

新一代避雷器在线监测装置的研制

针对目前避雷器在线监测传感器数据交互普遍存在规约私有, 传输距离近、通信速率低、可靠性差且易受到干扰损坏等情况和不能适用于电子互感器应用场合的问题, 设计了一种新型避雷器在线监测装置。该装置由前端电流采集单元和后端数据处理单元两部分组成。前端就地电流采集单元的数据通过光纤FT3格式传输至后端数据处理单元。后端数据处理单元通过对采样值数据进行处理实现避雷器监测功能。实验及现场运行表明, 装置运行性能稳定, 可靠性高, 能同时满足常规变电站和智能变电站的应用场合。

曾国辉 路光辉 王伟杰 梁武民 雍明超/许继电气股份有限公司

0 引言

避雷器是一种过电压限制器, 用以保护电气设备。氧化锌避雷器具有优越的保护性能, 并且性能稳定、抗老化能力强, 能适用严重污染和高海拔地区, 已广泛应用于变电站、GIS等领域, 大大提高了电力系统的安全性。目前采用的氧化锌避雷器大多不带间隙, 这样氧化锌阀片长期直接承受工频电压, 运行期间总有电流流过阀片, 另外再加上冲击电压、密封不严及内部受潮等因素的作用, 会引起避雷器阀片的老化、阻性泄漏电流增加和功耗加剧, 从而导致避雷器阀片温度上升而发生热崩溃, 严重时, 甚至引起避雷器的爆炸事故。因此, 为了保证电力系统的安全运行, 对避雷器进行在线监测实时了解其运行状态, 及时发现避雷器的异常和事故隐患是十分必要的。

目前避雷器在线监测装置电流和电压采样的信号同步普遍通过电压采集单元发送同步脉冲对系统中各泄漏电流采

集单元进行同步, 同时将计算的母线电压向量以RS 485方式送至各泄漏电流采集单元, 各泄漏电流采集单元通过对自身采集的泄漏电流和经过同步采样的电压向量进行处理, 实现阻性电流等监测参量的计算, 最后以RS 485形式上送至IED, 由IED判别避雷器的绝缘状况。这种方法仅适用于采用常规TV输入的电压信号, 无法适用于电子式互感器。同时, 通过向量传输无法实现避雷器相位补偿, 纵横比等多算法的融合, 且RS 485通信规约存在可靠性差和抗电磁干扰能力弱等问题。在此背景下, 研制了这种避雷器在线监测装置。

1 装置整体方案

装置包括电流采集单元和数据处理单元两部分。电流采集单元将采集到的避雷器泄漏电流信号和雷击计数信息经就地处理以FT3采样值方式通过光纤传输到避雷器数据处理单元(避雷器监测IED)。FT3是一种链路层的传输帧格式, 是IEC 60044-8电子式电流互感器标准里规定使用的帧格式^[1]。

数据处理单元可接收电流采集单元输出的FT3信号, 合并单元输出FT3或SV格式的电压信号, 同时还具备常规TV信号接入端口, 用于接入常规电压信号。电流电压同步通过额定延时, 采用插值重采样实现。由于采用采样值传输, 可支持多种算法对数据的处理, 且装置直接支持以DL/T 860规约与站端单元通信。

避雷器监测整体方案图如图1所示。



曾国辉/工程师

关键词/Keywords

避雷器·
在线监测·
故障诊断·
阻性电流·

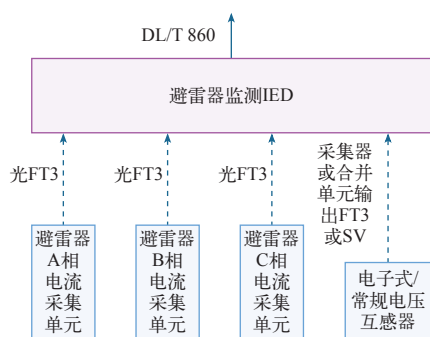


图1 避雷器监测整体方案图

2 电流采集单元设计

2.1 电流采集单元硬件结构

电流采集单元主要实现采集避雷器泄漏电流和雷击计数功能。硬件示意及实物分别如图2和图3所示。

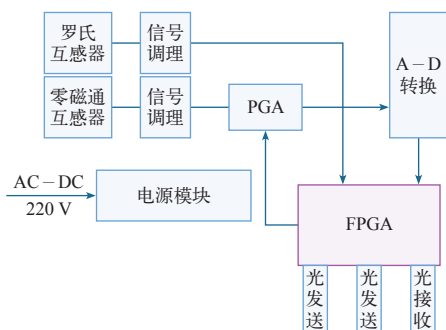


图2 电流采集单元硬件结构图



图3 电流采集单元

泄漏电流信号采集采用高准确度无源零磁通穿心式互感器，可测量微安级微弱信号，具有良好的线性关系，完全满足避雷器泄漏电流的测量功能。电流传感器电流信号采用跨阻放大器实现I/V转换，信号的放大采用程控放大技术。电流

