

35 kV 真空灭弧室真空度在线监测系统的研制

刘亚东¹, 戚伟¹, 罗林根¹, 钱勇¹, 江秀臣¹, 吴钧²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市电力公司超高压输变电公司, 上海 200042)

摘要: 为了监测真空灭弧室内真空度的状况,并保证供电的连续性和可靠性,笔者设计了一套应用于35 kV真空断路器的真空灭弧室真空度在线监测系统。详细阐述了系统的工作原理、硬件结构和软件设计方案。该系统利用旋转式电场探头,监测屏蔽罩附近直流电场的变化,同时开发了下位机数据采集单元和上位机监控管理单元,可以远程在线监测真空灭弧室的真空度变化情况。现场运行结果表明,该系统可以稳定、可靠地监测真空灭弧室内真空度的改变,测量灵敏度高,成本低廉,运行可靠,抗干扰能力强。

关键词: 真空灭弧室; 在线监测; 屏蔽罩电位

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0449-04

Development of an On-line Monitoring System of Vacuum Pressure in 35 kV Vacuum Interrupter

LIU Ya-dong¹, QI Wei¹, LUO Lin-gen¹, QIAN Yong¹, JIANG Xiu-chen¹, WU Jun²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company Ultrahigh Voltage Bureau, Shanghai 200042, China)

Abstract: An on-line monitoring system of vacuum pressure for 35 kV vacuum interrupter was designed in order to monitor the vacuum condition in vacuum interrupter and to ensure the continuity and reliability of electricity power supply. The operation principle, hardware structure and software plan of the system were explained. The system can evaluate the internal pressure of the vacuum interrupter by monitoring the static charge around shield using electric field sensors with rotating electrode. Moreover, a data-collecting device and a controller were also developed for long-range and on-line monitoring. The result shows that this system runs steadily and reliably with low cost and high anti-interference performance.

Key words: vacuum interrupter; on-line monitor; shield's potential

0 引言

真空灭弧室是真空开关的核心部件,其以高真空作为绝缘和灭弧介质,对短路电流与负荷电流起着断开和闭合的作用。真空灭弧室真空程度由内部残余气体的压强来表示,压强越低表示灭弧室内真空度越高,当压强高于一定值后,真空开关将失去绝缘和开断能力。随着对真空开关运行可靠性要求的不断提高,监测真空灭弧室内真空度的状况、保证灭弧室的电气性能已经成为电力系统急需解决的问题。真空灭弧室的真空度监测方法可以分为离线监测和在线监测两大类。离线监测需要停电进行,为了保证供电的连续性和可靠性,不便对电网长期处于运行或热备用状态的关键开关进行停电检测,因此,研制出一种稳定可靠的真空灭弧室真空度在线监测

系统,既是当前急需解决的重要问题,也是智能化高压电器的发展方向。为此,国内外专家和学者做了大量的研究,试图找到一种可以不改动真空断路器主体结构,并能及时准确地监测运行中的真空开关设备的真空度状况的有效方法^[1-3]。

目前已经提出的在线监测方法有:电光变换法^[4]、耦合电容法^[5]、超声波检测法^[5]、脉冲电流检测法^[5]、三相桥法^[5]、通过分压电容检测屏蔽罩放电电流法^[6]、检测自闭力的平衡弹簧与千分表法^[5]等。笔者采用屏蔽罩电位法^[7],成功研制了一套新的适用于35 kV真空断路器的真空灭弧室真空度在线监测系统。屏蔽罩电位法使用光纤与电光晶体探头测试屏蔽罩电场,但此类探头成本高,无法在生产中大规模推广应用。为此,该系统采用旋转式电场探头,成本低廉,运行可靠,能够及时获得灭弧室真空度劣化的信息,减少事故发生,具有较高的推广应用价值。

