

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181283

新型组合式验电器的设计与实现

王宁¹, 刘云华¹, 闫振宏¹, 张莉², 姚睿哲², 张龙飞², 吴艳莉²

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 辽宁东科电力有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 为设计一款具有接触式与非接触式验电功能的 10 kV 高精度验电器, 提出一种新型高压验电方法。利用空间杂散电容分压原理和平板电容型电场传感器的电荷感应原理研制出一种 10 kV 新型组合式验电器。分析了工频电场分布, 研究了空间杂散电容的分压原理并推导电场传感器的感应电压计算公式。利用 Ansoft Maxwell 对多种验电环境下的电磁场进行仿真并进行抗干扰能力分析, 同时设计硬件电路和软件程序。在搭建的高压试验平台下进行接触式验电试验和非接触式验电试验。试验结果表明, 在高电压输电环境下, 非接触式验电的感应电压变化符合电场强度的变化规律, 接触式验电和非接触式验电具有较高的验电准确度。

关键词: 验电器; 非接触式; 电场强度; 电磁仿真

Design and implementation of a new combined electroscope

WANG Ning¹, LIU Yunhua¹, YAN Zhenhong¹, ZHANG Li², YAO Ruizhe², ZHANG Longfei², WU Yanli²

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116026, China;

2. Liaoning Dongke Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: In order to design a 10 kV high-precision electroscope with contact and non-contact power inspection functions, a new high-voltage power inspection method is proposed. A 10 kV new combined electroscope is developed by using the partial voltage principle of stray capacitance and the charge-sensing principle of the planar capacitive electric field sensor. In this paper, the power frequency electric field distribution is analyzed, the voltage division principle of the spatial stray capacitance and the inductive voltage calculation formula of the electric field sensor are derived. Ansoft Maxwell is used to simulate electromagnetic fields in a variety of electrical environments and analyze the anti-jamming capability. The hardware circuit and software program are designed simultaneously. The contact electricity inspection test and the non-contact electricity inspection test are carried out under the built high-voltage test platform. The results show that under the high-voltage transmission environments, the variation of induced voltage of non-contact electroscope conforms to the variation law of electric field strength, and contact and non-contact electroscope have higher accuracy of electroscope.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577022).

Key words: electroscope; non-contact; electric field strength; electromagnetic simulation

0 引言

在高电压检修中, 每年因疏忽或检修不当造成大量触电身亡事故, 因此高压验电器在高压检修中扮演着举足轻重的角色。目前, 我国使用最广的是传统电容型验电器^[1], 但电容型验电器体积笨重, 灵敏度不高, 存在误报警、拒报警, 高压检修人员面临极大的安全隐患。

从高压检修安全角度看, 智能非接触式高压验电器是当前的研究热点^[2-5], 是保障检修人员安全的重要设备, 未来研究将朝着更高电压等级、更高精确度、更便携的方向发展^[6-12]。在每年触电事故频发情况下, 研究开发新型智能验电器具有很高的研究价值与战略意义。

在此, 本文设计一种新型的高压验电器并提出新型的验电方法。该验电器同时具有非接触式和接触式两种验电方式, 非接触式验电提供定量检测并提前预判结果; 接触式验电作为定性测量手段, 进

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577022)

