

继电保护电流测量回路极性检测方法

王洪彬¹, 曾星星², 赵红³, 熊小伏³, 欧阳金鑫³, 张友强¹, 陈涛¹

(1. 重庆市电力公司电力科学研究院 重庆 渝北区 401123; 2. 国家电网公司西南分部 成都 610041;

3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 沙坪坝区 400044)

【摘要】基于电流原理的继电保护是电力系统应用最广泛的主保护装置,其测量回路异常将直接导致保护设备误动或拒动,是电力系统应尽量预防的高风险事故。极性是保护二次系统电流测量回路的重要特征,但其现有检测方法仍较繁琐复杂,而且常常出现错检漏检事件,从而严重影响电力系统的安全性和可靠性。因此,有必要研究更为简易可靠的极性检测措施以确保电流测量回路极性的正确性。为此该文定义了广义变比,建立了继电保护电流测量回路极性辨识模型,分析了测量回路综合误差对极性监测的影响,并得到了测量回路极性故障判据。仿真分析验证了该方法的有效性。

关键词 综合误差; 电流测量回路; 广义变比; 极性检测

中图分类号 TM732 **文献标志码** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2016.05.011

Polarity Detection Method of Current Measurement Circuit in Relay Protection

WANG Hong-bin¹, ZENG Xing-xing², ZHAO Hong³, XIONG Xiao-fu³, OUYANG Jin-xin³,
ZHANG You-qiang¹, and CHEN Tao¹

(1. Chongqing Electric Power Research Institute Yubei Chongqing 401123; 2. Southeast Branch of State Grid Chengdu 610041;

3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University Shapingba Chongqing 400044)

Abstract The relay protection based on the current principle is the most widely-used main-protection devices in power systems, its measurement circuit abnormality will directly lead to incorrect tripping or missoperation of protection equipment, which is the high-risk incident that power systems should be vigorously prevented. Polarity is an important characteristic in current measurement circuits of protection secondary systems, but its existing detection methods are still cumbersome and complex, and often bring wrong or leakage inspection events, which will seriously affect the safety and reliability of power systems. Therefore, it is necessary to research more simple and reliable polarity detection measures to ensure the correctness of polarity of current measurement circuits. So this paper defines the generalized ratio, and establishes a polarity diagnosis model of protection current measurement circuits, and analyzes the influence of comprehensive error of measurement circuits to the diagnosis of the polarity faults, and finally obtains the polarity fault criteria of current measurement circuits. Simulation analysis demonstrates the effectiveness of the proposed method.

Key words comprehensive error; current measurement circuit; generalized ratio; polarity detection

近年来,随着智能电网技术和数字化变电站技术的不断发展,基于新型智能电子设备、网络通信以及多测点信息综合比较判断的广域保护受到了国内外学者的广泛认可,但同时也增大了电力系统继电保护错误动作的风险。因此,有必要加强保护设备投运之前的检测工作,避免保护装置因错检漏检而造成重大损失。

电流互感器(CT)作为继电保护测量回路的重要组成部分,其极性的连接直接影响了保护的正確动作,

因此现有规程均要求CT在投运前进行离线校验和带负荷检测以确保极性的正确。目前,离线检测方法主要包括直流法、交流法和仪表法^[1]。直流法将直流电源和毫安表按相同的正负极性分别接于CT一、二次侧,根据毫安表的指针位置来判断极性。交流法则需短接相同极性端口的CT一、二次线圈,并在二次侧接交流电压,通过测量两个端口的电压与一次侧电压的关系来判断极性。仪表法利用互感器校验仪直接检测CT极性,若其指示器没有指示,

收稿日期: 2015-06-11; 修回日期: 2015-11-09

基金项目: 重庆市科技攻关项目(应用重点)(cstc2012gg-yyjsB90003)

