

基于振动电容传感技术的高压验电方法研究

古亮,郝鸿凯,陈新岗,刘肖光,赵阿琴,刘欢

(重庆理工大学,重庆400054)

摘要:随着电网不断发展,对电力安全工具高压验电器提出了更高的要求。文章给出一种非接触式高压振动电容验电方法,采用振动电容验电头,对输电线路进行可靠验电。利用Maxwell仿真软件,建立模型并进行电场计算,研究振动电容传感技术应用于高压验电的可行性。当振动电容验电器置于高压电场环境下,振动电容极板可以检测出带电体的电场。结果表明,基于振动电容原理的验电方法,在高压电磁环境下能够检测输电线路的带电状态,该方法稳定、灵敏,交流、直流均可检测。

关键词:振动电容;高压;验电

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.022.021

中图分类号:TM835.1

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2019)22-0126-05

Research on high voltage electroscope based on vibration capacitance sensing technology

Gu Liang, Hao Hongkai, Chen Xingang, Liu Xiaoguang, Zhao Aqin, Liu Huan

(Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: With the rapid development of power grid developing, high-voltage electroscopes have higher requirement. This paper proposes an electroscope method for non-contact high-voltage vibrating capacitance, which uses a vibrating capacitor electroscope probe to perform power inspection on the transmission line. The Maxwell is used to establish the model and calculate the electric field to study the feasibility of vibrating capacitance sensor technology for high-voltage testing. The vibrating capacitor plate can detect the electric field of the charged device when the vibrating capacitor electroscope is placed in a high voltage electric field environment. The research results show that the method based on vibration capacitance sensing technology can detect the electrification state of transmission line under high-voltage electromagnetic environment, and has the advantages of good stability, high sensitivity and can be applied both AC and DC.

Keywords: vibrating capacitor, high voltage, electroscope

0 引言

随着电力工业的不断发展,我国高压输电技术发展迅速^[1]。电力设备的工作状态是否正常关系着电网的正常运行,通过运维检修工作来保障电网正常运行是常用的手段,在工作中保障工作人员的人身安全十分重要^[2-3]。高压验电器是检测高压线路和电力设备是否带电的专用安全工具,其可靠性将直接威胁工作人员人身安全^[4]。各类高压验电器基于不同的原理和方法,但大部分高压验电器在使用中均存在缺点和不

便,为安全生产带来隐患。交流、直流输电有着本质的区别,现有高压交流验电技术无法满足直流输电线路验电的需求,交流验电装置也无法在直流输电线路验电中使用^[5]。随着高压电网的大力建设,电网线路和电力设备大幅增加,对高压验电装置的需求越来越大^[6-9]。

文章采用振动电容传感技术,基于振动电容的传感器稳定性好、灵敏度高、抗干扰能力强。在介质电荷检测、不同材料的接触电位测量、非接触式表面电位测量等工业测量领域,振动电容式传感器得到了广泛的运用^[10]。与旋转电场传感器相比,体积更小,功耗更低^[11]。测量直流电场的方式多为直接感应式和旋叶

* 基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(KJ1709225);国际合作项目(L2015RR0126)

片式。直接感应式的测量方式稳定性不高,测量的结果准确度不高;旋叶型测量方式叶片是由电机驱动,功耗比较高,且体积大,稳定性不好。振动电容原理在静电测量中有突出的优势^[12],在国外得到大量使用。文章将振动电容原理运用于高压验电检测中,研究一种基于振动电容原理的高压交流、直流非接触验电方法。

1 振动电容测量原理

振动电容测量的原理是通过电容极板的振动实现电容的变化,产生相应感应电流,通过测量并计算得出被测物体表面的静电位^[13]。基于该方法的测量装置不需要与被测对象接触,测量结果不易受到干扰^[14]。

振动电容测量电场的原理图如图1所示,测量结构主要包括定极板和感应动极板,工作状态下感应极板在位置A和位置B之间来回振动,振幅为 ΔX 。 X_0 为两极板间相对距离。当传感器前方存在带电物体,定极板上感应电荷 Q 和动电极之间存在电位差 V ,假设电场均匀,则有带电体和极板间的电场 E 和电势差 V 呈线性相关。

