

# 电流互感器二次回路故障智能检测方法研究与设计实现

肖勇, 周尚礼

(广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 介绍了一种应用于负荷管理终端中对配网电流互感器 (CT) 二次开短路故障智能在线检测的技术原理和方法——导纳法, 通过检测电流互感器二次侧回路阻抗特性诊断其工作状态。详细阐述了负荷管理终端检测电流互感器故障的电子电路设计, 包括信号变换电路、信号放大电路、低通电路、带通滤波电路和交直流转换电路等。实际试验和应用实践表明, 该设计方法可准确、有效地检测各种变流比互感器不同程度的开短路异常故障, 解决了长期以来实时在线准确监测这一个难题。

**关键词:** 电流互感器 (CT); 二次侧; 负荷管理终端; 导纳法; 计量自动化; 电路设计

## Design and implementation of intelligent detection method for secondary side circuit fault of current transformer

XIAO Yong, ZHOU Shang-li

(Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Admittance method and principles of intelligent detection technology for open-short fault at secondary side of current transformer (CT) in distribution network are introduced in this paper, which is applied in load management terminals. Through detecting impedance characteristics of circuit at secondary side, the working state of CT can be judged. Furthermore electronic circuits design for secondary side circuit fault of CT is presented, which is applied in load management terminals, including signal transformation circuit, signal amplifier circuit, low-pass circuit, bandpass filter circuit and AC to DC conversion circuit, etc. The practical test and application indicate that, when measuring different variable current detection current transformer at work unusual open-short failure of different degree, the method is reliable and effective to make electric power measurement accurate, so that real-time detection and on-line monitoring correctly would be solved, which has always been a difficult issue.

**Key words:** current transformer (CT); secondary side; load management terminal; admittance method; measurement automation; circuits design

中图分类号: TM452 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0115-06

## 0 引言

电流互感器 (CT) 带电运行时二次回路侧发生故障将产生严重的安全隐患, 且影响电能计量, 主要表现为开路和短路两种状态。电流互感器运行中触点接触不良、触点损坏、人为短接或断开、互感器损坏等故障在电流回路中均可归结为开路或短路现象。测量用电流互感器故障时将直接影响电能计量的准确性, 同时二次侧不同程度的人为短路也是窃电常用手段, 开路则容易导致电力安全事故。实时检测电流回路的现场运行情况并及时处理是非常必要的。对于前面提及的故障最终均可反映为电流回路导纳(admittance) (阻抗(impedance)的倒数)值的变化, 对回路中导纳值进行实时检测, 即可对整个二次回路中的运行情况进行诊断。

近年来, 南方电网公司和广东电网公司非常重

视计量二次回路的实时运行状态监测, 大力推广计量自动化系统 (大客户负荷管理系统、配变监测计量系统、厂站电能遥测系统和低压集抄系统的合称), 并对远程负荷管理终端明确提出了应具备 CT 二次开短路的实时监测和报警功能<sup>[1-2]</sup>。广东电网公司已完成现场安装终端近 30 万台 (户), 应用效果良好。

## 1 终端 CT 二次开短路检测设计原理

当终端设备正常运行时, 其电流回路由终端产品外部的电流互感器 CT0 与终端内部电流互感器 CT1 组成, 设计中要求终端选用的电流互感器元件为双信号输出电流互感器, 一路输出作计量用 (称之为计量线圈), 一路输出作信号检测用 (称之为信号线圈)。终端电流回路二次侧开短路检测原理框图如图 1 所示。电流互感器 CT0 二次回路正常、开路、

短路三种状态变化最终可以反映到电流互感器 (CT1) 的导纳值 (阻抗值) 的变化。检测导纳值可采用在 CT1 的次级信号线圈上叠加一个外部信号的方法, 通过计量线圈反映出 CT0 的变化, 经过电路转换成直流电压后再通过 AD 采样值来判断电流回路的二次侧状态。

