

DOI: 10.7667/PSPC160162

高速铁路牵引变电所 220 kV 干式电流互感器 介质损耗值在线监测研究

邓建峰

(新乡供电段, 河南 新乡 453000)

摘要: 为了解决离线预防性试验监测京广高铁牵引变电所 220 kV 干式电流互感器存在的诸多问题, 依据绝缘介质的物理模型, 采用过零监测比较法, 设计一套 220 kV 干式电流互感器实时在线监测装置。在设计过程中, 认真分析了电流传感器、高次谐波、过零比较器失调电压和零漂以及环境温湿度等因素对 $\tan\delta$ 值测量精度的影响。并针对影响精度的不同因素, 提出了相应的技术改进措施。现场运行情况表明, 装置实时在线监测 $\tan\delta$ 值结果与设备离线实测结果完全吻合, 且运行稳定, 工作可靠, 满足现场运行的要求。

关键词: 220 kV 干式电流互感器; 在线监测; 介损; 测量准确度; 过零检测比较法

Research on high speed railway traction substation 220 kV dry type current transformer dielectric loss value on-line monitoring

DENG Jianfeng

(Xinxiang Power Supply Bureau, Xinxiang 453000, China)

Abstract: In order to solve some problems of the off-line preventive test monitoring of Beijing-Guangzhou high-speed rail traction substation 220 kV dry type current transformer, and on the basis of the insulation dielectric loss of physical model, this paper uses the zero monitoring comparison method and designs a set of 220 kV dry type current transformer real-time online monitoring device. In the design process, it carefully analyzes influence on the $\tan\delta$ value measurement precision caused by current sensor, high order harmonic, zero-crossing comparator offset voltage, zero drift, environmental temperature and humidity, etc. According to the different factors influencing the accuracy, the corresponding technical improvement measures are put forward. Field operation shows that the $\tan\delta$ value results of real-time online monitoring accord with that of offline measurements, it has stable running and reliable work, and can meet the requirements of field operation.

Key words: 220 kV dry type current transformer; on-line monitoring; dielectric loss; measurement accuracy; zero-crossing detection comparison

0 引言

郑州铁路局新乡供电段管辖的石武高铁牵引变电所, 自 2012 年 6 月开始带电运行至今, 卫辉、鹤壁东、新集 3 个牵引变电所 220 kV 干式电流互感器先后发生 3 次事故, 特别是 2013 年 7 月 19 日 16 时, 鹤壁东变电所电流互感器 1LH·C 相二次绕组绝缘击穿, 事故造成京广高铁鹤壁至安阳间供电中断, 给石武高铁的安全运营带来严重影响。针对这种干式电流互感器的结构, 按照目前干式电流互感器常规的离线监测方法, 该型电流互感器所有的试

验项目都合格, 却发生了运行中的 220 kV 干式电流互感器绝缘击穿事故, 说明现有的离线监测手段无法检测到该型电流互感器内部绝缘放电现象。如何及时、准确、迅速地判断干式电流互感器的运行状态, 确保高铁供电安全, 做到防患于未然, 需要寻找一种新的方法, 实现对高速铁路牵引变电所 220 kV 干式电流互感器运行状态实时在线监测^[1-2]。

1 绝缘介损在线监测原理

电气设备绝缘介损 $\tan\delta$ 值是检测设备绝缘受潮、劣化等状态的重要指标, 是“高速铁路牵引变

电所运行检修规程”^[3](铁运总【2015】48号)规定的预防性绝缘试验主要项目之一。图1为绝缘介损 $\tan\delta$ 值的等值电路与相量图。

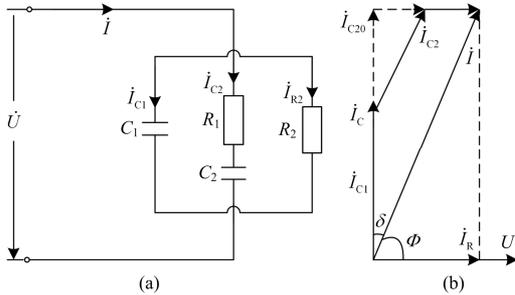


图1 绝缘介损 $\tan\delta$ 值的等值电路与相量图

Fig. 1 Equivalent circuit and phasor diagram of $\tan\delta$

根据图1(a)等值电路,可以得到绝缘介损 $\tan\delta$ 值数学表达式:

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R_F}{\omega UC_F} = \frac{1}{\omega R_F C_F} \quad (1)$$

