

# 基于比例差分探头的真空灭弧室真空度在线监测

陈昌龙, 邹积岩

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116021)

**摘要:** 采用了新型的比例差分双通道电场探头, 通过监测真空灭弧室屏蔽罩电位和周期性高频脉冲电压, 并将这两个测量值与实际电压值取比率, 经过标定后, 将该比率作为监测参数, 来分析真空灭弧室真空度的变化趋势。现场试验表明, 使用该探头可有效消除各相系统电压波动和灭弧室外围空间电场对测量精度的影响, 实现有效测量, 使用该方法的测量系统具有实际应用的价值, 可完成真空灭弧室真空度在线监测任务。

**关键词:** 真空灭弧室; 真空度; 在线监测; 电场探头; 比例差分

中图分类号: TM937

文献标志码: B

文章编号: 1001-1609(2009)06-0124-04

## On-line Monitoring of Vacuum Degree in Vacuum Interrupters Based on Proportional Difference Electric Field Detectors

CHEN Chang-long, ZOU Ji-yan

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116021, China)

**Abstract:** The new type proportional difference bi-channels electric field detectors can detect the development trends of vacuum level in vacuum interrupters, which makes the proportion between the voltage on the shield in vacuum interrupters and periodical high-frequency pulse voltage to be the monitoring parameter. The field testing shows that the detector can avoid the infection of periphery electric field effectively, has practical application value, and can be used for on-line monitoring of vacuum degree in vacuum interrupters.

**Key words:** vacuum interrupter; vacuum degree; on-line monitoring; electric field detector; proportional difference

### 0 引言

随着电力系统的不断发展和对供电可靠性要求的日益提高, 改善和增强开关装置在控制、测量、自监测、自诊断、故障记录以及其与控制中心联络所需的通信功能的自动化程度, 即所谓开关装置的智能化, 已成为当前国内外的一项重要课题。对运行设备进行在线监测与故障诊断, 不仅能预先发现投运设备的故障隐患, 使设备及时得到维修和维护, 而且可免除常规定期维修的大量工作, 具有重要的实际意义。真空灭弧室内部的真空度是保证真空开关正常运行的重要参数, 实现对其进行在线监测是真空开关智能化的一个重要内容。

近年来, 人们一直在探索真空开关真空度在线监测的方法, 并且已经提出了一些具体的技术方案,

并在工程中得到一些实验性应用。主要有采用旋转式电场探头的屏蔽罩电位法<sup>[1]</sup>、光电变换法<sup>[2]</sup>、耦合电容法<sup>[3]</sup>和冷阴极磁控放电法<sup>[4]</sup>等, 但是由于每种方案都存在一些固有的缺陷, 这些技术对真空开关的真空度进行在线监测目前还远未达到工程实际应用的地位。

文献[5]中提到真空度下降到一定程度时, 屏蔽罩上形成的交流电位幅值会发生变化, 同时屏蔽罩上还会有直流电位生成。文[6]中利用电场探头研究了真空开关屏蔽罩电位的有效值与真空度之间的关系, 得出了相应曲线。系统通过测量真空开关屏蔽罩的电位相对正常值的变化情况, 并运用趋势检测方法和比较算法对检测数据进行综合分析。

上述方法都是通过检测灭弧室中屏蔽罩上的电位来判断真空度的, 笔者通过试验对屏蔽罩电位与真空度之间的关系进行了验证。在现场工程应用中

收稿日期: 2009-06-17; 修回日期: 2009-08-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目, 金属蒸汽电弧等离子体调控理论在高压断路器领域中的应用(50537010)。

作者简介: 陈昌龙(1974), 男, 博士, 从事电力系统在线监测及现场检测仪器方面的研究。

发现以下两个主要问题。

(1)屏蔽罩电位的检测:要在现场实现对真空灭弧室屏蔽罩电位的检测,必须克服变电站及开关柜中各种空间电场的影响,从复杂的电磁环境中分离出真实的屏蔽罩电场。

(2)母线电压的波动及谐波的影响:真空灭弧室屏蔽罩的电位主要受真空灭弧室内部触头及导电杆所带工频高压辐射电场影响。当母线工频电压出现波动时,必将影响到屏蔽罩的电位值,从而会对真空度在线监测系统的监测电压值造成影响。在监测系统中,必须采取差分方式消除该电压波动所造成的监测误差,避免出现误报警现象。