一步保障验电的可靠性; 两种验电方式相结合, 大大提高验电的准确度, 保证检修人员人身安全。

1 传感器的设计原理

1.1 非接触式传感器的测量原理

1.1.1 电场测量原理

带电设备的场强随距离变化, 根据工频电磁场数值分析, 10 kV 单相输电线的电场强度随距离变化曲线如图 1 所示。

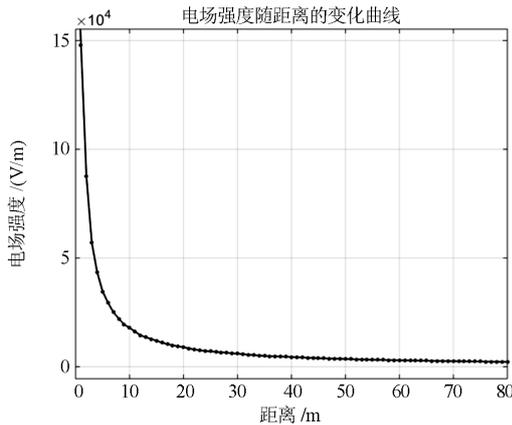


图 1 输电线电场变化曲线

Fig. 1 Transmission line electric field variation curve

由图 1 可知, 电场强度随着距离的增大而减小, 二者呈现二次反比例关系。可通过检测电场强度^[13-14], 并根据场强与距离的关系来判断待测设备带电状态及验电器与输电线间的距离。

电场测量分为间接测量与直接测量。间接测量用电磁场测量仪测量多点的电场强度, 再用算法优化计算得到变电站的场强分布, 即可得到各处的场强^[15]。直接测量法利用传感器的电磁感应原理实现电场与电信号的转换^[16], 通过测量电信号大小而非接触地得到待测点的电场强度。

1.1.2 电场传感器测量电压方程

非接触式传感器采用平板电容型电场传感器, 由三部分组成: 上极板、中间介质和下极板。当传感器处于电场中, 上下极板感应出移动电荷, 二者间存在电位差, 当电场工频交变, 电位差则为工频交变的交流电压。其结构模型如图 2 所示, $E(t)$ 为电场强度, d 为中间介质厚度, U 为感应电压。由高斯定理, 传感器极板上的感应电荷量为

$$q(t) = \varepsilon E(t)S \quad (1)$$

式中: ε 为极板介电常数; S 为极板面积。由于两极板间距非常短, 材料、大小一致, 上下极板感应的电荷可视为等量、异号。传感器结构可等效为电

容 C , 电容两端的电压为

$$U(t) = \frac{q}{C} = \frac{\varepsilon E(t)S}{C} \quad (2)$$

由式(2)可知, 电场传感器感应电压 $U(t)$ 与电场强度 $E(t)$ 成线性正比, 可通过测量感应电压计算电场强度, 进而判断待测设备带电状态及验电器与待测设备的距离。

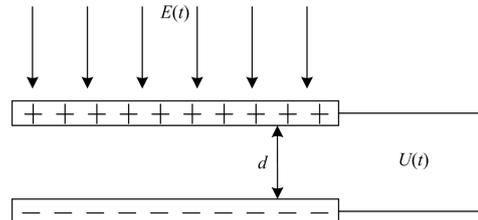


图 2 平板电容型电场传感器

Fig. 2 Flat capacitive electric field sensor

1.2 接触式传感器的测量原理

接触式验电利用空间杂散电容的分压原理。由带电设备和人体、空气及其他介质组成等效电容器, 即杂散电容^[17]。如图 3 所示, 验电时接触探头接触带电设备, 带电体与验电器间存在一个杂散电容 C_1 , 验电器与人体、大地之间存在一个杂散电容 C_2 , C_1 、 C_2 之间形成通路^[18], 杂散电容 C_1 与 C_2 对 10 kV 电压分压, C_1 分得电压 U_1 。

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U \quad (3)$$

接触式验电通过检测 U_1 的大小, 来判断待测设备是否带电, 当 U_1 大于接触式验电的起动电压, 发出报警信号。

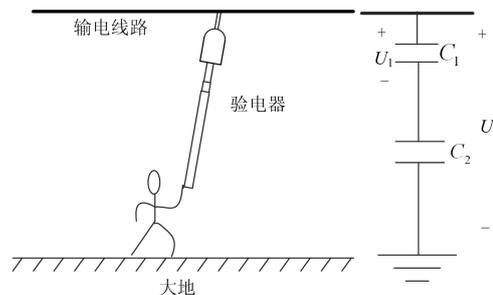


图 3 接触式验电示意图

Fig. 3 Schematic of contact type electroscopie

2 验电器装置的设计

2.1 硬件结构的设计

硬件电路的结构设计如图 4 所示, 由传感器模块、信号调理模块、信号处理模块、声光报警电路及蓝牙通信模块组成。蓝牙通信功能便于监管人员实时监测检修状态并给检修人员及时提醒, 保障检

