高压电缆终端避雷器带电检测系统研制

无间隙金属氧化物避雷器（MOA）用于架空线路和电缆终端处起到保护电缆和电缆终端的重要作用，但是所安装的避雷器数量较多，并且每只避雷器都需要进行常规停电试验，试验工作量很大。由于 66 kV 及以上电缆头处避雷器安装高度高，停电试验难度大，所以通过电缆终端用避雷器带电检测技术研究，减少停电试验的次数是十分必要的。介绍了研制能够有效地测量避雷器运行参数的传感器，太阳能供电系统和基于 Zigbee 射频技术的远程通信模块组成的测量系统，通过试验验证了整个带电测量系统的测量准确性和稳定性。

钟丹田[1,3] 韩芳[2] 刘齐[1] 王茂军[1,3] 原峰[1,3] 张光明[1,3] 代继成[1,3]
/1.国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院 2.国网沈阳供电公司
3.辽宁东科电力有限公司

钟丹田/工程师

关键词/Keywords
输电线路 · 电缆终端 · 避雷器 · 带电检测 ·

0 引言

随着中国电力事业的发展，输电线路不断增加，架空线路和地下电缆的铺设量与日俱增，目前在架空线路和电缆之间连接处需加装避雷器，这样可以在出现过电压时，避雷器将发生动作，起到保护线路的作用。但是，电缆终端避雷器运行状态的评估缺乏有效试验数据，因为开展 66 kV 及以上电缆头处避雷器的停电试验难度大，现有的技术手段无法对电缆端头处的避雷器进行带电检测，这意味着需要对大量的避雷器定期进行直流 1 mA 加压测试，然而户外（多是公路边）施加高等级的试验电压，且高压试验线需要引至装设在 20 m 左右高处的避雷器处，试验难度和危险性较大，需要有足够的安全距离，有足够多的人进行看护，试验时对天气条件要求也很高[1]。本文针对电缆终端避雷器运行状态的带电测量技术进行研究，研制一套高压电缆终端避雷器带电测量系统，能够方便电力运维检修人员带电检测避雷器的运行状况，避免了过去需停电试验带来的问题，也提高了试验的安全性。

1 系统总体方案设计

66 kV 及以上电缆头处避雷器通常有两回线路，安装有 6 只无间隙金属氧化物避雷器（MOA），如图 1 所示。避雷器底部安装机械式计数器，能够指示避雷器的全电流和动作次数，但是由于计数器运行时间长，距离较高，很难观测到准确的测量数据。本文设计了基于电子技术的避雷器检测传感器，太阳能供电系统和无线通信模块组成的电缆终端带电检测系统。传感器能够测量出避雷器全电流、阻性电流、动作次数及动作发生的时间等参数数据，传感器能通过级联的方式进行统一供电，并采用 RS 485 接口与远程通信模块连接，远程通信部分采用 Zigbee 2.4 GHz 方式把数据传

图 1 电缆终端避雷器现场图

中国知网 https://www.cnki.net

送到工作人员的手持设备上，方便记录测试数据。整体方案系统图如图 2 所示。

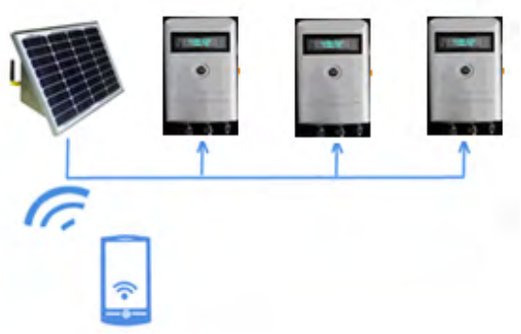


图 2　系统总体设计方案

2　整体方案实施

2.1 采集传感器设计

2.1.1 传感器硬件设计

设计采用两个穿心式互感器测量避雷器的电流信号和动作次数。通过精密电流互感器对电流信号进行测量，经过信号调理及变换电路转换成处理器可接受范围的电压信号，在处理器（MCU）中利用快速傅里叶算法进行计算，得出避雷器全电流和阻性电流。由于避雷器发生雷击或操作过电压时泄漏电流会突然增大，大电流的持续时间为 4~10 μs，所以设计采用高频互感器感应大电流的激增变化来触发数字比较器，完成避雷器动作次数的测量。穿心式互感器的采样方式可以使传感器内部在大电流冲击后不存在残压，很好地解决了传统监测装置在避雷器受到雷击后，装置存留残压高，影响避雷器本体寿命的问题[2]。