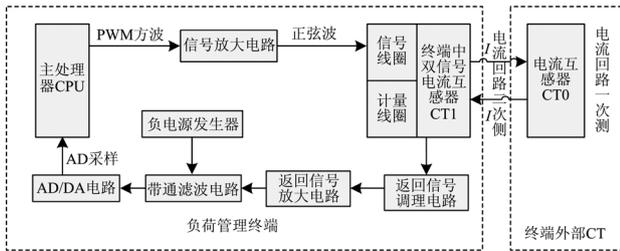


图1 终端电流回路二次侧开短路检测原理框图

Fig.1 Diagram of detection principle for open-short circuit at secondary side in current loop

## 2 终端电路设计<sup>[3-4]</sup>

### 2.1 信号变换电路 (方波转正弦波) 设计

终端信号变换电路如图2所示, 其中 PWM 波为主处理器 CPU 输出的频率 20 kHz 的方波信号, PWM 波形如图3所示。电流互感器在线性工作区域可以被看作一个恒流源, 其内阻无穷大, 二次间的输出不受二次负载阻抗变化的影响。当二次阻抗继续增大, 使得二次励磁电压达到电流互感器饱和点, 互感器工作将进入非线性区域, 励磁电流增大, 二次负荷端的电流逐渐被励磁回路分流<sup>[5-6]</sup>。

从电流互感器等效电路出发 (如图4所示), 可以得出以下误差理论公式<sup>[7]</sup>:

$$\varepsilon = -\frac{R_{ct} + jx_2' + Z_b}{R_M + jX_M} = -Y(R_{ct} + jx_2' + Z_b)$$

其中:  $R_{ct}$  为二次回路直流电阻;  $x_2'$  为一次折算到二次回路的漏抗值。

负载阻抗:

$$Z = R_{ct} + jx_2', Z_b = R_{ct} + jx_2' = |Z_b|e^{j\varphi}$$

其中:  $\varphi$  为功率角。

$$\text{励磁导纳: } Y = \frac{1}{R_M + jX_M} = G - jB$$

由此可见, 影响二次回路阻抗 (导纳) 大小的因素主要由负载阻抗和励磁特性决定。在正常情况下, 负载阻抗基本保持不变, 励磁阻抗 (导纳) 随二次励磁电压的变化而变化。

正弦波信号 (图2所示“sin”) 叠加到电流互感器 CT1 的信号线圈上, 随着电流回路二次侧 CT0 正常、开路、短路等状态的变化, 反馈到 CT1 上的导纳值也发生了变化, 即阻抗值改变, 根据图4所

示电路可知, 正弦波信号也会发生改变。

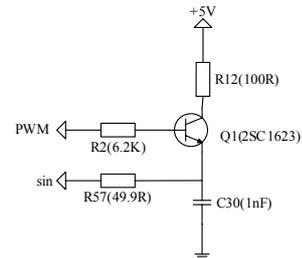


图2 信号变换电路设计图

Fig.2 Design of signal transformation circuit

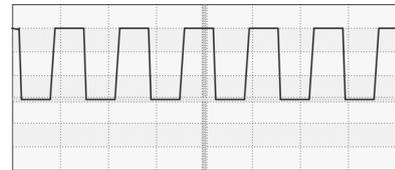


图3 PWM 方波波形图

Fig.3 Oscillogram of PWM square wave

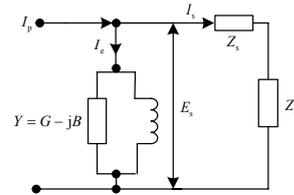


图4 电流互感器等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram of current transformer (CT)

外接不同的电流互感器 CT0, 其自身阻抗值不一样, 即正弦信号波形幅值等也不同。为了使该方法和电路能有效检测不同厂家不同变比的电流互感器, 在 R57 和 C30 取值上特别关键, 这样才能通过波形的变化检测出正常、开路、短路三种状态。图5~图7即为这三种状态的检测输出波形图, 波形频率均为 20 kHz。