修人员安全。

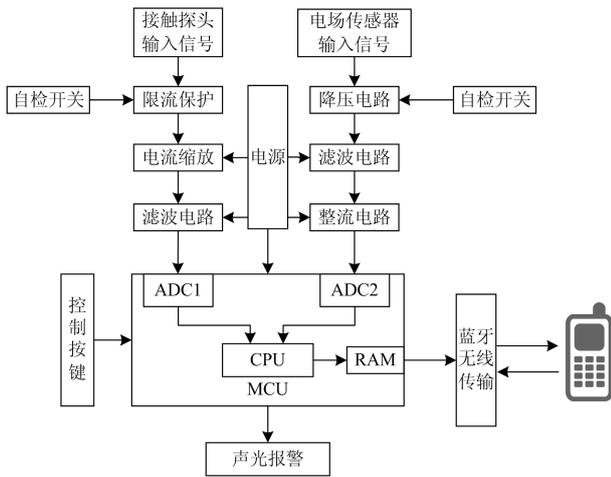


图4 硬件电路结构设计框图

Fig. 4 Structure design of hardware circuit

组合式传感器由接触探头和平板电容电场传感器组成，二者采用螺钉固定的方式组装，如图5。电场传感器由PCB板制作，圆环状，上下两层铺铜作极板，接触探头由金属柱体与固定螺钉构成，接触探头垂直固定于电场传感器的中心。

非接触式验电的调理电路如图6所示，包括R1

和R2组成的1/6比例降压电路、二极管组成的3.3 V限幅电路、U1组成的电压跟随器、U2组成的有源二阶低通滤波器、U3和U4组成的精密整流电路，其中二阶低通滤波器的截止频率为100 Hz，电路输出0~3.3 V的电压供处理器自带的ADC读取。处理器采用STM32F103，该芯片具有体积小、集成丰富外设的优点，自带16路的12位逐次逼近型ADC，ADC采样频率设置为14 MHz。