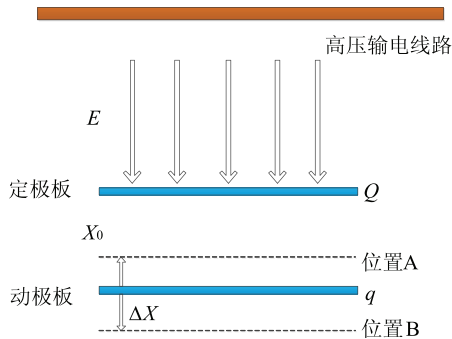


图1 振动电容测量原理图

Fig. 1 Principaldiagram of vibrating capacitor measurement

由于电场 E 的存在,在极板上产生感应电荷 q 。当两个极板的相对位置固定时,感应电荷 q 的值是电容 C 与板间电位差 V 的乘积:

$$q = CV \quad (1)$$

当两个极板间的相对位置发生改变,两个极板间的电容值以及感应极板产生的感应电荷也因此变化,极板向传感器后端的信号采集电路输出一个变化的感应电流。假设带电体和感应极板间的相对位置大小为 X_0 ,电容值为 C_0 。传感器动极板作振幅 ΔX 正弦规律振动,角频率大小为 w ,有两极板间的距离为:

$$X = X_0 + \Delta X \sin(wt) \quad (2)$$

感应动极板在驱动信号下进行振动,在此过程中

感应极板与外加电场形成的振动电容大小为:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{X_0 + \Delta \sin(wt)} = \frac{\epsilon_0 S}{X_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta X}{X_0} \sin(wt)} = C_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta X}{X_0} \sin(wt)} \quad (3)$$

式中 ϵ_0 是空气的介电常数; S 是电容极板相对面积大小。感应极板一个振动周期内,假设电场 E 不变,感应电极感应 $i(t)$ 电流为:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (4)$$

感应极板的振幅 ΔX 幅度极小,感应极板与带电体间距离 X_0 远大于振幅 ΔX ,设 $\Delta X = nX_0$, $n \ll 1$ 带入计算得:

$$i(t) = \frac{d(CV)}{dt} = -\frac{C_0 V n w \cos(wt)}{[1 + n \sin(wt)]^2} \quad (5)$$

因为 $n \ll 1$,故 $n^2 \sin^2(wt) \ll 1$, $2n \cos(wt) \ll 1$,式(5)可近似:

$$i(t) = -\frac{VC_0 n w \cos(wt)}{n^2 \sin^2(wt) + 2n \cos(wt) + 1} \approx -C_0 V n w \cos(wt) \quad (6)$$

输出接采样电阻,感应极板的电压 V_0 大小为:

$$V_0 = -AC_0 V n w \cos(wt) \quad (7)$$

A 为系数; C 为振动电容大小, $C_0 n w$ 由传感器本身设定,感应电流 $i(t)$ 的大小与电场大小有关。通过信号的后续处理,比如消除非线性干扰等,即得到传感器输出电压信号,该信号与被测带电体的电位呈线性相关。因此,通过传感器极板的电信号可以检测到带电体的电场,从而达到检测带电状态的目的。

2 建立仿真模型

基于振动电容原理,设计了一种基于振动电容传感原理的高压验电器。该验电器由验电器探头和绝缘棒组成。验电器探头主要包括验电器传感器、金属探头、信号处理电路、封装外壳等。该验电器传感器由固定极板和振动极板构成的振动电容器结构组成;固定电极板与金属探针连接,当验电器工作时,移动的极板上下振动,实现振动电容器。验电头结构模型如图2所示。

利用建模软件建立了验电器的麦克斯韦仿真模型,并利用有限元法分析法研究该方法的可行性。三维模型包括验电检测头、长绝缘杆、传输线等。架空传输线长4.0 m,验电器头为圆柱形,直径为50.0 mm,振

动电容的固定极板和移动板均为 0.5 mm 高度的圆片,建立 10 mm * 4.5 m * 4.5 m 的薄矩形导体模拟零电位大地,验电测量位置为导线中间。



图 2 验电头模型结构图

Fig. 2 Structure diagram of electroscope probe

选择高压直流电力导线 JL/LB1A630/45、高压交流电力导线 LGJ70/10 和高压交流绝缘电力导线 JKLGY50/8 作为对比。实际导线参数如表 1 所示:

表 1 导线参数

Tab. 1 Wire parameters

导线型号	截面直径/mm	绝缘厚度/mm
JKLGY50/8	9.1	3.4
LGJ70/10	11.4	—
JL/LB1A630/45	33.6	—

验电探针材质为钢;振动电容极板材料为铜;电路板和验电器的包装为塑料;绝缘棒由相对介电常数为 4.2 的环氧树脂制成;架空输电线路用铝材;架空绝缘导线的绝缘外护套为相对介电常数 4 的交联聚乙烯。三维仿真模型如图 3 所示。

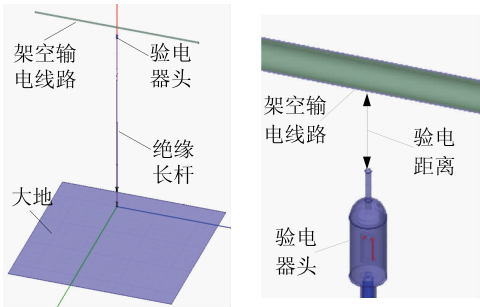


图 3 三维电场仿真模型

Fig. 3 3D electric field simulation model

3 仿真结果分析

以图 3 整体结构模型仿真,待验带电体设置为 10 kV 交流架空输电导线。通过模拟振动电容验电器测量带电体工作时的验电器周围电场和电位分布,研究振动电容传感原理用于验电的可行性;为比较接触距离和非接触距离的检测结果,改变验电探头与导线间的不同距离进行仿真;通过仿真讨论电容极板的尺寸大小对测量的影响。

3.1 验电方法的可行性分析

对验电器在高压交流电场下工作进行了仿真模拟。设置极板圆片半径为 15 mm,导线型号为 JKLGY50/8,验电探头与导线外表面距离为 50 mm。验电器工作通过改变振动极板与固定极板的相对位置来进行模拟仿真,对振动极板与固定极板相对间距 5 mm、6 mm、7 mm、8 mm 时的模型进行仿真计算。工频交流电场是低频电场,和直流电场一般均可作为静电场研究,电压激励设置为交流 10 kV 的最大相电压。两板间距离为 5 mm 和 8 mm 时验电头电场、电位仿真结果如图 4 所示。

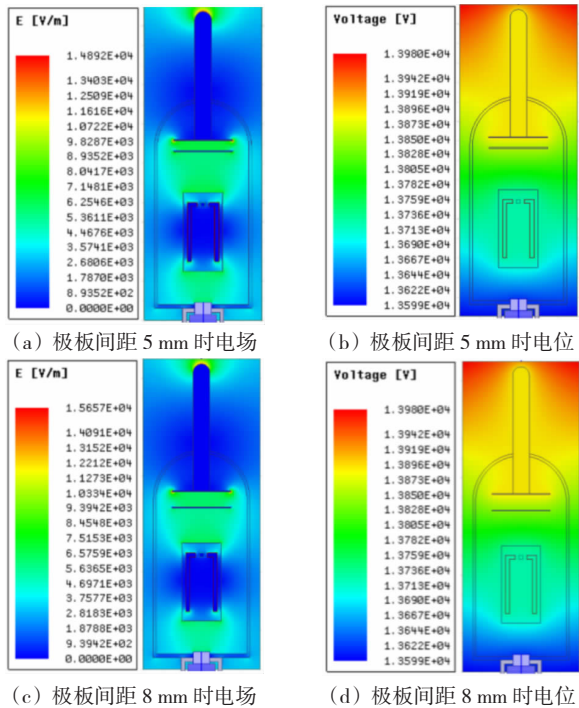


图 4 振动电容验电器电场、电位分布图

Fig. 4 Electric field and potential distribution of vibrating capacitor

由图 4(a)、(c)所示的电场分布,所设计的验电器结构外部形状由于使用了圆弧外形,对高压带电体的原始电场畸变影响很小,不会影响到验电器的带电判

断。由图4(b)、(d)的电位分布图,振动极板与固定极板之间的电位明显不相同。计算固定极板下表面和振动极板上表面的表面电位值,如表2所示。

表2 不同板间距的极板电位值
Tab.2 Potential values at different electrode distances

极板间距 /mm	定极板电 位值/kV	动极板电 位值/kV	电位差 /V
5	13.89	13.86	33.34
6	13.89	13.85	38.14
7	13.89	13.84	43.80
8	13.89	13.84	49.35