传感器信号放大采用TI公司的可编程增益放大器PGA205，将送入A-D小信号模拟量分段放大从而提高采样准确度。在设计中的A-D模数转换采用ADI公司的AD7606-4，AD7606-4是16 bit 4通道同步采用模拟数据采集系统，内置模拟输入钳位保护、二阶抗混叠滤波器及跟踪保持放大器，16 bit电荷再分配逐次逼近型ADC采用单5 V电源供电，可以处理 $\pm 10\text{ V}$ 和 $\pm 5\text{ V}$ 真双极性输入信号，同时所有通道均能以高达200 kS/s的吞吐速率采样。

雷击计数采用自积分罗氏线圈互感器，可高速响应雷电流变化情况，实现雷击大电流信号采集，同时避免波形畸变对雷击计数结果的影响。通过电压比较器输出的状态判断避雷器动作与否，文献[2]中明确了雷击计数电流的上限和下限范围。

FPGA选用Altera公司Cyclone系列EP2C8T144I8N。FPGA中嵌入微处理器NiosII，考虑到充分利用FPGA的片内RAM资源和DSP资源，实现高性能的数字信号处理。通过控制AD7606和PGA205实现对电流信号和雷击信号的实时高速采集并输出。

2.2 电流采集单元软件实现

电流采集单元整个控制数据处理工作由FPGA完成，编程采用VHDL语言实现。程序结构主要分为数据处理、PGA205控制、AD7606采样控制、组帧、Flash接口及UART接受发送等模块。程序结构如图4所示。

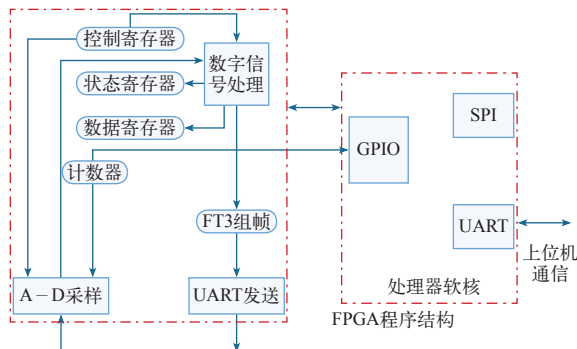


图4 电流采集单元软件结构图

FPGA产生时序控制AD7606采集数据，同时对数据进行处理，采样值与系统设置好的阈值

进行比较,控制PGA的增益切换。本设计中选PGA205的1、2和8三种增益,采样信号幅值增加通过程序控制切换到不同增益,如果采样值超过阈值则跳转到相应通道,实际应用中要考虑一定余量,在A-D饱和之前进行通道跳转,然后通过相应的乘法器和除法器,还原不同通道的真实采样值。然后将真实有效数据进行组帧编码,通过UART模块以FT3报文式发送。

FPGA软核处理器部分主要完成人机交互功能,通过工具软件对采集单元完成程序升级,参数设置如FT3发送波特率、周波采样点数及发送规约等配置。

3 避雷器监测IED设计

3.1 避雷器监测IED硬件结构

硬件采用模块化设计,提高了电子产品的可靠性、标准性、互换性和独立性^[3]。箱体采用标准4U半宽机箱,插箱式结构,符合IEC 297标准,便于安装、检测^[4]。结构示意图及监测IED实物分别如图5和图6所示。

CPU插件作为避雷器监测IED的主CPU单元,设计采用飞思卡尔新一代Power架构技术的E300c4

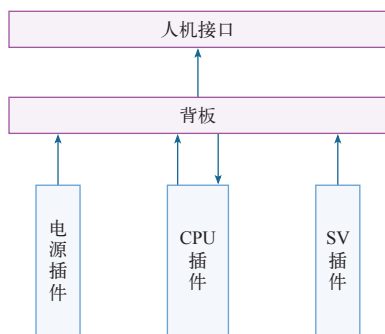


图5 监测IED硬件结构图



图6 监测IED装置

内核,MPC8377作为中央处理器能以极低的成本配置多种高速外围,它的执行速度可达667 MHz,E300c4内核还包括16 KB的L1指令、数据缓存及片上内存管理单元(MMU)。MPC8377具有两个10/100/1000 Mbit/s以太网控制器、一个DDR1/DDR2/SDRAM存储控制器、一个增强型的本地总线控制器、一个32 bit PCI控制器、一个USB2.0host/device控制器和片上全速PHY、一个可编程的中端控制器、双I2C控制器、一个4通道DMA控制器、两个UART控制器、一个改进的SD控制器和一个通用的I/O端口,如图7所示。