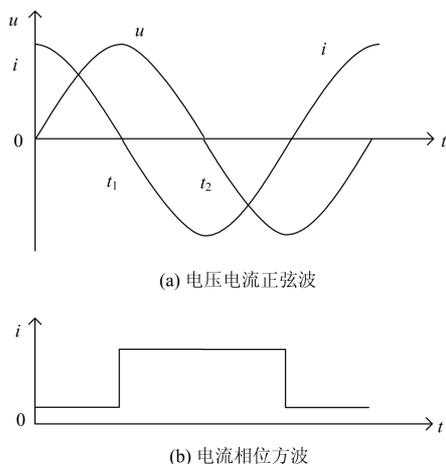
按照图1(b)所示电压 \dot{U} 和电流 \dot{i} 的矢量关系,还可以得到:

$$\tan\delta = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad (2)$$

式中, φ 为电压矢量 \dot{U} 和电流矢量 \dot{i} 之间的夹角,即功率因数角。

尽管绝缘介损因数 $\tan\delta$ 数值很小,测试相当困难,但是,上述计算表达式从理论上提供了通过测量电压 \dot{U} 和电流 \dot{i} 的之间的功率因数角 φ 来获取 $\tan\delta$ 的途径。

按照上述理论,可通过计算加在绝缘介质上两个正弦信号过零时的时间差值求出信号的相位差,进而得到介质损耗值,如图2所示。



(a) 电压电流正弦波

(b) 电流相位方波

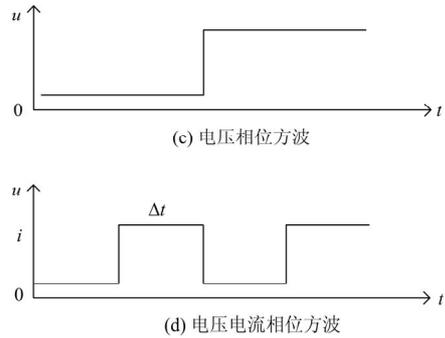


图2 过零比较法原理图

Fig. 2 Diagram of zero-crossing comparison

过零比较法是最早应用数字化技术对绝缘介损值进行测量较为成功的一种方法^[4],主要原理是对施加到绝缘介质上的电压 \dot{U} 及电流 \dot{i} 的过零时刻 t_1 、 t_2 值进行比较,二者的相位差表达式为

$$\varphi = 2\pi(t_2 - t_1)/T \quad (3)$$

式中, T 为周期,从而求得介损角

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (4)$$

如图2(a)所示,加在绝缘介质上的原始电压、电流信号间存在一个相位差,如能通过采样电路采集到如图2(b)所示的电流信号的过零点,如图2(c)所示的电压信号的过零点,就能通过数字逻辑电路得到如图2(d)所示的宽度为 Δt 的方波信号。方波信号的宽度反映了电流及电压信号的相位差,测量出脉冲宽度 Δt ,即可求得介质损耗值 $\tan\delta$,其表达式为

$$\tan\delta = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \cos\varphi = \cos\frac{2\pi\Delta t}{T} \quad (5)$$

该测量方法具有线性好、分辨率高、误差小、易数字化的优点,但是由于存在着谐波分量,电压、电流的过零点可能会发生改变,导致信号过零点偏移而存在测量误差。影响因素主要有:谐波的频率、畸变率、初相角及温度,其中波形畸变和温度引起的零线漂移导致信号过零点偏移最为严重,在一定程度上限制了该方法的应用^[5]。上述测量方法存在的弊端,可通过滤波移相电路和双向过零检测技术消除。

干式电流互感器内部存在放电隐患时,必然会产生绝缘体温度升高、泄漏电流增加、 $\tan\delta$ 值急剧变化等物理特征,利用上述绝缘介损在线监测原理,设计一套在线监测装置,采用高精度的微电流传感器提取干式电流互感器内部放电引起的绝缘体温度变化、泄漏电流等技术参数,运用数学方法进行数

据处理及逻辑诊断,就可实现对 220 kV 干式电流互感器运行状态进行实时在线监测,从而方便技术人员跟踪管理,及时采取应急措施,保证高铁供电安全可靠。

2 在线监测系统总体设计

设计的 220 kV 电流互感器绝缘在线监测系统原理图如图 3 所示。现场测量与处理单元接收的信号主要来自母线 TV 信号变换器、泄漏电流传感器、绝缘材料内部温度传感器,经信号调理电路处理后,传送到数字电路模块、控制显示、报警等电路。其中 TV 信号变换器为纯阻性,产生的 TV 电压信号作为监测信号的相位基准参考值;电流信号是运用精密的泄漏电流传感器测量 220 kV 干式电流互感器绝缘末屏的泄漏电流;绝缘材料温度信号来自预埋在 220 kV 干式电流互感器绝缘材料中三个不同位置的温度传感器。电压、电流和温度信号经过调理电路后实现模拟信号的放大、滤波,其作用是消除高次谐波干扰,将模拟信号放大到高速数据采集模块(A/D)采样的最佳范围。数字电路模块实现数据的采集、计算、存储等功能,是整个在线监测系统处理单元的核心。显示电路在液晶显示屏上显示当前介损、泄漏电流、绝缘电容、绝缘材料温度的大小,当在线监测装置监测到上述监测值超过设定的安全阈值时发出报警声音。现场测量与处理单元计算得到的监测数通过 RS485 接口上传。