作者简介: 王洪彬(1979-),男,高级工程师,主要从事智能电网二次系统运行、电力系统保护与控制方面的研究。

则其极性为正, 否则为负。

离线检测具有较高的精度, 但无法避免接线等造成的极性错误, 因此带负荷检测仍是确保CT极性正确的必要环节^[2]。常用的极性带负荷检测方法主要通过电流电压间相角与有功无功间相角的对比、测量差动保护的差动电流以及比较线路同名相电流相位^[3-4]。然而, 无论是离线检测还是带负荷检测, 现有方法均需要复杂接线和操作, 不仅工作效率较低, 而且容易因为人为疏忽导致漏检或错检情况出现^[5]。文献[6-7]介绍了两起变压器差动保护误动的案例, 文献[8]介绍了母线差动保护误动的案例, 其原因均是由于电流互感器极性错误, 且都造成了较为严重的停运事故。

为此, 有必要研究更加简单有效的极性检测方法以确保继电保护的可靠工作, 避免测量回路极性错误引起保护装置错误动作, 以及可能造成的区域性大面积停电事故。本文研究分析了继电保护电流测量回路极性错误的影响, 通过测量回路广义变比

的定义, 建立了基于广义变比的极性辨识模型, 从而构建了继电保护电流测量回路极性检测新方法。该方法可避免复杂接线和人工操作, 无需添加硬件, 具有精度高、易于实现的优点, 是现有互感器极性检测方法的有效补充。

1 保护电流测量回路极性故障分析

目前, 继电保护系统广泛使用的电流互感器分为电磁型和电子型, 二者并存于智能电网建设初期, 如图1所示。图1a为微机保护电流测量回路, 一次侧大电流经电流互感器变换为二次侧小电流, 再通过电缆、电流变换器、模拟低通滤波器(ALF)、采样保持电路(S/H)、多路模拟开关(MUX)和A/D转换电路转换为计算机可识别的电流采样值^[9]; 图1b为数字化保护电流测量回路, 罗氏线圈通过电磁感应关系将一次系统电流变换为二次采样电流之后, 经积分放大、低通滤波、相位补偿、A/D转换、编码、电光转换和合并单元转换为保护CPU所采用的数字量^[10]。

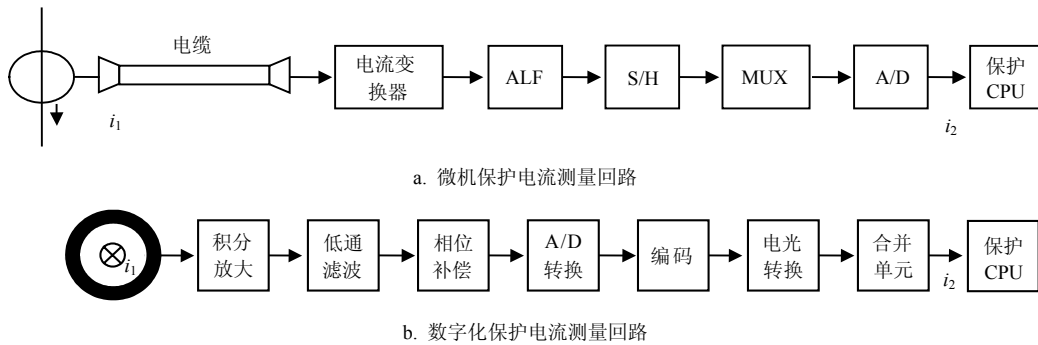


图1 继电保护电流测量回路

以上各环节与测量回路极性直接相关的主要是电磁互感器的一、二次绕组的接法和罗氏线圈的具体绕向^[9-10]。另外, 测量回路各环节维护、更换以及合并单元软件程序配置或版本升级都有可能导极性错误。一般情况下极性故障都会使保护装置误动, 而小电流支路极性错误却不易被发现, 一旦系统故障就会诱发该隐藏故障爆发。