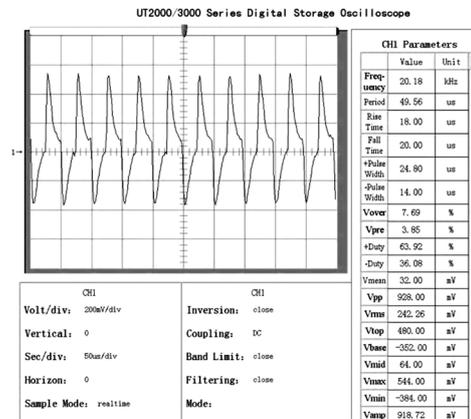


图5 正常状态下波形图

Fig.5 Oscillogram of normal state

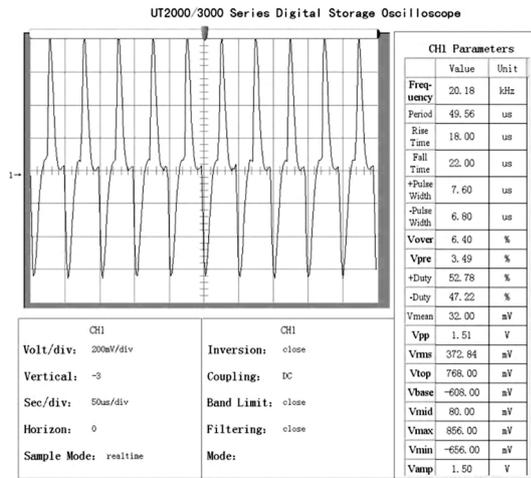


图 6 开路状态下波形图

Fig.6 Oscillogram of open circuit

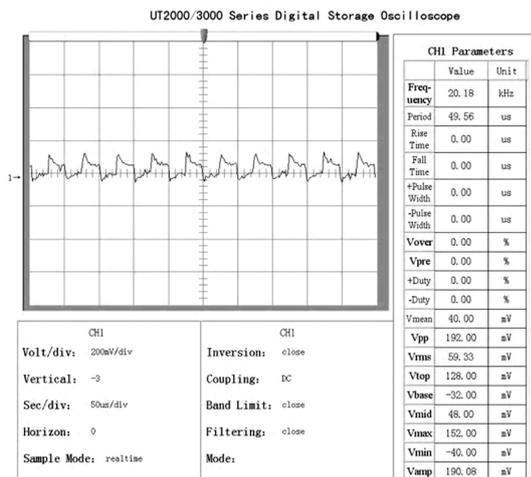


图 7 短路状态下波形图

Fig.7 Oscillogram of short circuit

## 2.2 返回信号放大和低通滤波电路设计

终端产品中的电流互感器示意图如图 8 所示, 当 PWM 方波信号经过变换电路 (图 2 所示) 给信号线圈叠加一个正弦波信号(sin), 此信号经过初级线圈再反馈到计量线圈上, 计量线圈感应出的信号幅度非常小, 并带有杂波 (其中含有 50 Hz 工频信号), 因此需先经过放大电路把信号放大 50 倍 (电路如图 9 所示), 然后进行第一级低通滤波电路进行滤波 (图 10 所示)。经过放大后的  $I_{AS}$  信号经过低通滤波后输出  $I_{out}$  波形, 其表现在正常、开路和短路状态为图 11~图 13 所示, 波形频率均为 20 kHz。