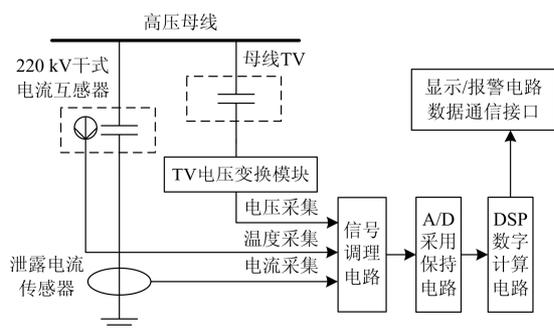


图 3 220 kV 电流互感器在线监测装置原理图

Fig. 3 On-line monitoring device diagram of 220 kV current transformer

3 影响测量精度的关键技术及其解决方法

3.1 末屏微电流信号的精确提取

在线监测系统主要是通过监测绝缘泄漏电流的大小来判断 220 kV 干式流互内部放电情况,因此,泄漏电流传感器的性能对测量容性设备介质损耗的精度和可靠性至关重要^[6-7]。为保证信号的取样和电气设备的运行安全,泄漏电流传感器一般采用

穿芯结构,但如电流互感器(CT)、电压互感器(PT)这类的电气设备,它们自身的泄漏电流均在 mA 级,数值很小,传统的无源传感器根本无法保证相位变换误差的精确度、稳定性,难以满足在线测量要求。采用有源零磁通技术来提高小电流检测精度是最好方案。

为解决此问题,设计时可选用电磁式穿芯小电流传感器。电流传感器的铁芯要选用损耗小、起始导磁率高的坡莫合金,为了能够实现对铁芯全自动补偿,还要采用独特的深度负反馈技术,使铁芯在理想的零磁通状态下工作^[8-9]。工程使用表明,这种穿芯结构(孔径 25 mm)传感器的设计不仅更能保证被测电气设备的安全运行,而且能够准确检测 100 μ A~700 mA 的工频电流,相位变换误差也小于 0.01°,基本上不需要任何修改或校正。而且,它具有极好的电磁场抗干扰能力和温度特性,互换性极强,完全能满足高速铁路牵引变电所复杂的电磁环境下设备取样的精确度。

3.2 谐波的治理

过零点的测量是过零比较法测量介质损耗角的关键,要求极高,波形畸变对测量精度的影响极大。由于电力系统中各种非线性元件以及牵引负荷电力机车的影响,牵引变电所 3 次及以上高次谐波含量丰富,这些谐波将导致电流波形发生畸变,使电流过零点产生漂移,从而影响 $\tan\delta$ 的测量结果。

为解决高次谐波导致电流波形发生畸变,可设计一个三阶的低通滤波器,低通滤波器的截止频率设定为 50 Hz,过滤掉电网上的谐波,但滤波器会引起相移误差。相角测量准确度对 $\tan\delta$ 的测量结果影响极大,为达到更好的相频特性,可在滤波电路前加移相电路,以保证电流波形经过滤波移相电路后,相位不发生改变。具体电路如图 4 所示。

硬件滤波可以将大量高次谐波滤除,但滤波之后信号波形依然有一定含量的低次谐波,硬件很难用滤波的方法将基波准确分离,可在软件算法上采用高精度 FFT 算法对波形进行处理。由于其内在的正交性,FFT 算法可以精确地从畸变波形中提取出基波信号,计算速度也很快。

图 5 为设计的在线监测装置现场运行时滤波前后的信号波形。图 5(a)为滤波前的信号波形,图 5(b)为滤波后的信号波形。

3.3 过零比较器失调电压和零漂的克服

在线监测设备一般室外安装,较大的温差以及其他一些因素引起的直流分量会引起过零比较器的失调电压及零漂,从而严重影响 $\tan\delta$ 的测量精度,可采用双向过零检测技术来克服零漂的影响。在软