以差动保护为例, 若接入一个节点(如母线、变压器单元等)的各支路CT极性正确, 则在正常运行及差动保护区外故障时母线保护差动电流应小于其动作电流, 有:

$$i_d = \sum_{j=1}^n i_{2j} < i_{op} \quad (1)$$

式中, i_d 为差动电流; i_{2j} 为接入母线第j条支路的二次电流; i_{op} 为母差保护动作电流。

根据文献[11], 若接入差动保护回路第k条支路电流测量回路极性接反, 即第k条支路二次电流 i_{2k} 反向, 则式(1)变为:

$$i'_d = \sum_{j=1, j \neq k}^n i_{2j} - i_{2k} = i_d - 2i_{2k} \quad (2)$$

式中, i'_d 为第k条支路回路极性接反时的差动电流。

通常情况下, 由于 $-2i_{2k}$ 的影响 i'_d 将大于 i_{op} , 保护装置动作, 进而导致母线各支路被切除, 致使接入母线所有支路用户停电。事实上, 母线本身并没发生故障, 而是其保护测量回路极性错误所导致的误跳闸。而当第k条支路为小电流支路时, 系统正常运行下, 此时 $-2i_{2k}$ 非常小, 基本不会改变差动电流的大小, 保护装置不误动; 当系统发生故障时, 此时 $-2i_{2k}$ 将远大于 i_d , 从而导致保护装置错误动作, 以致给电网造成巨大损失。

2 电流测量回路极性检测方法

2.1 电流测量回路广义变比概念

定义电流测量回路广义变比为流进CT一次侧电流与保护CPU所得二次电流的比值,用 N_g 表示,即图1所示电流测量回路首端一次系统电流 i_1 与末端保护CPU所得电流采样值 i_2 之比,有:

$$N_g = i_1 / i_2 \quad (3)$$

通常用额定变比 N 表征CT变换电流的关系,定义为一次额定电流与二次额定电流的比值。如对于二次额定电流为5 A的电磁型电流互感器,当一次额定电流为1 000 A时,选择的电磁型电流互感器的额定变比为 $N=1\ 000/5$ 。由此可得广义变比标么值,即为广义变比有名值 N_g 与其额定变比 N 的比值,表示为 n_g ,有:

$$n_g = N_g / N = (i_1 / i_2) / N \quad (4)$$

约定正常情况下,电流测量回路极性正确时, N_g 的符号为正,即 n_g 为正;当电流测量回路的极性接反时, i_2 反向、符号变化,此时 N_g 的符号变为负,即 n_g 为负。因此,电流测量回路极性异常的监视可转化为对测量回路广义变比正负符号的辨识。

2.2 电流测量回路广义变比的辨识

根据广义变比的定义,欲通过求解其辨识值检测电流测量回路极性异常情况,必先获取系统一、二次电流值。然而,工程实际中只能采集到二次电流值,因此就要解决在一次电流未知的情况下求解广义变比的问题。

实际系统中,每套保护装置特别是电流差动原理的保护,其接入电流反应了一次系统的连接关系。因此,根据一次系统拓扑关系,利用基尔霍夫电流定律,即在任一瞬时,流出(或流入)某元件电流的代数和恒等于零,即:

$$\sum i_{li} = 0 \quad (5)$$

式中, i_{li} 为流过元件第 i 条支路的一次电流。在电力一次系统中,无论是连接在母线上的各支路电流还是任意划定的多个元件组成的广义节点,始终满足上述定律。在此约定流入某广义节点电流为正,则流出为负。如图2所示, i_{11} 、 i_{12} 、 \dots 、 i_{1i} 、 \dots 、 i_{1n} 为流过广义节点 G 的某相各一次电流,经电流测量回路转换为对应保护二次电流 i_{21} 、 i_{22} 、 \dots 、 i_{2i} 、 \dots 、 i_{2n} 。根据广义变比定义得到:

$$i_{li} = N_g i_{2i} \quad (6)$$

式中, N_{gi} 为第 i 条支路电流测量回路的广义变比。将式(6)代入式(5),等式两边同时除以额定变比 N ,则任意采样时段有:

$$\sum_{i=1}^n n_{gi}^{(j)} i_{2i}^{(j)} = 0 \quad (7)$$

式中, $n_{gi}^{(j)}$ 为在采样时刻 j 下第 i 条支路电流测量回路广义变比的标么值,即为在采样时刻 j 下第 i 条支路电流测量回路广义变比的有名值 $N_{gi}^{(j)}$ 与其额定变比 N 的比值。