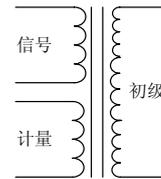


图 8 CT1 示意图

Fig.8 Schematic diagram of CT1

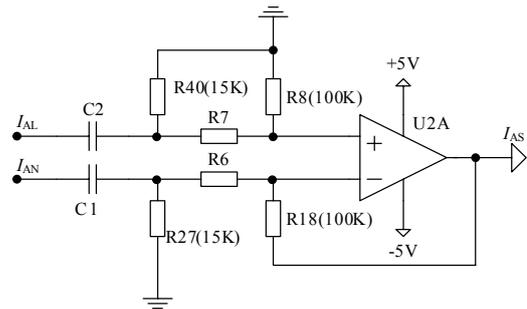


图 9 返回信号放大电路设计图

Fig.9 Amplifier circuit design of return signal

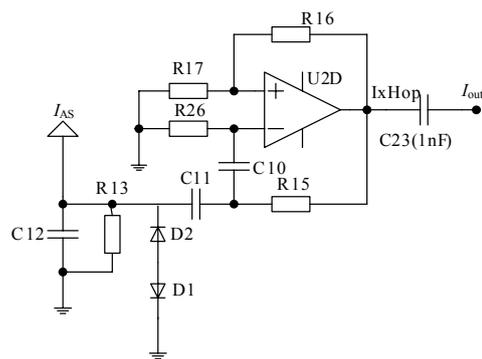


图 10 终端低通滤波电路设计图

Fig.10 Low-pass filter circuit design of terminal

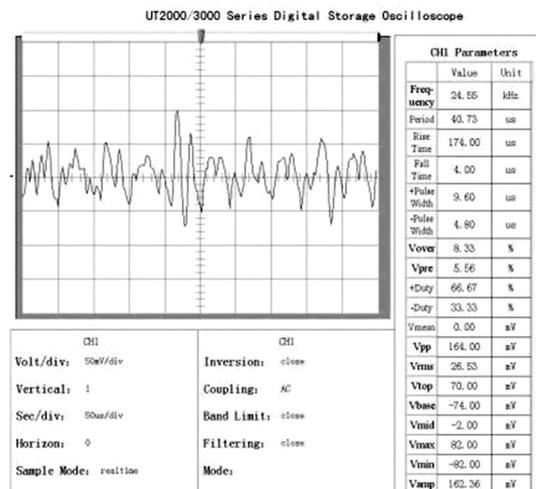


图 11 正常状态下波形图

Fig.11 Oscillogram of normal state

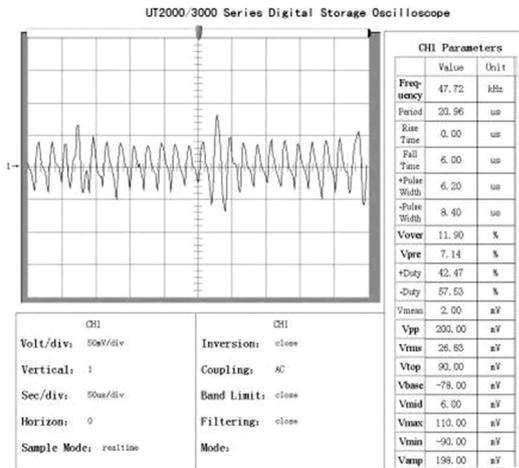


图 12 开路状态下波形图

Fig.12 Oscillogram of open circuit

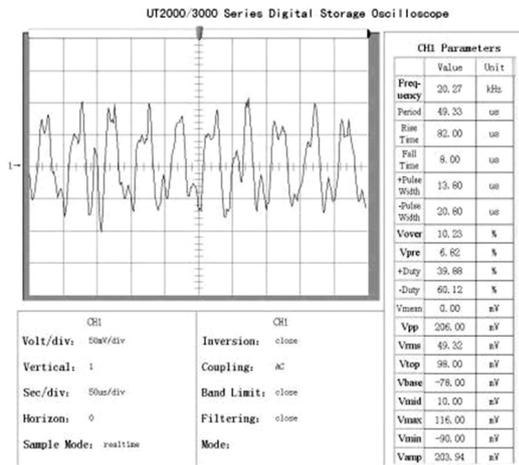


图 13 短路状态下波形图

Fig.13 Oscillogram of short circuit

### 2.3 带通滤波电路设计

带通滤波电路(图 14 所示)是导纳法检测电流回路二次侧开短路电路设计中最重要的一部分,由 MAX275(图中  $U_4$ )组成滤波电路对图 15~图 17 的信号进行滤波,根据 MAX275 电路参数进行合理配置,滤除 20 kHz 左右以外的杂波信号。由 CPU 产生的 20 kHz 方波经电流互感器 CT1 反馈放大滤波后得到相应的信号,最后由带通滤波器隔离出较好的正弦波信号  $I_0$ ,图 15~图 17 分别为电流回路二次侧正常、开路和短路的波形,从图中波形可以看出电流互感器二次侧不同状态下反馈出的波形幅值均不同,波形频率均为 20 kHz。