根据实测数据,两极板相对位置5 mm时,板间电位差为33.34 V;两极板相对位置6 mm、7 mm、8 mm时,板间电位差为38.14 V、43.80 V和49.35 V。振动极板作正对定极板的正弦振动,假设考虑验电器工作的瞬时状态或振动频率远远大于工频50 Hz,则极板间电位差的输出波形为与振动极板振动频率相同正弦波形,输出信号波形示意图如图5所示。根据振动电容传感原理,通过提取并分析该电位差作为特征量信号可用于判断高压导线的带电状态。因其振动特性故输出交流信号,所以能有效地检测较小的静电场。

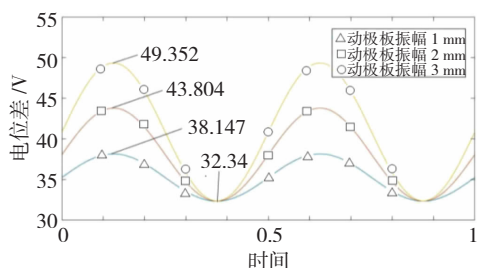


图5 振动电容极板间电位差波形图

Fig.5 Waveform diagram of potential difference between plates of vibrating capacitor

3.2 验电接触距离和电容极板半径的影响

分析验电探头与被测物体之间的距离和电容极板的半径对检测结果的影响。选取两极板间距5 mm时动极板位置和两极板间距7 mm时动极板位置作比较,其余参数不变,不同测量距离的极板电位值如表3所示。

当探头与被测物体接触时,板间的输出信号的强度最大。当探头与带电体之间的距离增大时,输出信号的强度减小。

表3 验电距离对极板电位影响

Tab.3 Influence of electroscope distance on plate potential

探针与带电 体距离/mm	两极板间距 5 mm 时电位差/V	两极板间距 7 mm 时电位差/V
0	41.83	56.35
50	32.34	43.80
100	32.03	42.58
150	30.92	41.91

分析了平板半径的影响,选取10 mm、15 mm、20 mm平板半径进行对比。板半径对势值的影响如表4所示。

表4 极板半径对极板电位值影响

Tab.4 Influence of plate radius on potential values

极板半径 /mm	两极板间距 5 mm 时电位差/V	两极板间距 7 mm 时电位差/V
10	29.08	39.59
15	32.34	43.80
20	36.91	49.39

由数据可看出,电容极板的半径越大即面积越大,极板之间的电位差越小。根据电容计算公式:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d} \quad (8)$$

式中 ϵ 为常数; S 为板的相对面积; d 为板之间的距离; k 为静电力常数。所设计的振动电容验电结构两极板相对设置。因此,极板的半径越大,极板的电容值就越大。可以看出,输出信号不受板的大小的影响。因此,选择小半径电容器板来设计验电器装置,可以有效地节省装置的尺寸。

4 交流、直流验电通用性分析

在静电场测量领域振动电容方法具有良好的效果。高压直流电场与高压交流电场有很大的不同。高压直流输电的单极传输导致空间电场存在带电粒子流场,但在基于电场测量的验电方法中,带电粒子流对电场的影响可不单独考虑,高压直流电场可看做高压静电场来判断。若不考虑环境因素的干扰,高压交流电场的测量输出信号为工频正弦波形。

为了研究基于振动电容传感原理在交、直流高压验电中的通用性,研究了LGJ70/10交流10 kV传输线和JL/LB1A630/45直流160 kV传输线下验电器的电场和电位分布。导线模型的设置参数如表1,其他参数