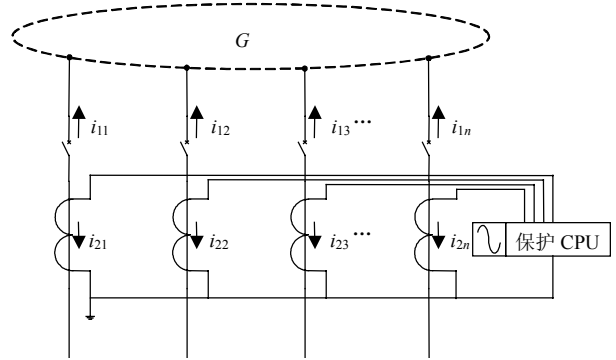


图2 基于电流原理的保护系统

设对测量回路的监视时间段为 $t_1 \sim t_m$,其中第 j 个采样时刻第 i 条支路的保护CPU计算值为 $i_{2i}^{(j)}$,每组计算值均应满足式(7),则 $m(m>n)$ 个时刻的计算值可列出如下方程组:

$$\begin{cases} n_{g1}^{(1)} i_{21}^{(1)} + n_{g2}^{(1)} i_{22}^{(1)} + \dots + n_{gi}^{(1)} i_{2i}^{(1)} + \dots + n_{gn}^{(1)} i_{2n}^{(1)} = 0 \\ n_{g1}^{(2)} i_{21}^{(2)} + n_{g2}^{(2)} i_{22}^{(2)} + \dots + n_{gi}^{(2)} i_{2i}^{(2)} + \dots + n_{gn}^{(2)} i_{2n}^{(2)} = 0 \\ \vdots \\ n_{g1}^{(m)} i_{21}^{(m)} + n_{g2}^{(m)} i_{22}^{(m)} + \dots + n_{gi}^{(m)} i_{2i}^{(m)} + \dots + n_{gn}^{(m)} i_{2n}^{(m)} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)的解为 m 个采样时刻不同广义变比的集合。然而,由于电流互感器角差一般较小^[2],各采样时刻广义变比的差别很小,利用奇异值分解法的迭代求解,可获得广义变比的平均辨识值 n_{gi} 。因此,由式(8)可得:

$$\begin{cases} i_{21}^{(1)} n_{g1} + i_{22}^{(1)} n_{g2} + \dots + i_{2i}^{(1)} n_{gi} + \dots + i_{2n}^{(1)} n_{gn} = 0 \\ i_{21}^{(2)} n_{g1} + i_{22}^{(2)} n_{g2} + \dots + i_{2i}^{(2)} n_{gi} + \dots + i_{2n}^{(2)} n_{gn} = 0 \\ \vdots \\ i_{21}^{(m)} n_{g1} + i_{22}^{(m)} n_{g2} + \dots + i_{2i}^{(m)} n_{gi} + \dots + i_{2n}^{(m)} n_{gn} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

将上式表示为矩阵形式,有:

$$A n_g = 0 \quad (10)$$

式中,

$$A = \begin{bmatrix} i_{21}^{(1)} & i_{22}^{(1)} & \cdots & i_{2n}^{(1)} \\ i_{21}^{(2)} & i_{22}^{(2)} & \cdots & i_{2n}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i_{21}^{(m)} & i_{22}^{(m)} & \cdots & i_{2n}^{(m)} \end{bmatrix}, \quad n_g = \begin{bmatrix} n_{g1} \\ n_{g2} \\ \vdots \\ n_{gm} \end{bmatrix}$$

由此, 根据奇异值理论^[12-13]可将 A ($A \in R^{m \times n}$)分解为:

$$A = SVD \quad (11)$$

式中, S 和 D 分别是 $m \times m$ 阶和 $n \times n$ 阶正交矩阵; $V = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 是对角矩阵, 其对角元素为 A 的奇异值, 并按降序排列。