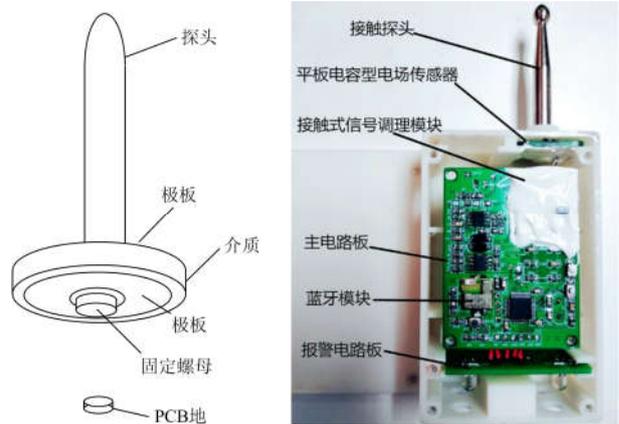


图5 组合式传感器与验电器

Fig. 5 Combined sensor and electroscoper

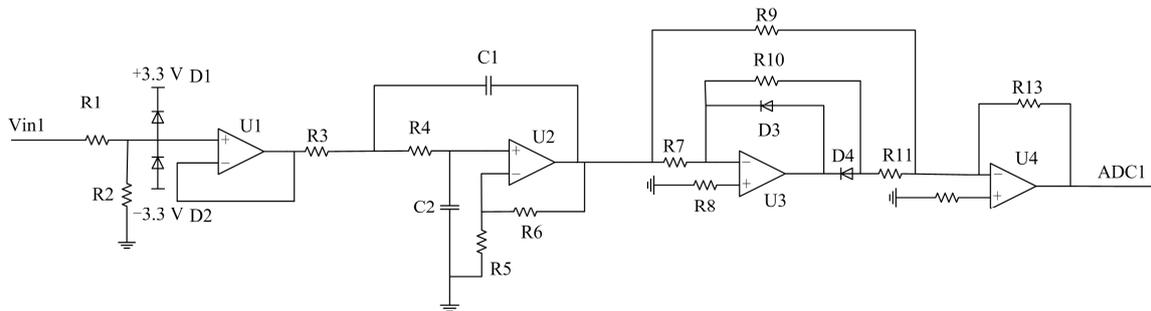


图6 非接触式信号调理电路

Fig. 6 Non-contact signal conditioning circuit

接触验电利用杂散电容分压原理，经Maxwell仿真杂散电容 C_1 分压在100 V的级别， C_1 分压经限流后理论上不会击穿后续电路，但由于探头与高压线直接接触，10 kV高压存在放电现象，因此在高低压隔离与防放电采取以下措施：

- 1) 电场传感器内环半径够大，与接触探头接近处采用硅橡胶绝缘灌封，防接触探头上的高压爬电至电场传感器的极板。
- 2) 接触式信号调理电路各元器件保持一定间距，并用硅橡胶灌封。
- 3) 接触式信号调理电路的限流保护模块中反接1 kV耐压的二极管1N4007，防电路击穿。

2.2 软件设计

2.2.1 信号处理程序

信号处理程序如图7所示， ADC_1 和 ADC_2 分别表示非接触式与接触式信号调理后的电压值，二者经模数转换和换算得到电场传感器感应电压 U_1 和接触式信号调理电路的输出电压 U_2 ，对 U_1 和 U_2 进行图7所示的判断，当 U_2 大于启动电压1.5 V，则输出持续报警，否则根据 U_1 所处电压区间发出不同频率的报警信号。