收稿日期:2007-11-02; 修回日期:2008-05-13

作者简介:刘亚东(1982-),男,湖北省广水人,硕士研究生,研究方向为嵌入式系统在线监测技术中的应用。

1 在线监测系统的总体方案

该系统通过监测屏蔽罩直流电位来判断灭弧室内真空度的状况。系统的整体结构见图 1。

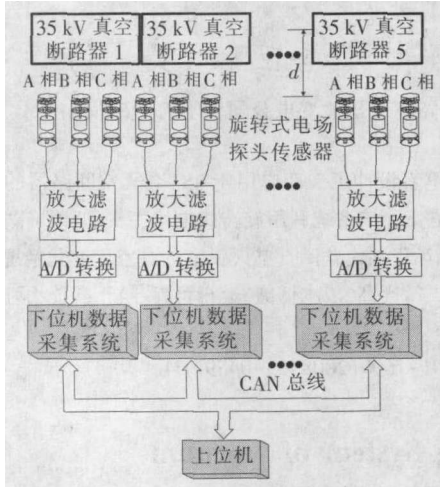


图1 真空度在线监测系统结构框图

该系统是一个分布式系统，可以同时监测 5 个 35 kV 真空断路器。每个真空断路器有 3 个真空灭弧室，分别承受 A、B、C 三相的电压。传感器探头输出的是真空灭弧室的屏蔽罩电位信号，经过放大、滤波、A/D 转换后，输入下位机数据采集系统进行处理；处理后的信号为屏蔽罩直流电位，通过 CAN 总线传送到上位机系统。上位机根据直流电位对真空度进行标定、显示，评估灭弧室内的真空状态。

2 系统的测量原理

灭弧室密封材料漏气、电弧放电过程中触头材料释放的微量气体，都会造成灭弧室内真空度下降。我国有关标准规定：“用以装配真空断路器的真空灭弧室的内部气体压力应低于 1.33×10^{-2} Pa，这是指静态条件下的可测参数”。很多文献和实验证明，运行中的真空开关真空度临界值是 6.6×10^{-2} Pa，当真空度小于这个数值的时候，真空开关视为无法正常工作^[1]。

2.1 屏蔽罩电位法测量原理

真空断路器在工作时，其真空灭弧室屏蔽罩上的电位是由高压部分-屏蔽罩、屏蔽罩-接地电极之间分别所具有的静电电容的分压决定，当真空灭弧室在正常的工作电压和内部气体压力下运行时，灭弧室屏蔽罩上不带有静电荷；而当真空灭弧室的内部气体压力升高导致绝缘强度降低，触头与屏蔽罩间会发生局部放电，从而使灭弧室的屏蔽罩上带有一定的静电荷，呈现出直流电位^[8]。随着真空度的持续劣化，屏蔽罩的直流电位也相应地改变。屏蔽罩电位法就是通过测量屏蔽罩的直流电位，即屏蔽罩上积累静电荷数量来监测真空度^[9]。

为了验证真空度与屏蔽罩上直流电位的关系，

在实验室用与现场同型号的真空断路器多次实验得到真空断路器的真空度与屏蔽罩上直流电位的关系曲线，见图 2。

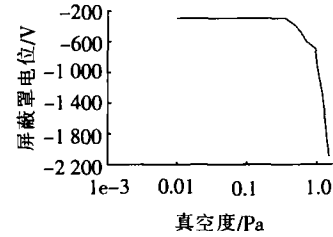


图2 屏蔽罩直流电位与真空度曲线

从图 2 可以看出，当真空度下降到 1 Pa 左右时，屏蔽罩直流电位有明显的变化，由此直流电位的变化可以作为真空断路器真空度变化的依据。

2.2 电场探头传感器工作原理

该系统设计的旋转式电场探头由上下两个金属圆片和微电机组成，金属圆片表面均匀分布着若干个孔洞。上面的称为“动片”，可以高速旋转；下面的称为“静片”，固定在电机轴上。当动片与静片的孔洞完全重合时，外电场完全被屏蔽，感应电荷为零；当动片与静片的孔洞不完全重合时，暴露在外电场中的静片上积累感应电荷。旋转探头结构见图 3。

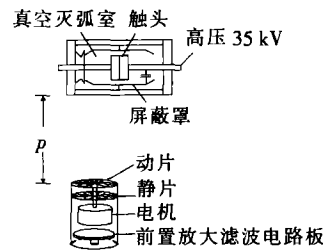


图3 传感器测试原理

感应电荷形成的感应电流为 $I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(UC)}{dt} = U \frac{dC}{dt} + C \frac{dU}{dt}$ ，其中 U 包括直流电位和交流电位两部分。在直流电场的情况下，有 $\frac{dU}{dt} = 0$ ，则 $I = U \frac{dC}{dt}$ 。又