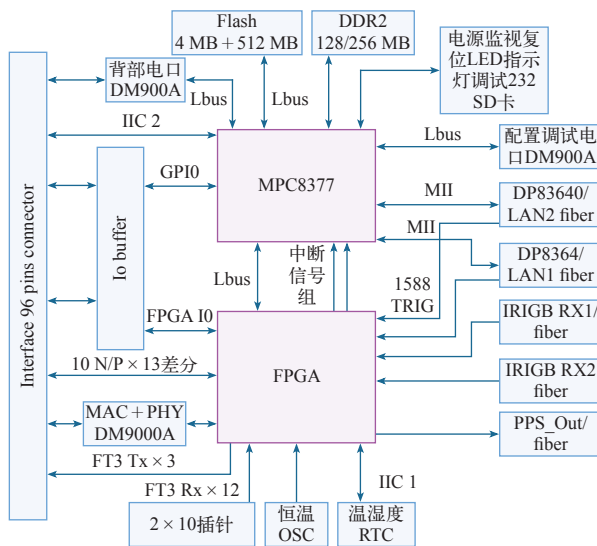


图7 CPU插件硬件结构示意图

SV插件包含1个全双光纤以太网口收发模块(AFBR5803ATZ),用于与电压合并单元交换数据的光电信号转换功能。

电源插件采用开关电源模块,同时兼容交流和直流220 V输入。

背板用于将电源插件、CPU插件和SV插件进行连接并提供相应接口。

人机接口有指示灯,由CPU插件通过IIC总线控制,显示装置运行状态。

3.2 监测IED软件实现

避雷器监测IED采集同间隔电流和电压信号,经过重采样、傅里叶变换滤波等数据处理,然后计算得到全电流、阻性电流、阻容比、系统电压

和雷击次数等数据,实现分析诊断预警功能,数据处理示意图如图8所示。

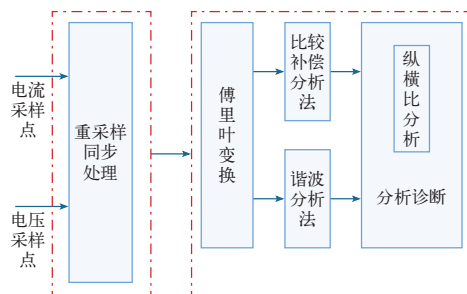


图8 数据处理示意图

程序设定了电流电压运行定值,当监测电流有效值大于定值时判定被监测的避雷器带电,处于运行状态;当监测电流小于定值时判断被监测的避雷器本体没有带电,处于停运状态;当监测电压有效值高于定值时判定该段母线带电,低于定值时判定该段母线停运。在有电流有电压的情况下,判别电压电流频率是否大于频率不一致定值,大于定值认为电流电压频率不一致,判定监测避雷器设备不是运行在该段母线上;电流电压同频且相位关系固定,等时间相位差偏差小于相位不一致定值,判定被监测设备运行在该段母线上,然后进行阻性电流,容性电流等数据计算分析诊断。程序控制流程图如图9所示。

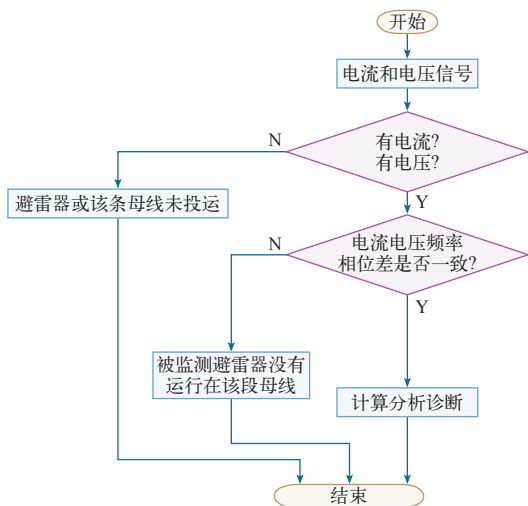


图9 程序控制流程图

3.2.1 方法原理

目前,国内外对金属氧化物避雷器的阻性电

流的提取进行了大量的研究,一般多有基波法、三次谐波法、零序电流法和电容电流补偿法等,各方法都有相应优缺点。本文根据2014年国网运检部关于变电站设备在线监测质量提升方案通知,采用比较补偿分析法和谐波分析法相结合的方法实现避雷器监测,提高对监测结果的分析判别能力。本文主要介绍谐波分析法。

