将此电流分量称为有效分量。继电器根据下式计算零序有功功率 P_{ea} 及无功功率 P_{er}

$$P_{ea} = \frac{1}{T} \int_0^T U_e(t) I_e(t) dt$$

$$P_{er} = \frac{1}{T} \int_0^T U_e(t - 90^\circ) I_e(t) dt$$

以上两式中， $U_e(t)$ 、 $I_e(t)$ 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来决定接地故障方向判定是否起动（根据所选择的不同的方向特性曲线，有效分量可以有功分量也可以是无功分量）。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。

例如，图 1 中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。此有效分量 $I_e \cos \varphi$ 是决定性的因素，它与设定的一个门限值（以 $I_{ee} > P \text{ DIR}$ 表示）相比较。此电流幅值在图中表现为一个以 $I_{ee} > P \text{ DIR}$ 为半径的圆。西门子公司称此种方法为以 $\cos \varphi$ 测量的方向特性；相应地以 $\sin \varphi$ 测量的方向特性如图 2 所示。除此之外，方向特性也可以按 $\pm 45^\circ$ 角旋转，如图 3 所示。

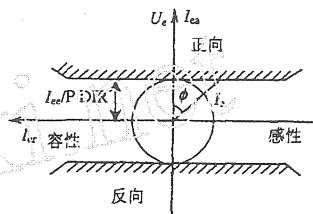


图 1 以 $\cos \varphi$ 方式测量的方向特性
Fig.1 Directional characteristics measured by $\cos \varphi$ mode

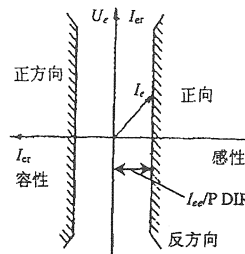


图 2 以 $\sin \varphi$ 方式测量的方向特性
Fig.2 Directional characteristics measured by $\sin \varphi$ mode

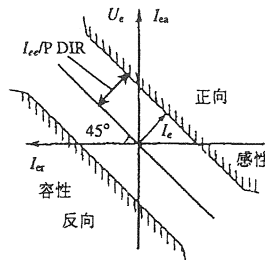


图 3 以 $\cos \varphi$ 方式测量和以 -45° 角校正的方向特性
Fig.3 Directional characteristics measured by $\cos \varphi$ mode and corrected by angle of -45°

对小电流接地系统的一般分析如下：图 4 中， U_A 、 U_B 、 U_C 为系统三相对地电压，当系统发生 A 相接地时， U_A 降为零，而其它两相电压幅值升高 $\sqrt{3}$ 倍， U_B 相位滞后 30° 。图 4 中相应表示为 U_B 、 U_C 。系统零序电压 $U_0 = -U_A$ ，继电器所使用的零序电压如前分析为 $\sqrt{3}U_0$ ，也示于图 4 中。

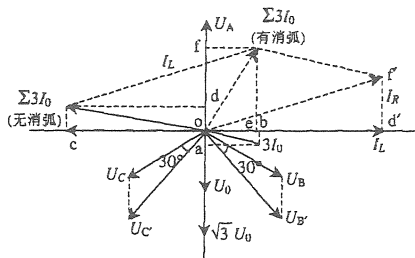


图4 对小电流接地系统的分析

Fig.4 Analysis of small current neutral grounding system

对于中性点不接地系统,当单相接地故障发生于非本线路时,流过本线路的电流为本身对地电容电流,方向为从母线流向线路,以 $3I_0$ 表示。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 之间的角度并不严格成 90° ,一般在 70° 左右,但一般不会少于 45° 。当故障发生在本线路时,流过被保护线路的零序电流为全系统所有非故障元件对地电容电流之和,以 $\Sigma 3I'_0$ 表示,其方向与 $3I_0$ 相反。

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号即可方便地加以区分。决定于 $3I_0$ 与 U_0 的相角关系,亦即考虑到容性电流的绝对优势,图4中 $\Sigma 3I'_0$ 的无功分量 oc 远较有功分量 od 大, $3I_0$ 的无功分量 ob 远较有功分量 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 $P_{er}<0$ 。

中性点经消弧线圈接地的系统情况大不相同。由于消弧线圈产生的感性电流 I_L 叠加于故障点容性电流之上,随系统的运行方式改变、故障位置的不同,总的零序电流 $\Sigma I'_0$ 既可能是容性的,也可能是感性的。 $\Sigma I'_0$ 的位置既可能在 U_0 坐标轴的左侧,也可能在其右侧。对于通常采用的补偿方式, $\Sigma 3I'_0$ 出现在 U_0 轴的右侧,其无功分量的方向与 $3I_0$ 的无功分量相同。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 $d'f'$ (= df)即可。在正方向接地故障时 $P_{ea}>0$,反方向时则为 $P_{ea}<0$ 。

总的说来,中性点不接地系统接地方向的判定可以应用以 $\sin\varphi$ 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} 高于设定值;反方向接