2.2.2 验电操作逻辑

验电操作逻辑是基于组合式双传感器设计，也是组合式验电器高准确度的实现方式。如图8所示，

验电操作时, 先用非接触式验电判断待测设备周围是否存在带电体, 再用接触式验电方式进一步确认待测设备带电状态。

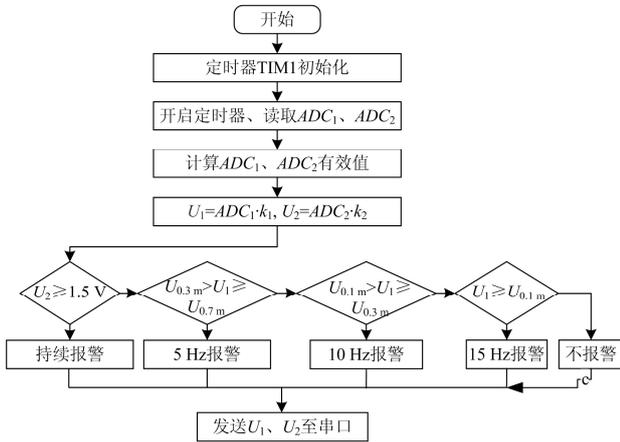


图 7 信号处理程序

Fig. 7 Signal processing program

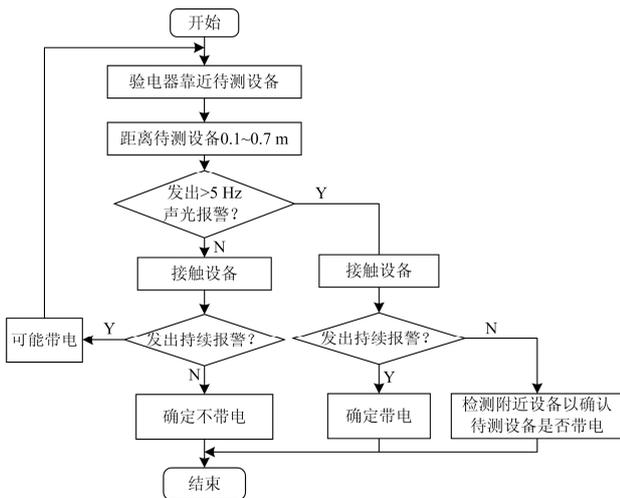


图 8 操作交互逻辑

Fig. 8 Operational interaction logic

2.2.3 手机端软件

监测 APP 如图 9 所示, 监测 APP 通过蓝牙与验电器进行数据传输, 基于蓝牙 BLE 开发, UI 显示内容包括蓝牙连接状态、接触式与非接触式验电结果。在底层信号收发程序的设计上, 为将接触式与非接触式验电的两路信号同时发送至手机, 采用通信协议转换将数据进行协议打包, 统一上传^[19]。

2.3 非接触式传感器抗干扰能力分析

非接触式验电利用电场传感器感应电场的原理, 高压检修现场存在复杂电场环境, 受其他线路的电场干扰可能发生误报警或拒报警。有必要对电场传感器的抗干扰能力进行分析, 用 Ansoft 对两种常见的致误报警或拒绝报警的情况进行仿真。



图 9 手机软件界面

Fig. 9 Mobile phone software interface

1) 三相 10 kV 导线中待测相断电, 另两相带电。

图 10 为两种状态下仿真得到的电场传感器感应电压随距离变化的曲线。由图 10 可知, 当待测相断电, 感应电压远小于正常带电时的感应电压, 只需设置好阈值, 另两相输电线的带电状态对待测相的验电结果的判定无影响。

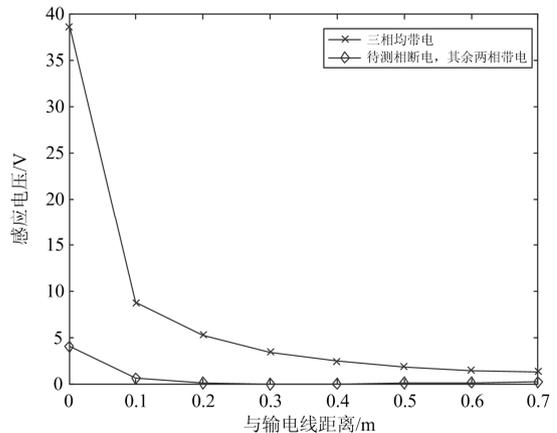


图 10 两种状态下感应电压随距离的变化曲线

Fig. 10 Curve of induced voltage with distance in two states

2) 同塔杆架设 10 kV 与 35 kV 线路。

图 11 为 10 kV 与 35 kV 线路同塔杆架设的两种状态下, 对 10 kV 线路验电时传感器感应电压有效值随距离的变化曲线。由图可知, 10 kV 线路断电时传感器的感应电压远小于正常带电时的感应电压, 在 0.2 V 左右, 只需设置好报警电压的阈值, 35 kV 的带电状态对 10 kV 非接触式验电结果的判定无影响。