计算中使采样组数 m 远大于电流测量回路数 n , 由式(5)、式(6)可知 A 的列向量是线性相关的^[14], 且当 m 足够大时, 可使 $\text{rank}(A) = n - 1$, 此时超定齐次方程组式(10)只有一个基础解, 为排除零解, 加入约束条件 $\|n_g\| = 1$ 。将式(11)代入式(10), 可得如下转换关系:

$$A^T A n_g = (SVD)^T (SVD) n_g = D^T (V^T V) D n_g = 0 \quad (12)$$

其中, 单位正交矩阵 D^T 可逆, 上式可简化为:

$$(V^T V) D n_g = 0 \quad (13)$$

式中, $V^T V = \text{diag}(\lambda_1^2, \lambda_2^2, \dots, \lambda_{n-1}^2, 0)$; $D = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T$ 。

由此可得 $D n_g = (0, 0, \dots, 0, 1)^T$, 故可解得:

$$n_g = d_n^T \quad (14)$$

式中, d_n 为正交矩阵 D 的最后一行, 即 $A^T A$ 的最小特征值所对应的特征向量。

2.3 电流测量回路极性检测判据

考虑到继电保护电流测量回路各环节误差对其极性故障诊断的影响, 可视为其二次电流采样值中引入一个综合误差项, 有:

$$i_2 = (1 + \varepsilon) i_2' \quad (15)$$

式中, i_2' 为当测量回路无误差时的二次电流; ε 为综合误差。将式(15)代入式(4)可得:

$$n_g = \frac{i_1}{i_2} = \frac{i_1 / i_2'}{(1 + \varepsilon) N} \quad (16)$$

当电流测量回路极性正确时, 一次电流与二次电流之比为额定变比, 即 $i_1 / i_2' = N$ 。由式(15)、式(16)可得:

$$n_g = \frac{1}{(1 + \varepsilon)} \quad (17)$$

当电流测量回路极性接反时, i_2' 反向、符号变化, 则 $i_1 / i_2' = -N$ 。同理可得:

$$n_g = \frac{1}{(1 + \varepsilon)} \quad (18)$$

正常运行状态下, 电流测量回路综合误差绝对

值 $|\varepsilon|$ 应小于10%^[15], 由式(18)得极性故障时广义变比的取值范围 $n_g \in (-1.111, -0.909)$ 。为使方法可靠性更高, 设定可靠系数 $r_n = 1.1$, 得极性故障判据为:

$$p_{n_g} \in (-1.23, -0.83) \quad (19)$$

根据极性故障判据的取值范围, 由2.2节所得电流测量回路 a 、 b 、 c 相各支路广义变比辨识值, 即可得如图3所示的继电保护电流测量回路极性在线诊断流程。

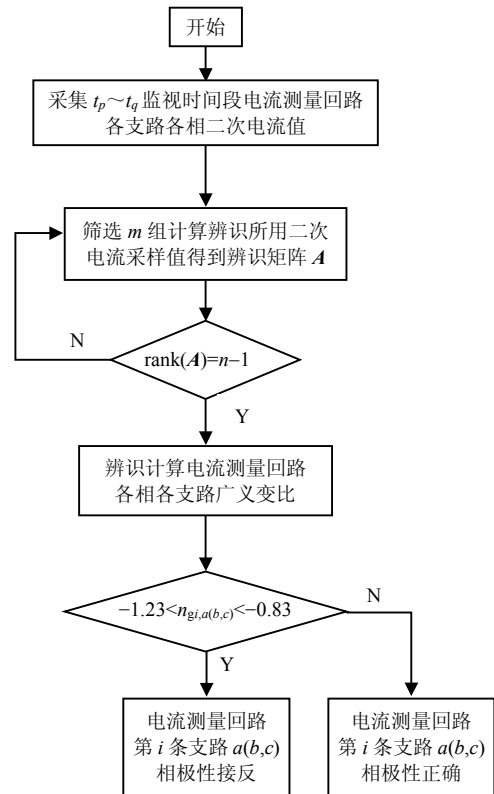


图3 继电保护电流测量回路极性检测流程

3 仿真分析

图4所示为采用PSCAD/EMTDC搭建的母线差动保护电流测量回路极性故障检测仿真系统。

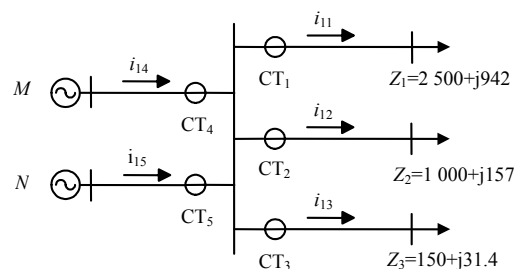


图4 母差保护测量回路极性故障检测仿真系统

图4中各电流互感器额定变比均为 $N=1\ 200/5$, 单相电源 M 、 N 相同, 其额定电压为220 kV、频率为

50 Hz, 其负载分别为 $Z_1=2\ 500\ \Omega+j942\ \Omega$, $Z_2=1\ 000\ \Omega+j157\ \Omega$ 和 $Z_3=150\ \Omega+j31.4\ \Omega$ 。

设定图4仿真系统中各支路电流测量回路综合误差为零且极性正确, 正常运行状态下, 根据图2采集图4中母线保护装置各二次电流 i_{2i} , 采样时段为0.1~0.2 s, 如图5所示。

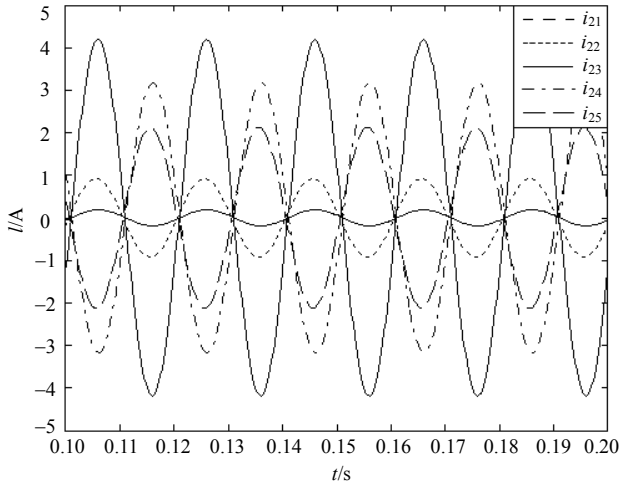


图5 仿真系统各二次电流

3.1 电流测量回路极性检测可行性分析

假定图4仿真系统 CT_1 和 CT_2 的相位误差为 0.225° 且无幅值误差。分别设定测量回路所有支路极性正常、仅 CT_1 或 CT_2 所在测量回路支路极性接反以及 CT_1 和 CT_2 所在测量回路支路极性同时接反, 根据2.2节方法计算测量回路各支路广义变比, 如表1所示。

表1 不同极性状态下的广义变比辨识值(标么值)

广义变比	各支路极性均正确	仅 CT_1 所在支路极性接反	仅 CT_2 所在支路极性接反	CT_1 、 CT_2 所在支路极性同时接反
n_{g1}	0.856 5	-0.856 5	0.856 5	-0.856 5
n_{g2}	0.922 0	0.922 0	-0.922 0	-0.922 0
n_{g3}	1.029 5	1.029 5	1.029 5	1.029 5
n_{g4}	1.000 1	1.000 1	1.000 1	1.000 1
n_{g5}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

由表1可知, 当各测量回路支路极性均正确时, 各支路广义变比符号全为正; 仅 CT_1 或 CT_2 所在测量回路支路极性接反时, CT_1 或 CT_2 所在支路广义变比符号为负, 其他支路广义变比符号为正; 当 CT_1 、 CT_2 所在测量回路支路极性同时接反时, CT_1 、 CT_2 所在支路广义变比同时变负, 其他支路广义变比符号为正。由此, 验证了可根据电流测量回路广义变比的正负符号辨识其极性故障的结论。