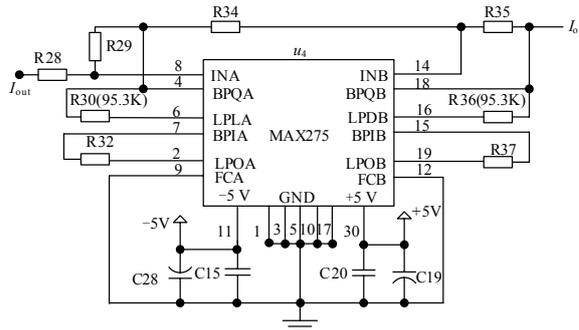


图 14 终端带通滤波电路设计图

Fig.14 Bandpass filter circuit design of terminal

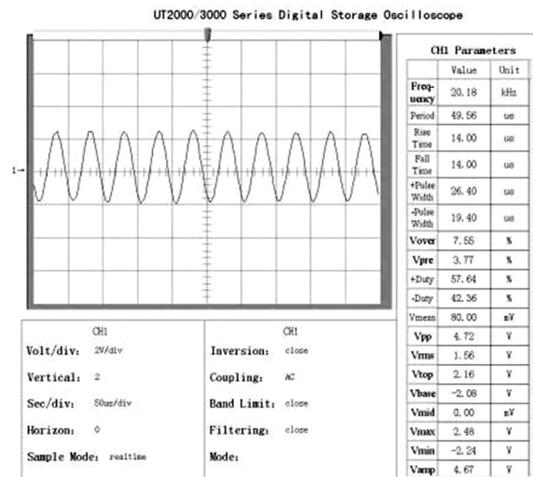


图 15 正常状态下波形图

Fig.15 Oscillogram of normal state

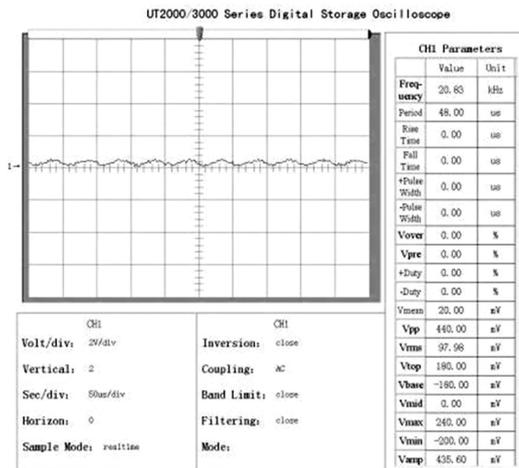


图 16 开路状态下波形图

Fig.16 Oscillogram of open circuit

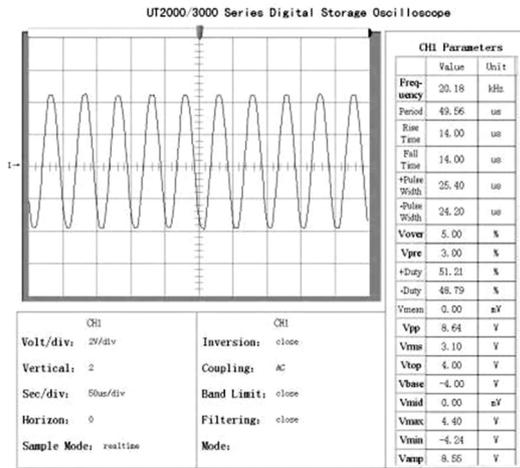


图 17 短路状态下波形图

Fig.17 Oscillogram of short circuit

## 2.4 交流转直流电路设计

经带通滤波器后的波形是标准的正弦波, 在电流回路各种状态下正弦波的幅值将不同, 再经过交流信号转直流信号通过 CPU 的 A/D 采样信号即可诊断出电流回路二次侧开短路故障。图 18 中正弦波信号转直流信号由 LM338 运放组成,  $I_0$  交流信号的幅度直接反映为  $LX_{OUT}$  直流信号电压的高低上。