地故障时, $P_{ea}<0$ 且 I_{er} 低于设定值。

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

为完成接地方向判定功能,需要用户根据不同的系统确定继电器的相应方向特性曲线,并确定用于方向判定的零序电流有效分量的门限值。这可以通过输入三个整定参数来实现。

E/F MEAS 方向判定的测量模式选择。根据上文所述原则可选 $\cos\varphi$ 或 $\sin\varphi$ 方式。

PHI CORR 是以E/F MEAS中定义的测量模式为基础的方向特征曲线的偏转角,其整定范围为 $-45^\circ\sim 45^\circ$ 。例如,在接地系统中,由于接地电流一般是电阻-电感性的,将以 $\cos\varphi$ 测量的方向特性偏转 -45° 可获得较大的灵敏度。对于与不接地系统母线相连的电动机,由于接地电流常是电阻-电容性电流,将以 $\cos\varphi$ 测量的方向特性偏转 $+45^\circ$ 可以获得更高的灵敏度。

$I_{ec}>P$ DIR 为用于方向判定的有效分量的门限值,其整定范围为 $3\sim 1200\text{mA}$ 。因为一方面方向判定应与零序电流检测段结合在一起使用,另一方面零序电流检测段计算的是接地电流的幅值,而 $I_{ec}>P$ DIR仅计算与方向特性曲线垂直的有效分量,故它总是小于或等于接地电流幅值,所以, $I_{ec}>P$ DIR的整定值应小于上述相应零序电流幅值段的定值。

不接地系统中的有效分量为零序电流的容性分量,由于故障线路上将有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。由于此分量值一般极小,它要求测量器件及测量方法具有极高的精度。而且(有鉴于此)继电器的整定值也不应特别灵敏。根据西门子的建议,经验整定值为期望可得到的有功电流的一半。

举例来说,某 10kV 系统,全系统对地电容电流为 20A ,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 $10\sqrt{3}\text{kV}$,总有功损耗为 4.83kW 。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 2A ,电阻性分量约

797mA。若采用的线路零序 CT 变比为 150/5A, 则反应二次的电阻分量为 32mA 左右, 故 $I_{ee} > I_P \text{ DIR}$ 即可整定为 16mA。

6 CT 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, 电阻性电流比电容性电流小得多, 按照西门子公司公司的叙述, 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准确地转换电流一次值, 将不能充分发挥高精度算法的优点。

为精确测量一次电流, 西门子公司采用两项措施: 其一是如前所述在继电器中为高灵敏度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力系统电流互感器的误差 (主要是相位误差) 进行补偿。对此的分析如下:

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 5(a) 中曲线所示。因为二次阻抗已为定值, 此曲线的横坐标亦可看作是二次电流值 (按一定比例)。图 5(b) 的曲线为继电器模拟 CT 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电信值来表示。继电器只需用户输入图示的两点坐标值即可推知整条曲线的其它点的坐标。由于 CT 的二次电流相位通常超前于一次电流的相位, 即一般 CT 误差为正值, 所以继电器给出的角度误差整定范围 ($0.0^\circ \sim 5.0^\circ$) 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电流互感器的应用情况, 一般不易得到零序电流互感器的角度误差特

性, 以致不便于使用 CT 角度误差补偿 (角度误差设为 0.0°)。即便如此, 根据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度和可靠性。这亦可由第 5 节给出的例子中看出。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, 装置的灵敏度是可以满足要求的。

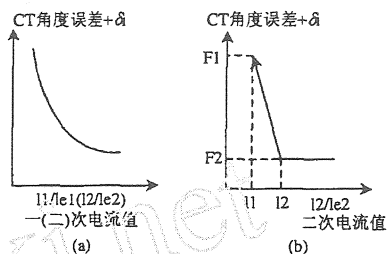


图 5 CT 角度误差与一次电流的关系

Fig. 5 The relation between angle error of current transformer and primary current

7 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保护的功能全面, 硬件的精度高, 算法优良。该系列继电器在国内运行记录及现场试验的结果也证明了其具有高灵敏性和可靠性。

参考文献

- [1] 西门子公司. 西门子 7SJ 系列微机保护继电器产品说明书[Z].
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.

收稿日期: 2004-08-11.

作者简介:

陈济良 (1963-), 男, 高级工程师, 长期从事热电厂电气工程设计工作. E-mail: chenjl@chinacuc.com

造环保产品, 做绿色企业

2004 年 9 月, 经过北京中环联合认证中心的严格评审, 顺特电气有限公司顺利通过“绿色十环标志”认证。中国的环境标志建立已经 11 年, 它引领着中国制造业全面提升环境意识, 推动了绿色经济的发展。作为一种证明性商标, 获得十环标志认证的都是各行业龙头企业的优质产品, 体现着中国制造业的先进意识。

2003 年 3 月 26 日国家环保总局实施的 HBC21-2003《环境标志产品认证技术要求干式变压器》将环氧树脂浇注干式变压器排除在外。实际上, 无论环氧树脂或 NOMEX 纸都是有机绝缘材料, 都不可能自然降解, 在运行寿命终结时都存在降解处理、回收与再生利用等问题, 环氧浇注干式变压器与敞开式干变是同类产品。目前这些产品已实现工厂化回收处理, 在环保方面不存在什么问题。为此, 顺特电气公司联合金曼克、许继、江苏华鹏等 9 家企业联名上书国家环保总局, 提出修改 HBC21-2003 标准的申请。经过慎重的研究, 2004 年 1 月 19 日, 国家环保总局发布了《环境标志产品认证技术要求干式变压器》(HBC21-2004 标准) 并于当日开始实施, 环氧树脂浇注干式变压器名副其实地进入标准。这个标准的颁布及实施肯定了干式变压器的环保性能, 为一年以来有关干式变压器环保标准的争论划上了一个圆满的句号。