综上所述, 电场传感器用于非接触式验电具有一定的抗干扰能力, 只需在程序中设置好报警的电

压阈值，不会发生误报警和拒报警。

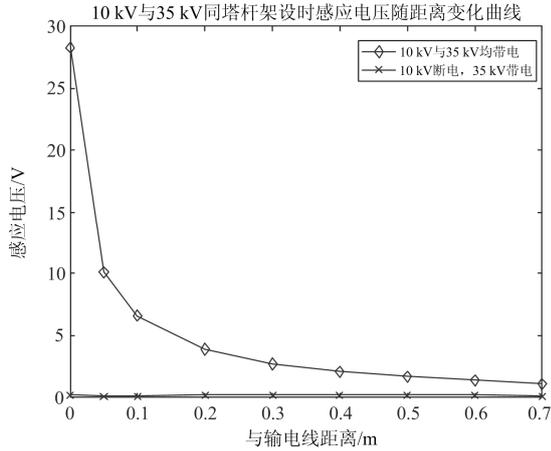


图 11 两种状态感应电压随距离的变化曲线

Fig. 11 Curve of induced voltage with distance in two states

2.4 电磁兼容设计

验电器作业场所电磁环境复杂，电磁辐射会对信号造成干扰。采取以下措施提高抗扰能力：

- 1) 接触式信号调理电路的信号输出端采用 RC 滤波器进行滤波；
- 2) 非接触式信号调理电路采用二阶低通滤波器滤除感应电压中的高频杂波；
- 3) 信号调理电路的模拟地和数字电路的数字地隔离，通过磁珠连接；
- 4) 对电路板地大面积铺铜，增强屏蔽干扰信号的作用。

3 模型测试与数据分析

3.1 高压试验平台

为验证验电器的可行性与准确度，建立一高压试验平台，如图 12 所示。通过变压控制器控制变压器产生 0~10 kV 的电压，由长直导线输出。验电器接触探头与导线垂直，与导线的距离在 0~0.8 m 变化。示波器由隔离变压器进行供电，用于测量验电器信号处理电路输出的电压波形。同时用手机端 APP 实时观测测量结果。试验分两步进行：接触式验电试验和非接触式验电试验。其中接触式验电试验主要测试报警起动电压是否满足接触式验电器的国家标准^[20]，由于目前还没有适用于 10 kV 的非接触式验电器标准，因此非接触式验电试验主要测量不同距离下的感应电压以及在安全距离^[20]上的报警情况。

3.2 非接触式验电试验

采用上述高压试验平台，将交流电压源升压至 10 kV，将验电器探头垂直于 10 kV 导线，并分别在

探头距导线 0.8 m、0.7 m、0.6 m、0.5 m、0.4 m、0.3 m、0.2 m、0.1 m 处用示波器测量各个点的波形。

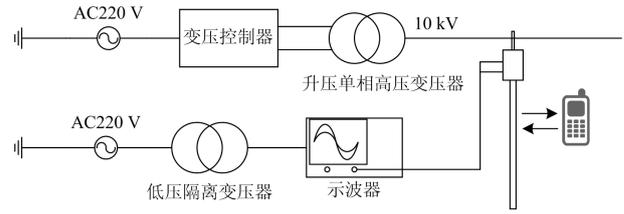


图 12 高压试验平台

Fig. 12 High voltage test platform

图 13 是 10 kV 非接触式验电试验中在距离导线 0.5 m 处非接触式信号调理电路输出的波形。感应电压经信号调理，得到波形的频率为 100 Hz，考虑现场存在一些不可避免的干扰，波形的失真度在接受范围内，满足试验预期。

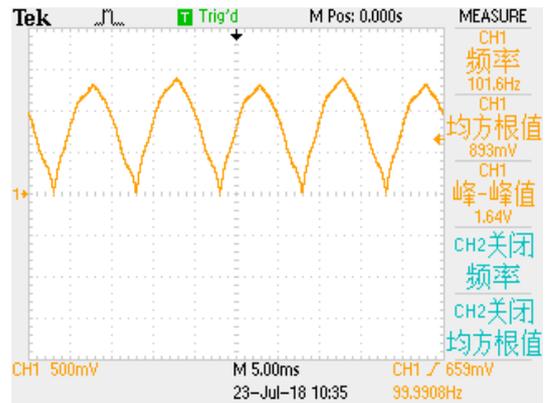


图 13 10 kV 非接触式试验波形图

Fig. 13 10 kV non-contact experiment waveform

图 14 是测得电压波形的有效值随距离变化的拟合曲线。由曲线可知，电压随距离的变化符合电场强度随距离的变化规律，因此认为利用感应电压判断验电器与带电体间距离的方案是可行的。由文献^[21]可知，工作人员距 10 kV 带电设备的安全距离是 0.7 m，因此只需设定安全距离 0.7 m 处的感应电压为报警起动电压，并在不同电压设定不同频率的报警信号，即可实现非接触式报警及判断验电器与带电体的距离大小。经实测，非接触式验电的报警效果表现良好，在安全距离处报警灵敏，随着距离减小，报警频率也随之升高，可有效提醒检修人员与带电体的距离。