件设计中, 假设温漂使信号零线上移, 如果用正向过零检测, 则两个信号的过零时间差 Δt 会变小; 如果用负向过零检测, 则两个信号的过零时间差 Δt 会

变大, 取两者平均值则可使测量值更接近于真实值^[10-11]。图 6 为在线监测装置现场运行时电压、电流相位方波。

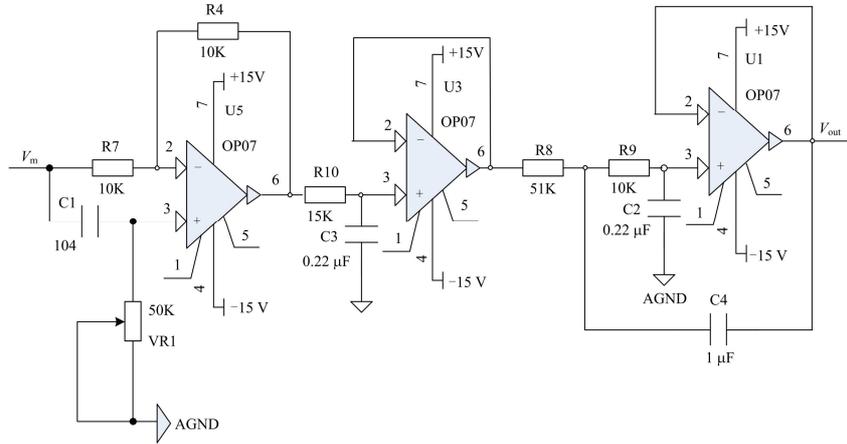
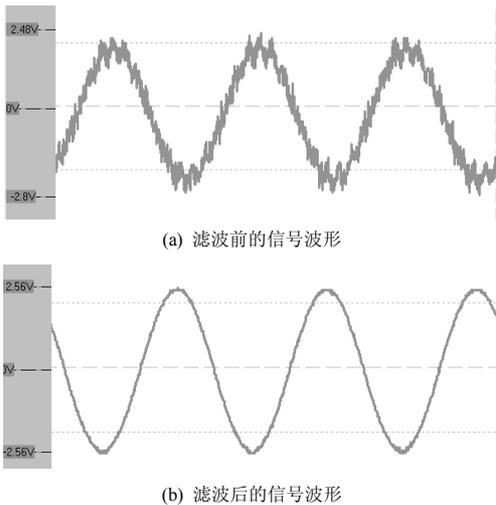


图 4 滤波移相电路

Fig. 4 Filter phase shift circuit



(a) 滤波前的信号波形

(b) 滤波后的信号波形

图 5 在线监测装置现场运行时滤波前后的信号波形

Fig. 5 Waves of before and after filtering using online measurement device

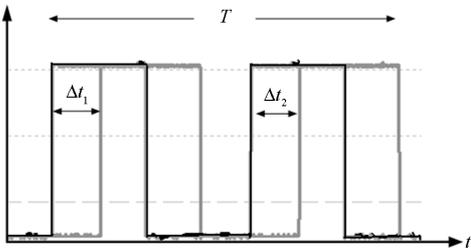


图 6 装置现场运行是电压电流相位方波

Fig. 6 Phase square waves of voltage and current at filed

黑色方波是电流相位波形, 灰色为电压相位波形, 图 6 中所示为装置现场运行示波器记录下的一

个周期的波形, Δt_1 为负向过零监测时刻差, Δt_2 为正向过零监测时刻差。由绝缘介损过零比较监测原理, 得介损计算式为

$$\tan \delta = \tan \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \cos \frac{\pi(\Delta t_1 + \Delta t_2)}{T} \quad (6)$$

最后, 考虑到在线监测装置长期在户外工作, 装置运行的温湿度会影响数据测量、传输和计算的准确性, 可在装置内部安装温湿度控制器, 对试品周围环境温湿度进行实时监测, 当现场温湿度过低或过高时, 启动加/散热装置, 保证监测装置运行在一个相对恒定的温度中, 提高数据测量的可靠性和准确性。装置成品设计时, 由于通常现场监测设备所处的电磁环境相当恶劣, 因此, 需将电路板封闭在金属壳内, 以有效屏蔽外部电磁干扰的影响。

4 干式电流互感器 $\tan \delta$ 实时在线监测情况

按照上述 220 kV 干式电流互感器监测原理以及要解决的影响测量精度的关键技术, 我们成功的研制了一套绝缘在线监测装置。目前, 该装置已经在京广高铁鹤壁东牵引变电所运行, 实现了对运行 220 kV 干式电流互感器的实时监测。为验证在线监测数据, 我们使用 QS1 双臂电桥对离线的 220 kV 干式电流互感 $\tan \delta$ 进行测试, 两组测量数据如表 1 所示。