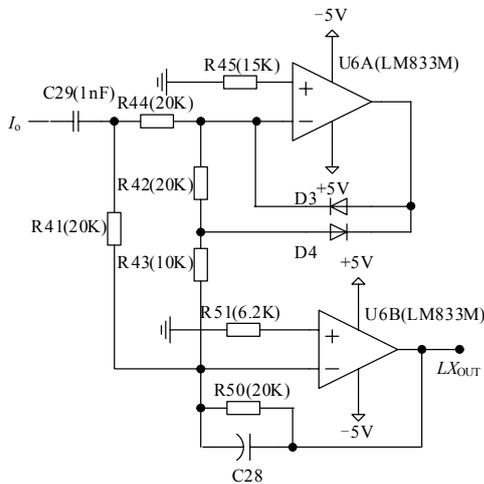


图 18 交流转直流电路设计图

Fig.18 Design of AC to DC conversion circuit

## 3 检测方法

基于终端计量用电流互感器 CT1 本身阻抗和感抗特性的一致性, 在电流回路二次侧开路状态时, 等效于电流互感器 CT0 的阻抗为无穷大, 此时 CT 开路状态由终端自身电流互感器 CT1 决定, 因此由上述检测电路输出的  $LX_{OUT}$  (图 18 所示) 与电流互感器 CT0 无关。根据电流互感器工作原理, 如果不

在电流互感器 CT1 中加入 20 kHz 方波信号, 则无法感应电流回路中二次侧开路状态下  $LX_{OUT}$  的电压值, 从而无法准确诊断。

根据上述工作原理正常接入互感器后, 加入 20 kHz 方波信号经反馈、放大和带通滤波后产生如图 15 所示的标准正弦波信号, 但因不同电流互感器 CT0 型号和变比不同, 其阻抗值也不同, 正弦波信号的幅值也会发生变化, 但正常运行时  $LX_{OUT}$  信号幅值都大于开路时的电压值, 因为可以区分于 CT 开路和正常两种状态。但对于 CT 二次侧短路则根据不同短路条件 (程度) 情况将有所不同 (如短路 15%、30% 的电流值), 对 CT 二次侧短路时原则上对电流互感器 CT0 的导纳值都发生了大的改变, 即等效于 CT0 二次侧用导线短路, 反馈信号基本固定一致 (如图 17 所示)。因此在 CT 开路和短路比较固定的情况下, 对判断 CT 的状态有较高的灵敏性。

主处理器 CPU 的 A/D 为 10 位采样精度, 测量范围 0~3.3 V, 根据上述电路设计, 在短路时  $LX_{OUT}$  输出 1.8 V, 开路时输出 0.2 V, 在电流回路 CT 正常时, 输出与电流互感器 CT0 有关, 介于 0.4~1.4 V 之间。因此根据 CPU 所采样的  $LX_{OUT}$  电压值能判断出 CT 正常、开路和短路三种状态, 具有较高的分辨率。

## 4 实验结果

在实验中, 选择了三个厂家 6 种型号的互感器作为电流互感器 CT0, 如表 1 所示。

表 1 实验选用的电流互感器

Tab.1 CT selected in our experiments

序号	互感器生产厂商	参数
1	中山市和泰机电厂	变流比: 200 A/5 A
2	中山市和泰机电厂	变流比: 200 A/5 A
3	西安三星互感器厂	变流比: 75 A/5 A
4	西安三星互感器厂	变流比: 100 A/5 A
5	上海红光互感器厂	变流比: 100 A/5 A
6	上海红光互感器厂	变流比: 200 A/5 A

针对上述 6 种电流互感器进行连续模拟检测实验, 呈现的测试波形如图 19 所示。电流回路二次侧开路时  $LX_{OUT} = 0.2$  V, 正常接入互感器时  $LX_{OUT}$  为 0.4~1.4 V 之间, 电流回路二次侧短路时  $LX_{OUT} = 1.8$  V。根据输出电压幅值即可判断出其处于何种状态。