3.3 接触式验电试验

采用上述高压试验平台，验电器的接触探头与 10 kV 导线接触，为避免非接触式报警信号的干扰，设定程序关闭非接触式验电报警，再按 1 kV 递增的方式缓慢将电压由 0 V 上升至 10 kV。记录各电压

等级下的报警情况, 如表 1 所示。

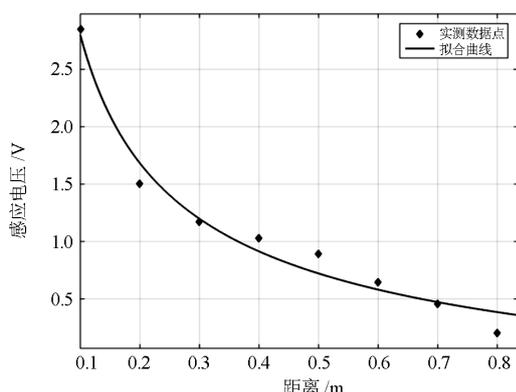


图 14 调理电压随距离的变化曲线

Fig. 14 Curve of conditioning voltage versus distance

表 1 接触式验电的报警情况

Table 1 Alarm state of contact power inspection

电压/kV	报警次数	未报警次数	报警率/%
0	0	50	0
1	10	40	20
2	31	19	62
3	47	3	94
4	48	2	96
5	49	1	98
6	50	0	100
7	50	0	100
8	50	0	100
9	50	0	100
10	50	0	100

表 1 表明: 验电器的接触式验电从 2 kV 开始有较高的报警率, 从 3 kV 开始稳定报警, 因此认为起电电压满足国家标准《DL 740-2000 电容型验电器》^[21]对于接触式验电器规定的起电电压在 $0.15U_N \sim 0.4U_N$ 的要求。接触式验电具有较高的验电精度。

4 结论与展望

利用电磁感应原理和空间杂散电容分压原理, 设计了一款兼具非接触式与接触式验电方式的 10 kV 组合式验电器。试验结果表明, 该验电器在进行非接触式验电检测时, 验电准确度较高, 电场传感器感应电压变化规律符合电场强度变化规律, 波形失真小。接触式验电的报警启动电压满足国家电力标准^[21]。组合验电的方法可大大提高验电结果的准确度, 因此, 该研究方法和设计的组合式验电器存在一定的使用价值。

抗干扰能力仍在仿真分析阶段, 验电试验仅在实验室环境进行, 未在变电站进行实测, 抗扰性有待进一步验证。下一步研究将在传感器和算法的基础上进行改进优化, 利用传感器感应电压的原理, 增加非接触式相位测量^[22]及核相的功能, 使其满足更多的工程应用需要。