为解决以上问题,笔者有针对性地提出新型结构的比例差分双通道电场探头,可有效解决真空度在线监测实际应用存在的问题。

## 1 比例差分双通道电场探头结构设计

### 1.1 有向性结构

对于真空灭弧室屏蔽罩电场探测而言,普通探测极板是全向接收的,也就是在任何方向上的辐射电场都将对此探测极板产生影响。开关柜中的辐射电场由带电母线、电缆、二次设备的辐射电场叠加,而且由于开关柜结构的不同,这些辐射电场所造成的影响也会不同。因此测量时,需要对电场探头进行一定的处理,使其可以完成对局部电场信息的探测。

笔者采用直接感应式电场探测获取屏蔽罩辐射电场信息。由于静电感应现象,探测极板上将出现感应电荷,有电势生成<sup>[7]</sup>。用这种方法得到的是真空灭弧室屏蔽罩表面的电位。为了保证测量的准确性,要求有很高的输入电阻。

在对真空灭弧室屏蔽罩电场探测中,为了避免开关柜中其他辐射电场的干扰,电场探头的探测极板装设接地的屏蔽筒。引入屏蔽筒接地后,可以使电场探头正前方灭弧室屏蔽罩的电场到该探测单元形成感应电势,这样也就使得原先没有方向性的电场探头具备了一定的方向性。电场探头结构见图1。该电场探头包括2部分:针状的高频探头用于检测由灭弧室真空度劣化引起放电所产生的高频辐射电场;探测极板用于感应灭弧室屏蔽罩的电位。通过在铜探测极板中心开孔,嵌入尼龙棒,再将针状的探头通过尼龙棒引出,这样两个探头之间绝缘。屏蔽筒中探测极板后的空间充入绝缘介质<sup>[8]</sup>。

### 1.2 屏蔽筒的影响

由于屏蔽筒接地,在探测单元接近被测真空灭弧室的过程中,屏蔽筒的尖端电场强度增加,空间电

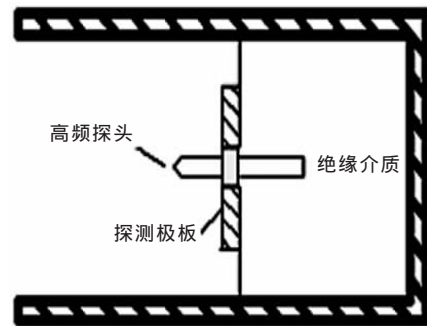


图1 电场探头结构

荷在探测极板的前方区域形成一带电屏蔽,降低了探测灵敏度,产生高压非线性失真。为了防止该现象产生,应使屏蔽筒与灭弧室保持特定距离,并且屏蔽筒的表面应当光滑,增大屏蔽筒口部的曲率半径,采用圆弧形截面,以避免屏蔽筒口部的电场畸变。

### 1.3 电场探头的安装

进行安装时,可通过调校装置调整电场探头与屏蔽罩之间的位置和角度,提高其对灭弧室屏蔽罩电场探测精度,并对其他电场达到较好的屏蔽效果。

高频探头和探测极板检测到的信号通过同轴电缆引入到安装在屏蔽筒后端的信号处理单元,其中高频信号传输线采用标准阻抗电缆。整个信号处理单元被严格屏蔽,以阻断空间电磁场的干扰,保证检测和信号处理的准确性。处理后的信号通过信号传输线送入监测终端。

电场探头的安装示意图见图2。

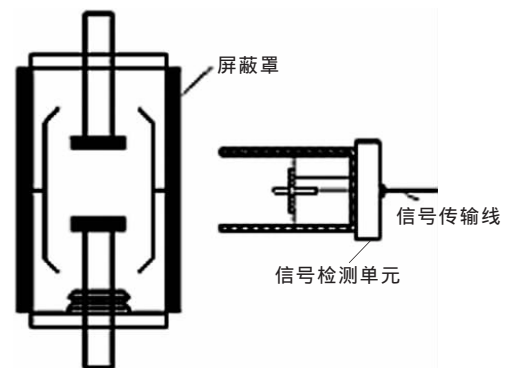


图2 电场探头安装示意图

## 2 试验结果及分析

选择电场探头,分别取屏蔽筒屏蔽深度及口径为(10 cm,2 cm)、(15 cm,3 cm),对带相同电位的灭弧室屏蔽罩进行电位检测试验,得到不同屏蔽深度及口径对比曲线,见图3。图3中,时基:5 ms/格,幅值:500 mV/格。