由表 1 可知, 在线监测装置测量的 $\tan \delta$ 值与离线实测的 $\tan \delta$ 值的最大相对误差为 1.25%, 平均相对误差为 0.795%, 如此小的误差完全可以用在线装置代替试验仪器, 实现对 220 kV 干式电流互感器运行状态的实时在线监测。

表 1 在线监测 $\tan\delta$ 值与离线实测值比较
Table 1 Comparison of $\tan\delta$ values between on-line measurement and off-line measurement

序号	停电实测值(%)	在线装置测量值(%)	相对误差(%)
1	0.21	0.212	0.95
2	0.24	0.237	1.25
3	0.20	0.199	0.50
4	0.21	0.209	0.48
均值	0.215	0.214	0.795

5 结语

本文针对高铁牵引变电所 220 kV 干式电流互感器常规的预防性监测手段无法检测到其内部绝缘放电现象, 结合绝缘介损在线监测原理, 设计了 220 kV 干式电流互感器 $\tan\delta$ 实时在线监测方案, 并研制了一套绝缘在线监测装置。该装置采用过零检测比较法来测量 CT 绝缘介损变化, 监测装置硬件采用高精度传感器、温度传感器等数字电路设计, 消除了影响在线监测系统装置准确度的各种因素, 保证在任何干扰下实时、准确的监测 220 kV 干式电流互感器的 $\tan\delta$ 值。研制的在线监测装置在京广高铁鹤壁东牵引变电所投入运行以来, 性能稳定, 监测精度高, 在线监测结果与实测结果完全吻合。

参考文献

- [1] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.
XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.
- [2] 董爽, 李天云, 王永, 等. 在线检测介质损耗角的矩阵束方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 229-236.
DONG Shuang, LI Tianyun, WANG Yong, et al. An on-line detection method of dielectric loss angle based on matrix pencil algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 229-236.
- [3] 中国铁道总公司. 高速铁路牵引变电所运行检修规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [4] 马为民, 吴维韩. 便携式数字介质损耗测量仪的研究[J]. 高电压技术, 1996, 22(1): 92-95.
MA Weimin, WU Weihuan. Portable digital instrument of $\tan\delta$ measurement[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(1): 92-95.
- [5] 崔恒斌, 冯晓云, 林轩, 等. 车网耦合下高速铁路牵引网谐波谐振特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 54-64.
CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, LIN Xuan, et al. Research on harmonic resonance characteristic of high-speed railway

- traction net considering coupling of trains and traction nets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 54-64.
- [6] 李振华, 李红斌, 张秋雁, 等. 一种高压电子式电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 229-236.
LI Zhenhua, LI Hongbin, ZHANG Qiuyan, et al. A high voltage electronic current transformer online calibration system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 229-236.
 - [7] 靳继勇, 杨淑梅, 周宏晶. 电容型电气设备介质损耗在线监测装置系统的设计[J]. 电气应用, 2012, 31(12): 58-62.
JIN Jiyong, YANG Shumei, ZHOU Hongjing. Design of dielectric loss on line monitoring device for capacitive type electrical equipment[J]. Electrotechnical Application, 2012, 31(12): 58-62.
 - [8] 周末, 王果, 常文寰, 等. 适于电气化铁路的三相两臂混合有源补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 100-104.
ZHOU Mo, WANG Guo, CHANG Wenhuan, et al. Study on hybrid active compensation based on three-phase two-leg inverter for electrification railway[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 100-104.
 - [9] 王奇, 刘志刚, 白玮莉, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的牵引供电系统仿真模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 35-40.
WANG Qi, LIU Zhigang, BAI Weili, et al. Research on the simulation model of traction power supply system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 35-40.
 - [10] 张民, 何正友, 高仕斌. 不同负荷模型下高速铁路牵引供电系统谐波谐振敏感度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 21-28.
ZHANG Min, HE Zhengyou, GAO Shibin. Harmonic resonance modal sensitivity analysis for high-speed railway traction supply system considering different harmonic load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 21-28.
 - [11] 刘家军, 姚李孝, 刘小勇, 等. 基于牵引供电微机远动综合实验系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 116-118.
LIU Jiajun, YAO Lixiao, LIU Xiaoyong, et al. Design and realization based on comprehensive experimental system for traction power supply and microcomputer telecontrol[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 116-118.

收稿日期: 2016-01-28; 修回日期: 2016-03-05

作者简介:

邓建峰(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高速铁路供电的研究与应用工作。E-mail: 8412770@qq.com

(编辑 张爱琴)