传感器还具有记录动作次数发生时间的功能，通过传感器内部的实时时钟芯片，当 MCU 接收到动作次数触发命令时，立刻读取当前时间，并把动作次数和动作的时间全部存储。传感器与远程通信模块的接口采用 RS 485 方式，增加抗干扰性能。硬件设计原理框图，如图 3 所示。

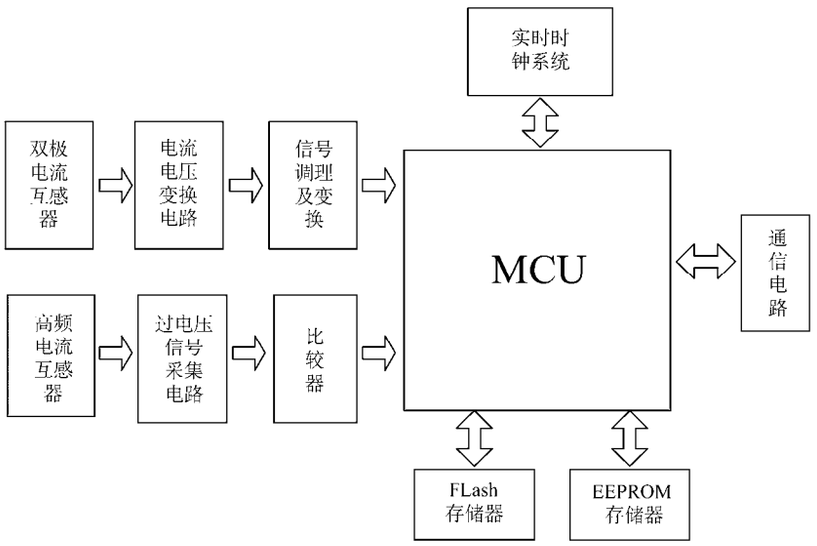


图 3　传感器硬件设计原理图

2.1.2 电流采样软件算法

由于避雷器具有非线性特性，其泄漏电流是非正弦波，其中含有高次谐波，3 次谐波对温度变化很灵敏，早期老化期阻性电流的变化主要表现为阻性电流的 3 次谐波分量的上升[3]。通过对低电压等级避雷器监测方法分析比较，可以利用谐波分析法测量出避雷器泄漏电流中的 3 次谐波电流，利用老化后和无老化时的 3 次谐波电流的曲线来判断 MOA 的运行工况。软件计算公式如下。

考虑信号中包含有高次谐波及噪声的情况，可将信号 $X(t)$表示为

$$X(t)=\sum_{k=0}^{+\infty}X_k\sin(n\omega t+\varphi_k)+N(t) \qquad (1)$$

根据三角函数的正交性，得

中国知网 https://www.cnki.net

$$A_k = \frac{2}{T}\int_0^T X(t)\sin\omega t\mathrm{d}t = X_k\cos\varphi_k$$
$$B_k = \frac{2}{T}\int_0^T X(t)\cos\omega t\mathrm{d}t = X_k\sin\varphi_k \quad (2)$$