金属氧化物避雷器工频电压下阀片可以等效成一个非线性的电阻和一个线性电容并联^[5],其等效电路如图10所示。

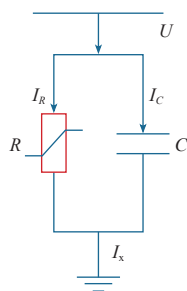


图10 MOA阀片等效电路图

由图10可知, R 为阀片等效非线性电阻; C 为阀片等效电容; U 为系统电压; I_x 流过避雷器的全电流。全电流由阻性电流 I_R 和容性电流 I_C 组成。正常情况下,阻性电流只占全电流的10%~20%,实验表明当MOA内部受潮时,其阻性电流基波分量增加显著而容性电流基本不变。当MOA老化时,其阻性电流三次谐波分量增加显著。可以通过监测避雷器阻性电流基波分量 I_{R1} 及阻性电流三次谐波 I_{R3} 的变化来对MOA的运行状况进行判别^[6]。

3.2.2 重采样同步

由于电流或电压被测量的时刻到数字信号开始发送之间存在一定延时,即采集器通道固有延时,所以避雷器IED要对采集到电流和电压采样值进行同步处理。避雷器监测IED充分利用PowerPC计算能力和FPGA并行处理能力,采用插值法对数据进行重采样,实现避雷器电流与相应电压的同步。电流电压同步为后面计算做准备^[7]。

3.2.3 谐波分析法

电力系统电压 U 、电流 I 满足狄里赫利条件,就可以分解为直流分量和各次谐波所组成的傅里

叶级数^[8]。以电流 I 为例,即

$$f(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad (1)$$

为了计算系数 a_k 、 b_k , 上式两边各乘以 $\cos k\omega t$, 并取定积分, 再根据三角函数的正交性质变化可得

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos k\omega t d(\omega t) \quad (2)$$

同理, 用 $\sin k\omega t$ 去乘式(1), 并取定积分可得

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin k\omega t d(\omega t) \quad (3)$$

当 $k=1$ 时, 基波系数由式(2)和式(3)可得

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^{\pi} f(t) \cos \omega t dt \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^{\pi} f(t) \sin \omega t dt \quad (5)$$

式(1)中电流基波分量为

$$I_1 = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \quad (6)$$

由式(6)设

$$I_{1n} = (a_1^2 + b_1^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

可得

$$\begin{cases} a_1 = I_{1n} \sin \theta_1 \\ b_1 = I_{1n} \cos \theta_1 \\ \tan \theta_1 = a_1 / b_1 \end{cases} \quad (8)$$

把式(8)代入式(6)得

$$I_1 = I_{1n} \sin \theta_1 \cos \omega t + I_{1n} \cos \theta_1 \sin \omega t \quad (9)$$

$$I_1 = I_{1n} [\sin(\theta_1 + \omega t)] \quad (10)$$

a_1 、 b_1 通过数值积分由式(4)、式(5)求得, I_{1n} 、 θ_1 可由 a_1 、 b_1 求得, 通过以上运算可求得相应电压电流基波幅值和相角。

考虑到MOA实际运行中当三相避雷器一字形排列, 由于相间耦合, 使各相避雷器除受本电压作用外, 还通过相间耦合电容受到相邻电压的作用, AC两相电压分别向后和向前移约 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。可求得 I_{A1} 与 I_{C1} 相位角 θ_{AC1}

$$\theta_o = \frac{\theta_{AC1} - 120^\circ}{2} \quad (11)$$

修整后避雷器的阻性电流分量如下。

A相阻性电流

$$I_{RA} = I_{A1} \cos(\theta_{A1} + \theta_o) \quad (12)$$

B相阻性电流

$$I_{RB} = I_{B1} \cos \theta_{B1} \quad (13)$$

C相阻性电流

$$I_{RC} = I_{C1} \cos(\theta_{C1} - \theta_o) \quad (14)$$

3.2.4 诊断算法

采用阈值诊断与纵横比相结合的方法。

根据基波投影法得到阻性电流, 与基波阻性电流阈值 δ 进行对比, 实现故障预警。

当阻性电流 $I_{R1} \geq \delta$ 开始计时, 当 $I_{R1}/\varepsilon \leq 0.95$ 时停止计时, 其中 ε 为返回系数0.95, 计时时间大于5 s时, 置阻性电流超标告警。