因为平行板电容的 $C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{S}{d}$ （空气中 $\epsilon = 1$ ），则 $I = U \frac{dC}{dt} = U \frac{d}{dt} \left(\frac{S}{d} \right) = \frac{U}{d} \times \frac{dS}{dt} = E \frac{dS}{dt}$ 。根据所设计的传感器探头的叶片形状，静片外露的面积随动片的旋转成正弦变化，因此感应电流经取样后输入到数据采集电路，经过滤波放大后可以得到较好的正弦波波形。传感器输出波形见图 4。

3 系统的硬件结构

屏蔽罩电位法测量真空度的原理见图 5。

3.1 传感器硬件结构

传感器内置放大电路板由取样电阻、放大电路、

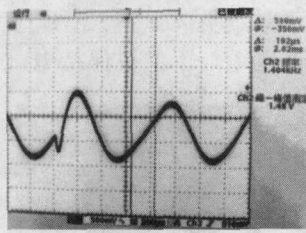


图4 传感器输出波形

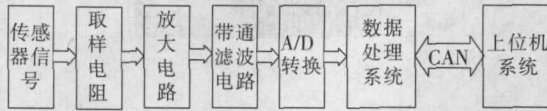


图5 屏蔽罩电位法测量原理

带通滤波电路3部分组成^[10,11]。

系统从传感器得到的感应电流信号输入到放大电路板上,经过取样电阻变成电压信号。传感器耦合得到的信号微弱,不利于后续处理,因此先通过前置放大,增加信号强度。然后通过滤波器,取得此频段范围内的传感器输出信号,作为屏蔽罩电位信号^[12]。

传感器线性度实验示意图见图6,把直流电压引到一个均压环上作为高压正极,其半径R远大于传感器的半径r,以减小传感器周围电场畸变对测量的影响。

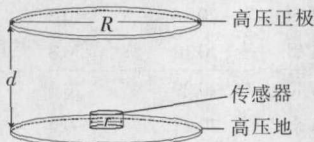


图6 线性度实验示意图

在高压正极端分别施加不同的电压测得传感器的输出见图7,从图7可以看出当所加电压大于200V时,传感器的输出与所加电压保持良好的线性关系。

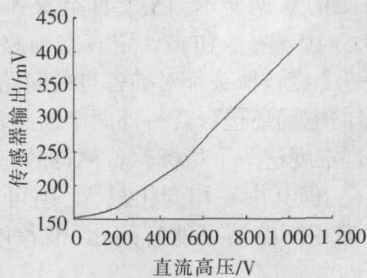


图7 传感器线性度曲线

3.2 下位机数据采集系统硬件结构

下位机数据采集系统包括数字和模拟两部分,主要负责三相传感器输出信号的采集、分析和处理。

模拟部分共有3路相互独立的采集通道,分别采集A、B、C三相的传感器输出信号。利用可编程增益放大器PGA对探头输出信号进行二次放大,以提高信号的传输能力。

数字部分由CPU C8051F040控制,采用500 kSPS的A/D模块采集模拟信号;通过软件将采集后的数

据进行滤波和交直流分离,得到屏蔽罩直流电位,再经过CAN总线传送给上位机^[13]。

下位机电气连接见图8。

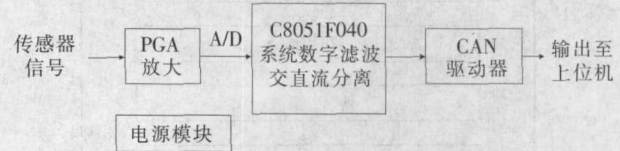


图8 下位机硬件结构图

系统采用抗干扰性能极好的CAN总线技术,不仅增加了系统可靠性(与RS485总线相比),也减少了连线芯数(与以太网通讯相比),并具有较高的通讯速率,既能采集和处理传感器输出信号,又能进行远距离高速通讯。