以上是针对时间连续信号，对于采样后的离散信号，可以将积分表示成离散形式

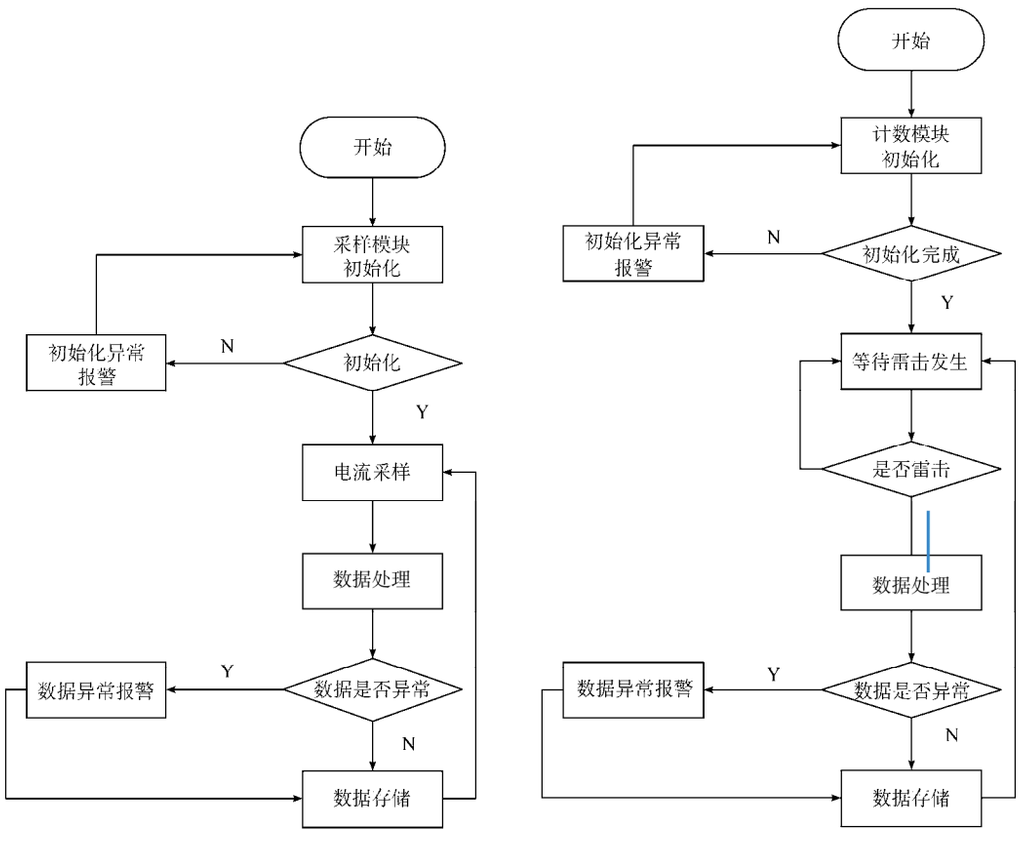
$$A_k = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} X(n)\sin(\frac{2\pi}{N}kn)$$
$$B_k = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} X(n)\cos(\frac{2\pi}{N}kn) \quad (3)$$

其中 N 是一个周期中的采样点数。

考虑到系统中的高次谐波含量较小，几乎没有偶次谐波。通过以上公式，DFT 变换只分解奇次谐波，且在频域内硬件电路已经滤除大于 7 次的奇次谐波。由此可以计算出电流基波和 3 次谐波的幅值。进行算法处理后，使计算方法符合 IEC 60099—5 标准，保证了阻性电流提取算法的准确度[4-5]。

2.1.3 软件设计

软件设计对提升系统的可靠性同样起着重要作用，软件采用 Keil4.5 编写，避雷器电流的采集和动作次数的记录程序流程图分别如图 4 所示。



（a）电流采样软件流程图　　（b）动作次数记录软件流程图

图 4　传感器软件流程图

2.2 太阳能供电系统设计

太阳能供电系统主要包括太阳能电池方阵、充放电控制器和储能蓄电池三个部分，原理框图如图 5 所示。充放电控制器通过设定相应的浮充电压范围和均匀充电压范围，根据蓄电池的容量和电压状态对蓄电池进行相应的浮充电或均匀充电，同时给负载供电。当蓄电池的电压过高时，终止对蓄电池的充电；当蓄电池电压过低时，终止蓄电池对负载放电，保护蓄电池。控制器是系统的关键控制元件。储能蓄电池是系统管理核心，用来存储太阳能电池方阵转换成的剩余电能，以备没有阳光的情况下使用，保证连续可靠