由图中可看出,在这种外加屏蔽筒的探测单元

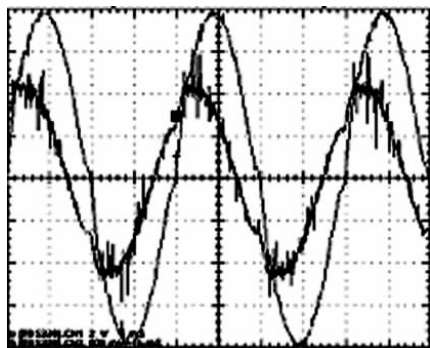


图3 不同屏蔽深度及口径对比曲线

中, 电场探头的灵敏度与屏蔽深度以及口径是相矛盾的。屏蔽越深, 口径越小, 虽然方向性越好, 探测的位置准确度越高, 且使探测极板对屏蔽罩的影响越小, 但同时致使探测极板的有效感应面积越小, 仪器灵敏度降低, 探测到的信号也越弱。

屏蔽太浅, 会影响屏蔽的效果, 也会扩大被测面积的大小; 屏蔽太深, 会降低仪器的灵敏度。此外, 探测极板与被测目标之间的距离也会影响被测面积的大小, 显然探测极板离目标越远, 被测面积也相应增大。

使用电势叠加原理, 可以分析该探测单元所感应到的电势<sup>[9]</sup>  $V$  为

$$V = \int_x \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 R_d} \quad (1)$$

式(1)中的积分限是由探测单元的屏蔽深度和其目标体的距离决定的, 是一个小范围积分。

针对一个均匀带电目标进行电势叠加, 得  $dV$  为

$$dV = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 R_d} = \frac{\sigma x d \theta dx}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{x^2 + (l+d)^2}} \quad (2)$$

积分得  $V$  为

$$V = \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{\sigma x d \theta dx}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{x^2 + (l+d)^2}} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} [\sqrt{R^2 + (l+d)^2} - (l+d)] \quad (3)$$

式(3)中,  $\sigma$  为带电体电荷面密度;  $l$  为屏蔽口与探测目标之间的距离;  $d$  为探测极板的深度;  $R$  为探测极板所能探测到的目标体的圆面积半径;  $r$  为屏蔽筒的口径, 根据几何关系可知,  $R$  为

$$R \approx r \frac{l+d}{d} \quad (4)$$

可以得到  $V$  为

$$V = \frac{(l+d)\sigma}{2\epsilon_0} (\sqrt{\frac{r^2}{d^2} + 1} - 1) = \frac{(l+d)\sigma}{2\epsilon_0 d} (\sqrt{r^2 + d^2} - d^2) \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 探测极板感应电势随  $d$  增大,  $r$  减小而衰减得  $\theta$  为

$$\theta = 2\arctg(\frac{r}{d}) \quad (6)$$

式(6)中的  $\theta$  在一定程度上体现了该探测电极方向性的好坏,  $\theta$  越小, 极板形成的探测角度越小, 方向性也就越好。

### 3 信号处理

#### 3.1 高频信号处理

高频信号处理通道框图见图 4。

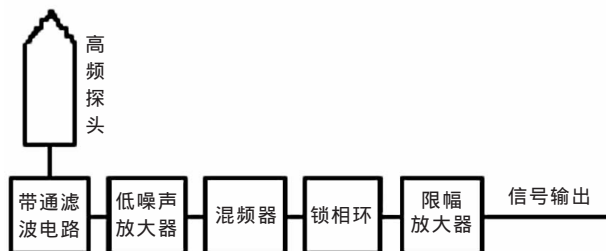


图4 高频信号通道框图

图 4 中, 由高频探头检测到的高频电场信号先经过 50~500 kHz 带通滤波器, 检出其中的高频成分, 再经过低噪声放大器、混频器、锁相环及限幅放大器处理后输出。

对真空度为  $10^{-1}$  Pa 的真空灭弧室施加高电压, 使之产生放电, 通过高频信号通道检测到的实际信号波形见图 5。

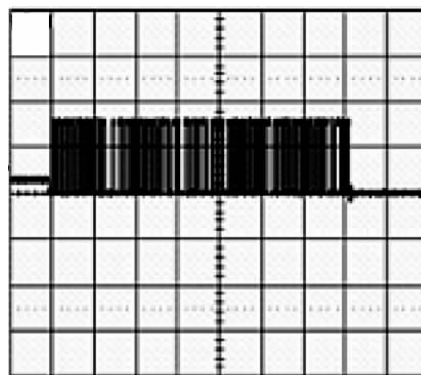


图5 高频通道检测信号波形

由图 5 可清晰地看到真空灭弧室放电产生高频电场辐射波形的波头和波尾, 并可以完整地监测到放电过程。通过傅里叶分析, 可得到其中的频率分量。通过这些措施可以为真空度在线监测提供辅助判据<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 工频及直流信号处理