3.3 上位机监控管理系统硬件结构

上位机系统的硬件结构见图9。

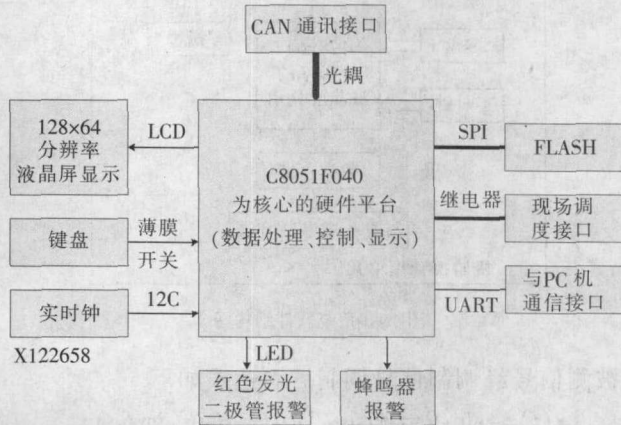


图9 上位机硬件结构图

上位机通过总线读取指定通道的数据,根据直流电位对真空度进行标定,在控制面板上显示各真空灭弧室真空度、交流电位和直流电位的数值,并将数据存储存储在Flash中,当真空度超过阈值时,进行声光报警。

系统采用继电器来控制运行和关断的时间,并预留了与PC机通讯的接口。

4 系统的软件设计方案

该系统通过对信号的放大、采集、滤波、交直流分离、真空度标定来判断真空灭弧室内真空度的状况。整个软件结构由下位机数据采集处理单元和上位机监控管理单元组成。软件设计框图见图10。

下位机数据处理单元主要负责三相传感器输出信号的采集、分析和处理。

旋转式电场探头传感器输出的屏蔽罩电位分为交流和直流两部分。一个为工频交流场信号,设为 $A \sin(2\pi f_c t)$, f_c 等于 50 Hz;另一个是直流场信号,设电压幅值为 B 。旋转电机的转速是 $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 是电机转动频率,它的作用是产生一个调制信号 $\sin(2\pi f_0 t)$ 。

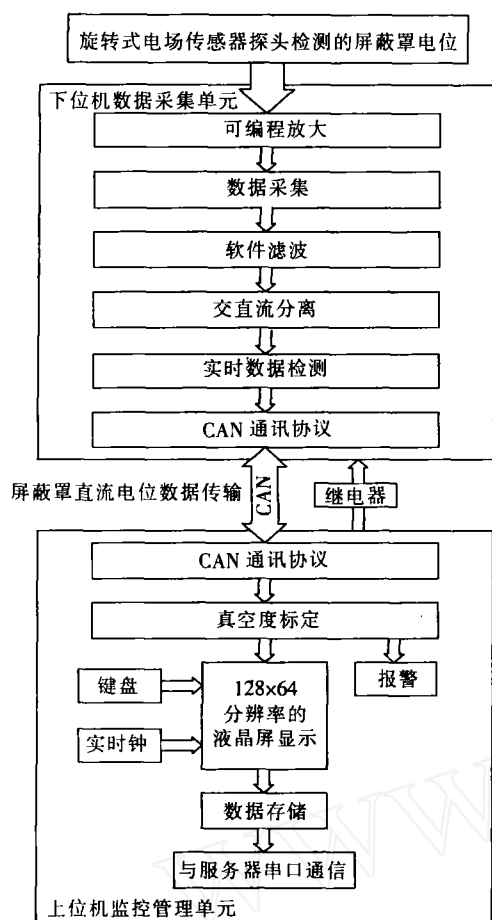


图10 系统软件结构图

被测信号经调制信号调制后表达式如下

$$x(t) = A \sin(2\pi f_c t) \sin(2\pi f_0 t) + B \sin(2\pi f_0 t) = -\frac{A}{2} \cos[2\pi(f_c + f_0)t] + \frac{A}{2} \cos[2\pi(f_c - f_0)t] + B \sin(2\pi f_0 t)$$

系统用在 35 kV 等级的真空断路器上,每一相上有 20 kV 的交流电压,此电压在屏蔽罩上面分得的交流电压比屏蔽罩上的直流电压高出一个数量级以上,为了精确得到屏蔽罩上的直流电位,同时减少硬件滤波器的不确定性,选用频域加窗的办法,在频域内把无用频率的分量强制赋值为 0,同时得到有用频率分量的幅值。