中国知网 https://www.cnki.net

的供电。

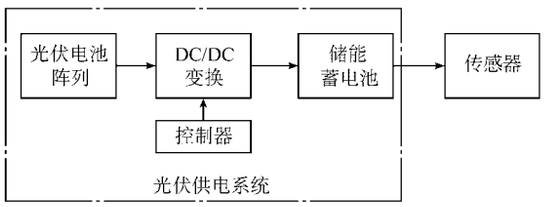


图 5　太阳能供电系统原理框图

2.3 通信模块设计

通信模型内部采用国内生产的 Zigbee 2.4 GHz 增强功率型射频模块，实现传感器数据与手持设备之间的数据传输。对于增强型无线通信模块中，无线通信芯片发射的无线信号，被无线通信模块上的射频放大器（PA）放大之后，作为无线通信模块的发射的总功率[6-7]，这样有利于增加通信距离。

设计的射频放大器的增益高，可以有效地避免了无线通信芯片输出的射频信号在通过射频放大器时造成信号饱和失真，所以通过模块的 AT 指令，将无线通信芯片的发射功率设置为 –3 dBm 或–5 dBm。经过测试在空旷场合下，通信距离 300 m 内数据传输误码率不大于 1%，符合测量系统通信要求。

通信模块采用数据透传的机制，手持设备发送给传感器读取数据指令，无线模块接受到指令后通过内部 UART 串行总线发送给 MCU，MCU 通过电平变换，转换成 RS 485 通信方式，然后通过有线方式发送给传感器，传感器接收命令后同样把数据经过通信模块后以无线的方式将测量数据返回到手持设备。

3　整体试验分析

3.1 传感器准确度试验

由于电网谐波和高压电磁场的影响均会对传感器的测量准确度产生影响，所以传感器不但要设计良好的电磁屏蔽外壳，而且采用硬件滤波和软件算法相结合的方法，从避雷器总泄漏电流中提取出全电流的真实值和 3 次谐波值，3 次谐波的变化曲线可以作为避雷器的老化程度的参考值。

传感器准确度测量按照 Q/GDW 537—2010《电容型设备及 MOA 绝缘在线监测装置技术规范》的要求：全电流、阻性电流测量误差均不大于±（标准读数×2.5%+5 μA）。在试验室内使用丹迪克 DK–34B1 多功能交流采样变送器校验装置对传感器进行准确度校验。以 66 kV 避雷器为例，其泄漏电流值在 0.2~0.6 mA，阻性电流不超过总电流的 20%，按照以上的数值范围要求，对传感器的测量准确度进行试验，通过电流校验装置发出 0.00~1.00 mA 交流电流，3 次谐波含量设定为 0%~20%，传感器准确度试验数据如下表所示。

表　传感器准确度测量试验数据表

三次谐波含量（%）	测量参数/mA	测量数据/mA			
0	全电流值	0.00	0.20	0.51	1.00
	阻性电流值	0.00	0.00	0.00	0.00
5	全电流值	0.00	0.21	0.51	1.01
	阻性电流值	0.00	0.01	0.03	0.06
10	全电流值	0.00	0.21	0.51	1.01
	阻性电流值	0.00	0.02	0.06	0.11
15	全电流值	0.00	0.21	0.51	1.02
	阻性电流值	0.00	0.04	0.08	0.17
20	全电流值	0.00	0.22	0.51	1.02
	阻性电流值	0.00	0.05	0.11	0.22

试验数据证明了传感器的测量准确度在 1% 以内，完全满足规范要求。

3.2 供电系统可靠性试验

研制的太阳能供电系统经过在冬季户外进行 3 个月的试验，对避雷器传感器负载两端电压进行实时监测并记录，共收集负载电压数据 4 800 个，将测试数据绘制成了相应的曲线，如图 6 所示，纵轴为负载两端电压，横轴为时间。