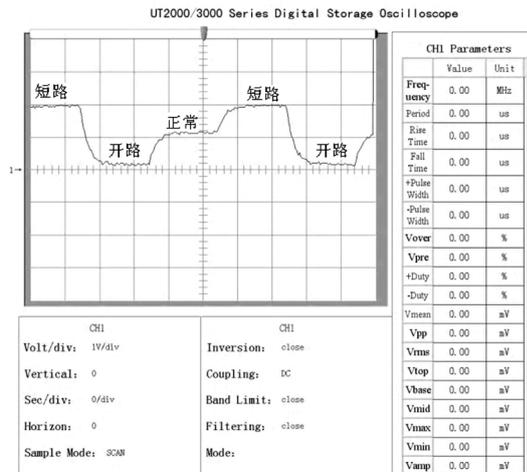


图 19 电流互感器二次侧回路正常、开路、短路状态下电压波形图

Fig.19 Voltage waveform of normal state, open circuit and short circuit at secondary side in current loop of CT

### 5 总结

本文从电流互感器工作机理、导纳法检测原理、终端具体电路设计等方面详细分析了导纳检测法应用于负荷管理终端等设备中，用以对电流互感器二次回路正常运行和故障情况下状态的实时智能诊断设计。经过大量的实验室试验以及现场应用表明，该设计方法是可行而有效的，其可以在电流互感器运行在轻载和超载（互感器正常计量范围内）都能准确检测。导纳法在电流回路二次侧开短路中的应用可以帮助发现二次回路的故障、减少电能损失和安全事故的发生。为提高实时检测的效率，终端设备还应同时监测同一计量回路电能表电能数据，进行相关数据实时比对，对回路中电气参数也应进行较长期的监测并记录学习。

### 参考文献

[1] 中国南方电网有限责任公司. Q/CSG 1 0016-2007, 负荷管理系统通用技术条件[Z]. 2007.

China Southern Power Grid, Q/CSG 1 0016-2007, power load management system technical specifications[Z]. 2007.

[2] 广东电网公司. Q104-0026-0903-5147, 广东电网公司负荷管理系统技术规范[Z]. 2009.

Guangdong Electric Power Grid. Q104-0026-0903- 5147, Guangdong electric power load management system technical specifications[Z]. 2009.

[3] 张涛. 电力电子技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

ZHANG Tao. Power Electronic Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

[4] 王卫东. 高频电子电路[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2009.

WANG Wei-dong. High frequency circuit[M]. Second Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.

[5] 国家标准化管理委员会. JJG313-1994, 测量用电流互感器检定规程[Z]. 1994.

Standardization Administration of the People's Republic of China. JJG313-94, verification regulation of current transformers of measuring service[Z].1994.

[6] 陈向群. 电能计量技能考核培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

CHEN Xiang-qun. Electric energy measurement skills examination training textbook[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[7] 兰世红, 等. 导纳法在二次回路故障监测中的应用分析[J]. 电测与仪表, 2007 (3).

LAN Shi-hong, et al. Application analysis of admittance method used for fault monitoring of secondary loops[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2007(3).

收稿日期: 2010-04-19; 修回日期: 2010-05-15

#### 作者简介:

肖 勇 (1978-), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电能计量、计量自动化、电测仪表技术研究和管理工作; E-mail: xiao14@sina.com

周尚礼 (1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 电测所所长, 主要从事电能计量、高压技术研究与管理工。

(上接第 110 页 continued from page 110)

[10] Mears M L, Falcon J S. Real-time identification of sliding friction using LabVIEW FPGA[C].//2006 American Control Conference. Minnesota(USA):2006.

收稿日期: 2009-08-20; 修回日期: 2009-09-28

#### 作者简介:

肖庆亮 (1985-), 男, 硕士, 研究方向为光纤电力传感技术与虚拟仪器技术; E-mail: xiaoyao.ql@163.com

李传生 (1984-), 男, 博士, 研究方向为光纤电力传感技术;

张朝阳 (1981-), 男, 博士, 研究方向为光纤传感技术。