下位机把处理得到的屏蔽罩直流电位信号经 CAN 总线上传到上位机,上位机对数据进行汇总、分析真空度状况并在控制面板上显示出来,同时存到 Flash 中,方便以后查询。上位机控制前端节点的运行,由于真空度变化比较缓慢,故每天定时采集 3 次数据,这样也减少了旋转探头电机工作的时间,延长整个系统的寿命。

5 现场运行情况分析

研制的系统已在山东某变电站投入运行。监测系统的传感器和下位机安装在真空断路器的接地机

壳上,传感器正对真空灭弧室,见图 11。上位机安装在主控室,通过电缆与下位机保持电气连接。

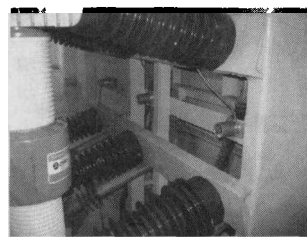


图11 现场安装照片

自投入运行之日起,系统工作稳定。现场采集到的数据见表 1,此数据为一周内监测数据的平均值,其中交流电压为相电压。

表 1 现场检测的数据

		交流电压/kV	直流电位/kV	真空度/Pa
断路器 1	A 相	20.21	0.4	4.2e-03
	B 相	20.21	0.3	4.1e-02
	C 相	20.21	0.3	5.4e-02
断路器 2	A 相	20.21	0.3	5.1e-02
	B 相	20.21	0.3	2.5e-02
	C 相	20.21	0.4	3.8e-02
断路器 3	A 相	20.22	0.3	3.7e-02
	B 相	20.18	0.3	4.0e-02
	C 相	20.12	0.3	2.9e-02
断路器 4	A 相	20.29	0.3	5.6e-02
	B 相	20.21	0.4	1.5e-02
	C 相	20.20	0.3	3.9e-02
断路器 5	A 相	20.21	0.3	3.0e-02
	B 相	20.21	0.3	3.2e-02
	C 相	20.21	0.3	2.6e-02

现场检测的数据显示:15 个真空灭弧室的真空度都小于 6.6×10^{-2} Pa,初步认定真空断路器工作正常。但是每一个旋转探头都对准各自的断路器,见图 11,探头测得的电场还包含有另外两个断路器的分量,故不能只看真空度这一个指标,若测得的三相数据较以前都有变化,但其中一相变化最大,则可初步判定变化最大的那相断路器可能有问题,推荐停机检查。

6 结语

该系统通过监测屏蔽罩附近直流电场的变化来判断灭弧室内真空度的状况。运行结果表明,该系统能满足 35 kV 真空灭弧室真空度在线监测的要求,对断路器真空度的测量具有较高的参考价值,为真空开关的安全运行提供了保障。

参考文献:

- [1] 石岩, 邹旭. 真空断路器灭弧室真空度在线监测装置[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 61-62. (下转第 455 页)

电时域波形较陡,相对来说各个频段内的能量分布较均匀,但两个脉冲的FFT谱图分布十分相像。因此,由于局部放电脉冲信号的宽带特性,FFT谱图不适合被用于类似图1所示的时域波形参数特征提取。

图2(c)、(d)和3(c)、(d)是直流下空气电晕放电脉冲与针板模型放电脉冲的FMT谱图。由于梅林变换是在双曲线信号基上分解信号的,对展缩能保持模值不变性,使得FMT谱图能很好地反映宽带信号在梅林尺度 β 上的模值变化。可以从图上看出,FMT谱图一般为高斯脉冲状,由于信号本身所含频率分量及其幅值的不一样,在谱图上可以清晰分辨。图2(d)由于信号的低频段能量占绝大部分,使得FMT谱图左倾,即整个谱图在梅林尺度 $\beta \leq 0$ 占大部分。而图3(d)由于信号的低频段能量和高频段能量所占比较相对均匀,使得FMT谱图在梅林尺度 $\beta > 0$ 和 $\beta < 0$ 所占比例也较均匀。还可以从FMT谱图上发现:图2(d)在 $\beta \leq 0$ 区域,即频域脉冲的上升沿处呈现很多次峰,在 $\beta > 0$ 区域的下降沿则比较光滑,这同样是由于空气电晕脉冲在低频段对应大能量幅值所引的;对比图3(d),其FMT谱图在 $\beta > 0$ 区域也有许多次峰,这与其FFT谱图分析相一致(整个频谱分布相对比较均匀)。