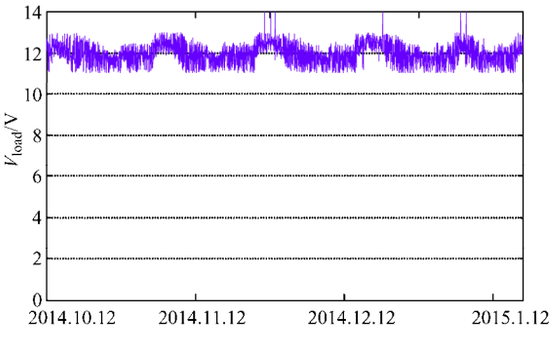


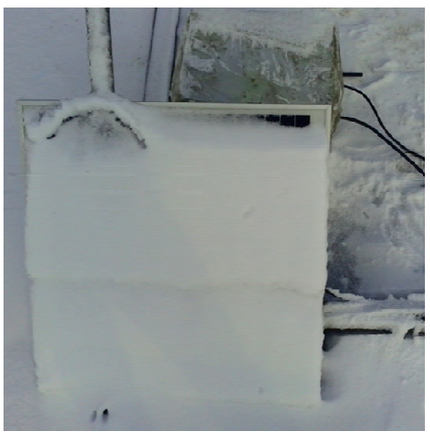
图 6　太阳能供电系统负载电压曲线

在图 6 中可以看出负载两端电压有轻微波动，但始终处于负载工作电压的合理范围。试验

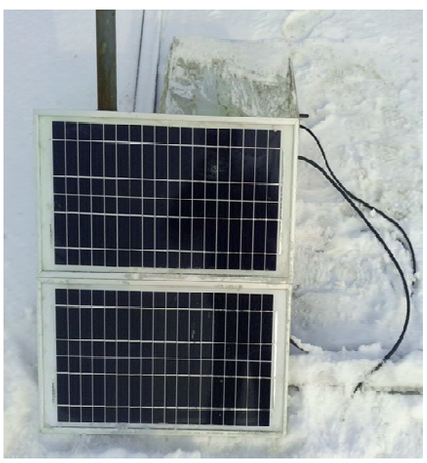
中国知网 https://www.cnki.net

表明，所设计的太阳能供电系统对负载可以进行可靠供电。

户外试验图片如图 7 所示，在冬季–15 ℃室外对太阳能供电系统进行测试分别为有雪覆盖和融雪的情况，在覆雪这段时间里供电依然正常，并且覆雪可以在阳光的作用下自行消除，供电可靠。



（a）太阳能供电系统覆雪现场图



（b）太阳能供电系统融雪现场图

图 7　太阳能供电系统户外测试情况

4　结束语

高压电缆终端避雷器带电检测系统的研制成果能够解决电缆终端避雷器停电试验带来的诸多问题，在输电线路带电的情况下，试验人员可以通过手持设备获得准确地测量数据。高准确度测量的传感器利用软件算法可以在不需要电压参考的情况下，直接计算出阻性电流的变化趋势，并能够准确记录避雷器动作次数和发生动作的时间，为判断避雷器的运行状态提供准确的数据支撑。利用太阳能供电系统很好地解决了户外装置的供电问题，经过极端天气环境下测试，完成供电可靠性验证。

整个高压电缆终端避雷器带电检测系统的应用可以减少大量的常规停电试验的工作，有利于帮助运维检修人员制定更完善的更换和延长高压电缆终端避雷器的策略。

参考文献

[1] 殷雄开，邵涛，高翔，等．金属氧化物避雷器检测方法的现状与发展[J]．高电压技术，2002，28（6）：35-36．

[2] 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(6)：126-129．

[3] 钱家骊，常越．氧化锌避雷器非均匀受潮及老化的监测研究[J]．电瓷避雷器，1993（6）：42-46．

[4] Flisowski Z，Mazzetti C，Wlodek R．New approach to the selection of effective measures for lightning protection of structures containing sensitive equipment[J]．Journal of Electrostatics，2004，60（2/4）：287-295．

[5] 李豹，舒乃秋，李自品，等．高精度金属氧化物避雷器测试仪标准装置的研制[J]．高压电器，2009，45（6）：95-97．

[6] 彭波，陈俊武，周志成．基于无线传输的不良绝缘子检测系统研究[J]．高压电器，2007，43（4）：310-312．

[7] 周念成，邓选民，赵渊，等．采用无线通信技术的避雷器检测器[J]．电力自动化设备，2005，25（11）：89-90．

作者简介

钟丹田（1983-），男，研究生，工程师，研究方向为高压电气和在线监测。

（收稿日期：2015 - 12 - 10）EA

（编辑：杨帆）

中国知网 https://www.cnki.net