纵横比算法, 通过对三相当前监测测量值和历史数据进行比较诊断。纵横比分析法的使用条件: A、B和C为一组设备; a_1 、 b_1 和 c_1 分别为上次检测值; a_2 、 b_2 和 c_2 分别为本次检测值, 按照下面公式计算 F 值。 F 值超过阈值可判断为数据异常进行预警。判断 a_2 数据异常计算 F 公式为

$$F = \left| 1 - \frac{a_2(b_1 + c_1)}{a_1(b_2 + c_2)} \right| \times 100\% \quad (15)$$

判断 b_2 数据异常计算 F 公式为

$$F = \left| 1 - \frac{b_2(a_1 + c_1)}{b_1(a_2 + c_2)} \right| \times 100\% \quad (16)$$

判断 c_2 数据异常计算 F 公式为

$$F = \left| 1 - \frac{c_2(a_1 + b_1)}{c_1(a_2 + b_2)} \right| \times 100\% \quad (17)$$

4 实验结果

装置在国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心开普实验室通过了型式实验。全电流测量数据如表1所示, 阻性电流测试数据如表2所示。

从表1和表2可以看出: 全电流和阻性电流测量误差不超过 $\pm$ (标准读数 $\times 5\% + 5 \mu A$), 满足文献[9]要求。

5 结束语

本装置经过实验和现场验证表明满足相关标准设计要求。电流采集单元就地实现了以FT3格式

表1 全电流测量准确度

标准值/mA	测量值/mA	测量误差（绝对）
0.10	0.95	-0.05
0.20	0.14	-0.06
0.50	0.52	0.02
1.00	0.96	0.04
3.00	3.08	0.08
5.00	5.07	0.07
7.00	7.09	0.09
10.00	10.14	0.14
20.00	20.29	0.29
30.00	30.34	0.34
39.99	40.42	0.43
50.00	50.71	0.71

表2 阻性测量准确度

标准值/ μA	测量值/ μA	测量误差 (绝对)
10	9.4	-0.6
19.9	20.7	0.8
49.8	49.9	0.1
99.9	100.2	0.3
299.5	297.8	-1.7
50.3	47.1	-3.2
71.7	67.4	-4.3
142.3	135.6	-6.7
348.0	354.9	6.9
1 414.0	1 401.1	-12.9
3 535.0	3 515.1	-19.9
10 010.0	9 989.6	-20.4

光纤通信设计方案,解决了目前常用RS 485通信方式易受干扰损坏、可靠性差、传输距离近、规约私有及信息不透明等问题。避雷器监测IED实现了电流电压的数据聚合,解决了电子式互感器无法接入工程应用的难题,同时能以DL/T 860标准与站端单元通信。装置硬件软件采用模块化设计

插件,配置灵活,易于扩展维护,提高了装置系统开放性、可靠性。避雷器在线监测装置已在智能变电站现场运行良好,性能稳定,顺应国家电网公司对一次设备在线监测要求,应用前景广阔。

参考文献

- [1] GB/T 20840.8—2007 互感器 第8部分：电子式电流互感器[S]. 北京：中国标准出版社，2007.
- [2] JB/T 10492—2011 金属氧化物避雷器用监测装置[S]. 北京：机械工业出版社，2011.
- [3] 张忠海. 电子设备的模块化结构设计[J]. 机械工程师，2005，5(5)：48-50.
- [4] 曾伟，袁时中. 电子设备机械结构标准化现状及动态[J]. 电子机械工程，2003，19(2)：55-60.
- [5] 高峰，郭洁，徐欣，等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术，2009，35(11)：2629-2633.
- [6] 张振洪，臧殿红. 氧化锌避雷器在线监测方法的研究[J]. 高压电器，2009，45(5)：126-129.
- [7] 李英明，郑拓夫，周水斌，等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化，2013，37(11)：93-98.
- [8] 王昌长，李福琪，高胜友，等. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京：清华大学出版社，2006.
- [9] Q/GDW 537—2010 电容型设备及金属氧化物避雷器绝缘在线监测装置技术规范[S]. 北京：中国电力出版社，2010.

(收稿日期: 2015-09-17) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告