灭弧室屏蔽罩电位通过探测极板检出后的处理电路见图 6。

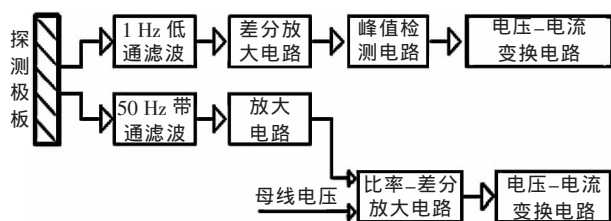


图6 低频信号通道框图

低频信号处理分为2路:一路通过1 Hz低通滤波电路分离出直流分量,经过差分放大、峰值检测和电压-电流变换后,转化为输出信号;另一路可通过50 Hz带通滤波电路分离出工频交流分量,经过放大后,与母线电压取比率-差分,然后经电压-电流变换,转换为输出信号。

由电路框图可以看到,对真空灭弧室屏蔽罩电位信号的处理分别是针对屏蔽罩的直流和交流电位。如前所述,这两者都可以作为真空度的标定信号。但对于交流信号,将之与母线电压取比率-差分,通过这种方式可有效消除母线电压波动和谐波的干扰,防止出现误报现象。

#### 4 结语

当真空压强接近0.01 Pa(国家标准要求的极限真空度)时,虽然正常状态屏蔽罩上电位无明显变化,但带载操作时,在电弧作用下,短时真空压强要升高一个数量级以上,屏蔽罩上电位出现明显变化并且伴有放电。

(上接第123页)

[3] 纪航,朱永利,郭伟.基于模糊综合评价的变压器状态评分方法研究[J].继电器,2006,34(5):29-33.  
 [4] 王谦.基于模糊理论的电力变压器运行状态综合评估方法研究[D].重庆大学,2005.  
 [5] 廖玉祥.一种电力变压器运行状态综合评估模型的研究[D].重庆:重庆大学,2006.  
 [6] 袁志坚,孙才新,袁张渝,等.变压器健康状态评估的灰色聚类决策方法[J].重庆:重庆大学学报(自然科学版),2005,28(3):22-25.

经过试验及现场环境应用,证明精心设计的比例差分双通道电场探头可有效消除各种电场干扰,并能抵消掉母线电压波动造成的影响。该方法可有力推动真空度在线监测的实用化。

#### 参考文献:

[1] 赵子玉,李兆治,陈雾,等.用旋转式电场探头在线检测灭弧室真空度[J].高压电技术,2003,29(10):29-31.  
 [2] 段雄鹰,赵子玉,邹积岩.真空灭弧室真空度在线检测的试验研究[J].高压电技术,2000,38(4):30-32.  
 [3] 邹积岩,何俊佳,程礼椿.真空灭弧室的真空度测试与在线监测[J].高压电技术,1993,29(3):13-17.  
 [4] 潘有顺.10 kV真空开关在线真空监测装置:中国,00210754.6[P].2000-12-06.  
 [5] 李卫国,邓本再,罗日成,等.真空灭弧室内部气体压力的在线诊断系统[J].高压电技术,2004,40(3):213,214,217.  
 [6] 李卫国,罗日成.真空开关真空度在线检测系统的开发[J].真空,2005,41(4):52-55.  
 [7] 薛增泉,吴全德.电子发射与电子能谱[M].北京:北京大学出版社,1993:193-201.  
 [8] THOMAS D E, WIGGINS E M, SALAS T M, et al. Induced Transients in Substation Cables: Measurements and Models[J]. IEEE Transactions on P.D, 1994, 9(6):78-81.  
 [9] VAN DEURSEN A P J, VAN HORCK F B M, VAN HELVOORT, et al. Transfer Impedance of Nonmagnetic Conduits of Various Shapes [J]. IEEE Transactions on EMC, 2001, 43(1):293-296.  
 [10] NUCCI C A, RACHIDI F. On the Contribution of the Electromagnetic Field Components in Field-to-transmission Line Interaction[J]. IEEE Transactions on EMC, 1995, 37(4):184-189.

[7] 熊浩,孙才新,杜鹏,等.基于物元理论的电力变压器状态综合评估[J].重庆大学学报(自然科学版),2006,29(10):24-28.  
 [8] 曲在滨,李全龙,徐晓飞.战场目标打击顺序的多属性决策方法[J].计算机工程与设计,2007,28(13):3 025-3 026,3 122.  
 [9] 岳意定,王雄.房地产投资的多属性模糊贝叶斯决策[J].统计与决策,2007,(4):42-44.  
 [10] 董媛媛,赵明霞.多属性决策的理想解法及其应用[J].武汉:统计与决策,2006,(11):19-20.

检验报告查询 请浏览中国高压电器网  
 (www.chinahva.com)