3.2 电流测量回路极性检测灵敏度分析

系统实际运行条件下, 电流测量回路各环节误

差不可避免, 为验证测量回路误差对极性故障诊断的影响, 在图4的仿真系统中设定 CT_1 所在支路电流测量回路极性接反且存在如表2所示的误差情况, 其中 ε 为幅值误差、 θ 为相位误差(超前为正、滞后为负)。计算 CT_1 所在支路广义变比 n_{g1} , 如表2所示, CT_1 所在支路测量回路极性接反时在不同误差下的广义变比辨识值。

表2 不同误差下的广义变比辨识值 n_{g1}

$\theta(^{\circ})$	$\varepsilon/\%$				
	-10	-5	0	+5	+10
1	-1.224 3	-1.159 7	-1.101 8	-1.049 4	-1.001 6
0.45	-1.153 1	-1.092 4	-1.037 4	-0.988 2	-0.943 2
0	-1.099 1	-1.041 1	-0.998 3	-0.944 2	-0.899 4
-0.45	-1.041 7	-0.986 7	-0.937 3	-0.892 6	-0.852 3
-1	-1.019 0	-0.963 7	-0.915 7	-0.871 7	-0.828 3

由表2可知, 电流测量回路误差对其极性故障的诊断影响非常显著。当电流测量回路极性接反时, 其广义变比的辨识值始终为负; 随着测量回路幅值误差的增大, 广义变比辨识值增大; 随着测量回路相位误差的增大, 广义变比辨识值减小。另外, 综合误差数值越大, 其广义变比辨识值偏离理想变比-1越大, 这与实际运行经验相吻合。测量回路综合误差在规程规定范围之内时^[3], 即 $\varepsilon \in (-10\%, +10\%)$, $\theta \in (-1^\circ, +1^\circ)$, 在本文研究所设定的可靠系数1.1下其广义变比辨识值满足极性故障判据。由此可见, 通过广义变比辨识值取值范围的判断可以排除测量回路综合误差对极性故障检测的影响, 从而验证了本文方法的有效性。

广义变比相对负载灵敏度定义为单位负载量变化所导致的变比值变化为:

$$K = \frac{\partial N_g}{\partial z} \quad (20)$$

设定图4仿真系统仅 CT_1 所在支路极性接反, 其幅值和相位误差分别为-10%与 1° , 逐一改变 CT_1 所在支路负载大小, 分别为 $0.5Z_1$ 、 $1.5Z_1$ 、 $1.9Z_1$ 、 $2Z_1$ 以及 $2.5Z_1$, 并统计仿真系统所有支路二次电流采样值最大值与最小值的平均倍数 f , 并判断能否诊断其极性故障。表3为本文研究的极性故障诊断方法灵敏度仿真结果。

根据表3的仿真结果可知: 即便保护系统角差和幅值误差处于极端情况下, 系统各二次采样电流最大值与最小值的平均倍数 f 高达25时, 本文方法都能正确检测出极性故障情况, 具有较高的灵敏度。

表3 极性故障诊断方法灵敏度仿真结果

负载	f	广义变比					能否诊断 极性故障
		n_{g1}	n_{g2}	n_{g3}	n_{g4}	n_{g5}	
0.5Z ₁	6.8	-1.199	1.105	0.951	0.999	1.000	能
Z ₁	13.3	-1.224	1.093	0.971	1.000	1.000	能
1.5Z ₁	19.9	-1.187	1.055	0.984	1.000	1.000	能
1.9Z ₁	25.3	-1.223	1.049	0.985	1.000	1.000	能
2Z ₁	26.7	-1.233	1.049	0.985	1.000	1.002	不能
2.5Z ₁	33.4	-1.323	1.050	0.982	1.001	1.000	不能

4 结 束 语

目前, 电力系统中二次系统测量回路极性错误问题难以避免。本文提出了继电保护测量回路的广义变比概念, 建立了继电保护电流测量回路极性诊断的数学模型, 并基于奇异值分解法提出了电流测量回路极性故障的判据, 建立了基于广义变比的继电保护测量回路极性检测方法, 通过仿真算例验证了该方法的有效性。该方法仅通过软件算法即可实现, 无需额外接线或添加硬件设备, 可以作为现有极性检测方法的补充或正确性参照, 是一种简单有效的继电保护电流测量回路极性检测新方法。

参 考 文 献

[1] GB1208-2006. 电流互感器[S].
GB1208-2006. Current transformers[S].