总之,信号本身所含的频率成分以及对应幅值的大小,经过频域变换之后,FMT谱图要比FFT谱图体现出了更多的特征信息。因此可以对FMT谱图定义如图1所示的“频域”特征参数,或借助于其它相对简单的数学方法,在原有时域指纹库的基础上添加“频域”指纹库。而对局部放电进行在线监测时,由于其为快速算法,因此结合图1,即可实时提取脉冲信号的时域和“频域”特征参数,对放电模式

给与快速和准确的区分。

3 结语

笔者给出了基于FFT、适用于实际离散信号的快速梅林变换方法。首次尝试使用梅林变换对宽带局部放电信号进行了处理,得到了其类似于时域波形的特殊“频域”波形。直流下宽带脉冲信号处理分析结果表明,该变换得到的FMT谱图比FFT谱图体现了更多的特征信息,易于频域波形的特征参数提取。

参考文献:

- [1] 郝艳捧, 王国利. 单个局部放电脉冲测量系统[J]. 电工电能新技术, 2001(4): 31-35.
- [2] KREUGER F H. Evaluation of Discharge Damage by Fast Transient Detection and Statistical Analysis. CIGRE [C]// Paris, 1994: 106-110.
- [3] 司文荣, 李彦明. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 481-486.
- [4] 司文荣, 李彦明. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 11-15.
- [5] 王国利, 李彦明. 油中典型局部放电模型放电波形特征参数的提取[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 34-37.
- [6] 王 猛, 高文胜. 局部放电脉冲波形的时频联合分析特征提取方法[J]. 电工技术学报, 2002, 17(2): 76-79.
- [7] 王国利, 李彦明. 油中典型局部放电模型放电波形特征参数的提取[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 34-37.
- [8] 许稼, 张静远. 一种基于Mellin变换的水声宽带相关模糊函数的快速算法[J]. 海军工程大学学报, 2000(6): 6-10.
- [9] 王 军, 李亚安. 基于梅林变换的宽带水声信号处理[J]. 兵工学报, 2007, 28(1): 87-90.
- [10] 胡昌华, 周 涛. 基于Matlab的系统分析与设计-时频分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [10] MERCK W F H, DAMSTRA G C, BOUWMEESTER C E, et al. Methods for Estimation of the Vacuum Status in Vacuum Circuit Breakers [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(4): 400-404.
- [11] WALCZAK K. Method for Vacuum State Evaluation Based on Analysis of Dynamics Changes of Electron Field Emission Current and X-radiation in Time[C]// International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours, France, 2002: 231-234.
- [12] 赵子玉, 宋焕生, 江秀臣. 等一种测量真空开关灭弧室真空度的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (16): 144-149.
- [13] US Patent, NO. 3263162. JOHN R L. Apparatus and Method for Measuring the Pressure Inside a Vacuum Circuit Interrupter[S]. 1962.

(上接第452页)

- [2] 赵子玉, 江秀臣. 真空灭弧室内气体压强与离子电流的关系[J]. 高压电器, 2000, 36(5): 16-18.
- [3] 陈志钊. 真空灭弧室蒸汽屏蔽罩的研究及在真空度监测方面的应用[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2000.
- [4] 卢东贵, 史小军. 真空度监测技术在煤矿井下应用的探讨[J]. 工矿自动化, 2006(4): 61-63.
- [5] 姚爱明. 真空灭弧室真空度的超声和脉冲电流的检测与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [6] 云伟俊. 真空灭弧室真空度测试方法与在线监测技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [7] 赵子玉, 李兆治. 用旋转式电场探头在线监测灭弧室真空度[J]. 高压技术, 2003, 29(10): 29-31.
- [8] 段雄英, 赵子玉. 真空灭弧室真空度在线检测的试验研究[J]. 高压电器, 2000, 36(4): 30-32.
- [9] 赵子玉, 陈 雾. 不拆卸灭弧室测量真空度的技术研究[J]. 电工技术杂志, 2003(8): 33-35.