参考文献

- [1] 张忠宝, 姚玉永. 35 kV 高压验电器的数显改进与开发[J]. 电工电气, 2009(7): 19-22.
ZHANG Zhongbao, YAO Yuyong. Digital-displayed improvement and exploitation of 35 kV high-voltage electroscopel[J]. Electrotechnics Electric, 2009(7): 19-22.
- [2] 宋佳. 接触网电压无地线测量装置的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
SONG Jia. Study on voltage measuring device for catenaries without ground wire[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [3] 吴顶顶. 工频电场信号检测与智能预警系统[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
WU Dingding. Detection method and safety warning system of power frequency electric field[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [4] 刘聪汉, 何为, 汪金刚, 等. 便携式工频电场测量装置的设计[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 57-62.
LIU Conghan, HE Wei, WANG Jingang, et al. Design of portable power frequency electric field measuring device[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 57-62.
- [5] 江孝琪. 整备作业接触网残压检测系统的研究与实现[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
JIANG Xiaoqi. The research and implementation on residual voltage test system of catenary for the servicing work[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [6] 谷凯凯, 胡文山, 赵坤, 等. 基于移动网络的手持式电力数据采集分析装置的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 110-116.
GU Kaikai, HU Wenshan, ZHAO Kun, et al. Design and implementation of a hand-held device for power data acquisition and analysis based on mobile network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 110-116.
- [7] 胡泽文. 工频电场测量方法和传感器的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
HU Zewen. Research on the method and sensor of power frequency electric field measurement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [8] 张晓明. 瞬态电场测试传感器的研制[D]. 北京: 清华

- 大学, 2011.
ZHANG Xiaoming. Development of a transient electric field sensor[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [9] 孙明杰. 瞬态电磁环境测量天线的研制和校准技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
SUN Mingjie. The development of antenna for measuring Transient electromagnetic environment and the investigation of calibration technology[D]. Nanjing: Southeast China University, 2014.
- [10] 邓凯. MEMS 电场传感器的设计与工艺研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2005.
DENG Kai. Design and fabrication research of MEMS-based electric field sensors[D]. Beijing: Institute of Electrics of Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [11] TRLEP M, HAMLER A, JESENIK M, et al. Electric field distribution under transmission lines dependent on ground surface[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1748-1751.
- [12] LIU W, LIU S, HU X. Transient electric field measurement system analysis and optimization design[C] // International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology, October 24-25, 2013, Chengdu, China: 1-4.
- [13] 谭毓苗. 非接触式高压直流验电器的研究与实现[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
TAN Yumiao. Research and implementation of non-contact high voltage DC electroscopel[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.
- [14] 罗培根. 基于电磁感应原理的非接触式验电器的研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
LUO Peigen. Research on non-contact electroscopel based on electromagnetic induction principle[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.
- [15] 刘建军, 王鹤, 崔国宇, 等. 一种基于矢量电场的多电极电场梯度计算优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 113-119.
LIU Jianjun, WANG He, CUI Guoyu, et al. Study on optimization method of multi-electrode electric field gradient calculation based on vector electric field[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 113-119.
- [16] WU Y H, DONG X Z, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [17] 李姗姗. 220 kV 电容型高压验电器启动电压特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
LI Shanshan. Study on threshold voltage characteristics of 220 kV capacitive type voltage detector[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [18] 张甜. 接触网检修作业防误挂接地线监测装置的研制[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
ZHANG Tian. The development of catenary monitoring device for anti-misoperation grounding wire in catenary maintenance[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [19] 李宏伟, 郭峰, 侯艳, 等. 变电站直流电源远程监测系统及 APP 应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 144-150.
LI Hongwei, GUO Feng, HOU Yan, et al. Substation DC power remote monitoring system and APP application[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 144-150.
- [20] 电业安全工作规程-发电厂和变电站电气部分: GB 26860—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
Safety code of electric power industry-electric part of plants and transformer substations: GB 26860—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [21] 电容型验电器: DL/T 740—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
Capacitive type voltage detectors: DL/T 740—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [22] RAJARAMAN P, SUNDARAVARADAN N A, MALLIKARJUNA B, et al. Robust fault analysis in transmission lines using synchrophasor measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 108-110. DOI: 10.1186/s41601-018-0082-4.

收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2019-01-05

作者简介:

王宁(1970—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为智能变电站通信安全、高电压检测技术; E-mail: ningwang@dlut.edu.cn

刘云华(1992—), 男, 通信作者, 硕士在读, 研究方向为高压验电器。E-mail: 2656982247@qq.com

(编辑 魏小丽)