设置如下:验电头探针与带电体之间距离为 50 mm、电容极板的半径为 15 mm,选定两极板板间距 5 mm 时和 7 mm 时位置作对比,交流激励设置为交流最大运行相电压。

表5 交/直流电场下极板电位值
Tab.5 Plate potential values under AC and DC electric fields

导线型号	两极板间距 5 mm 时电位/V	两极板间距 7 mm 时电位/V
LGJ70/10	32.31	43.79
JL/LB1A630/45	364.57	493.84

利用仿真分析可以得出,振动电容方法可以应用于交流、直流高压验电检测。而在仿真研究中,将工频 50 Hz 交流电场作为瞬时静电场。在实际的高压验电工作中,当验电传感器置于直流电场中,不考虑带电粒子流,极板间信号为静电场的感应信号和振动极板交变信号的合成。若传感器置于交流电场中时,信号与振动频率和工频信号有关,根据板间不同的信号波形,可以用来判断待测高压电场的交流、直流特性。

5 结束语

基于振动电容传感技术的高压验电方法,利用电容极板振动时电容量随之变化的特点,来检测导体是否带电。

通过 Ansys Maxwell 建模仿真研究表明:振动式电容传感探针电极板振动幅值越大,则极板电位差信号越大;验电距离越小,则极板电位差信号越大;极板半径越大,极板电位差信号越大。该验电法能较稳定、有效、安全地检测出高压设备、输电线路是否带电。

由于振动电容量随振动变化,该极板间的输出信号幅值与被测电场具有强相关性,故该方法可应用于交流、直流验电,适用范围广范。

后续工作应针对不同电压等级、电压类型,研究相应的信号阈值,确保验电装置准确报警。并开展该验电方法的验电标准研究工作。

参 考 文 献

[1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 中国经济出版社, 2005.

- [2] 张文亮, 吴维宁, 胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 16-18.
- [3] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [4] 李姗姗. 220 kV 电容型高压验电器启动电压特性研究[D]. 武汉大学, 2017.
- [5] 谭毓苗, 陈新岗, 古亮, 等. 基于双轴传感的直流验电系统设计[J]. 中国测试, 2017, 43(5): 76-81.
- [6] 唐立军, 魏杰, 周年荣, 等. 高压带电设备电压等级非接触识别方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(24): 37-41.
- [7] 吴蕾, 高峰, 李季. 电压互感器测试仪的设计与实现[J]. 电测与仪表, 2014, 51(11): 1-5.
- [8] 汪金刚, 何为, 李青文, 等. 基于紫外脉冲检测的非接触式特高压验电仪[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 137-142.
- [9] 张婷, 方志, 陈陶陶, 等. 球形电场测量系统在高压测量领域中的应用[J]. 电测与仪表, 2007, (11): 11-16.
- [10] 丁松鹤, 张超, 周斌, 等. 振动电容式介质内部电荷测量仪研制[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 431-435.
- [11] L. B. Harris, Vibrating capacitor measurement of potential on crystal surface, Radiation effects and defects in solids, 1991, 119(2): 481-485.
- [12] J. Mizse, M. Reggente, MEMS Testing by Vibrating Capacitor, 2007 IEEE Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems, 2007, 2: 1-4, .
- [13] Wang Feng, Qiu Yuchang, Li Xinran, et al, Insulator surface charge measurement using an improved capacitive probe, Plasma Science & Technology, 2006, 8(5): 565-568.
- [14] 谢思莹, 梁铁瑞. 基于振动电容传感器的 3 维数字电场测量仪[J]. 兰州大学学报(自科版), 2013, (6): 847-853.

作者简介:



古亮(1976—), 副教授, 硕士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术、电气设备状态检测以及新能源开发等方面研究。

郝鸿凯(1991—), 硕士研究生, 从事电气设备状态检测研究。

Email: kyle. hao@outlook.com

陈新岗(1968—), 教授, 硕士生导师, 主要从事电气设备故障诊断研究。

刘肖光(1993—), 硕士研究生, 从事电气设备故障诊断研究。

赵阿琴(1994—), 硕士研究生, 从事高电压与绝缘技术研究。

刘欢(1997—), 本科生, 从事电气设备故障诊断研究。

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2019-03-22

(王艳丽 编发)