[2] 王裕喜. 电流互感器变比和极性的测试方法[J]. 云南水力发电, 2008, 6(3): 99-101.
WANG Yu-xi. Test method of current transformer ratio and polarity[J]. Yunnan Water Power, 2008, 6(3): 99-101.

[3] 刘文华. 关于带负荷测试母线差动保护的探讨[J]. 电力安全技术, 2006, 1(10): 28-29.
LIU Wen-hua. Discussion on the loading test of bus differential protection[J]. Electric Power Security Technology, 2006, 1(10): 28-29.

[4] 付晓奇. 带负荷试验中电流互感器的变比及极性验证方法[J]. 继电器, 2007(S1): 403-404.
FU Xiao-qi. Validating ways of current transform ratio and polarity for electrification test[J]. Relay, 2007(S1): 403-404.

[5] 俞文源. 保证零序方向元件正确接线的方法[J]. 电力自动化设备, 1996, 3(16): 58-60.
YU Wen-yuan. The method of ensuring correct wiring zero sequence directional element[J]. Electric Power Automation Equipment, 1996, 3(16): 58-60.

[6] 雷红梅, 宋光文. 变电站电流互感器极性接法的探讨[J]. 继电器, 2007, 18(1): 78-81.
LEI Hong-mei, Song Guang-wen. Discussion on polar wiring method of current transformers in substation[J]. Relay, 2007, 18(1): 78-81.

[7] 付丽梅, 程悦贤, 袁文嘉, 等. 一起保护装置内CT极性接反引起主变差动保护误动作分析[J]. 电力科学与工程, 2010, 4(5): 62-63, 78.
FU Li-mei, CHENG Yue-xian, YUAN Wen-jia, et al. Analysis and treatment on main differential protection maloperation caused by CT reverse polarity[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 4(5): 62-63, 78.

[8] 杨涌涛. 一起微机母差保护误动事故的分析及改进措施[J]. 宁夏电力, 2003, 2(15): 40-41.
YANG Yong-tao. Analysis and improvement measures on a microcomputer bus protection misoperation accident[J]. Ningxia Electric Power, 2003, 2(15): 40-41.

[9] 梁国坚. 基于母线差动保护的电子式与电磁式互感器同步应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 3(6): 97-99.
LIANG Guo-jian. Synchronous application of electronic and electromagnetic transformers for bus differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 3(6): 97-99.

[10] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 3(12): 113-118.
LUO Su-nan, TIAN Zhao-bo, ZHAO Xi-cai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 3(12): 113-118.

[11] 王洪, 及洪泉, 冯毅, 等. 独立式电流互感器的安装对继电保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 114-117, 128.
WANG Yang, JI Hong-quan, FENG Yi, et al. Effect on relay protection of installing method of independent CT[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 114-117, 128.

[12] 邓亮章. 矩阵的奇异值分解在最小二乘法问题上的新应用[J]. 南昌教育学院学报, 2010, 7(9): 43-45.
DENG Liang-zhang. The new applications of the singular value decomposition of matrix on the least squares problem[J]. Journal of Nanchang College of Education, 2010, 7(9): 43-45.

[13] 李天云, 陈昌雷, 周博, 等. 解和最小二乘支持向量机在电能质量扰动识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 34(4): 124-128.
LI Tian-yun, CHEN Chang-lei, ZHOU Bo, et al. Application of SVD and LS-SVM in power quality disturbances classification[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 34(4): 124-128.

[14] 浦奎源, 颜军, 阴文革. 线性代数[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2000.
PU Kui-yuan, YAN Jun, YIN Wen-ge. Linear algebra[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2000.

[15] 曹团结, 张剑, 尹项根, 等. 电流互感器的误差分析与工程计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 1(9): 53-56.
CAO Tuan-jie, ZHANG Jian, YIN Xiang-gen, et al. Error analysis and engineering calculation of current transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 1(9): 53-56.

编辑 漆 蓉