



文章编号:1671-251X(2018)06-0006-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017120019

真空断路器真空度检测方法研究现状与展望

吴梦泽^{1,2}, 宋建成^{1,2}, 高云广^{1,2}, 陈姝姝^{1,2}

(1. 太原理工大学 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024;
2. 太原理工大学 矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 山西 太原 030024)

摘要:介绍了真空断路器真空度检测方法——观察法、工频耐压法、脉冲磁控放电法、屏蔽罩电位法等离线式检测方法和耦合电容法、局部放电法、旋转电场探头法、X射线法、内置传感器法等在线式检测方法的研究现状,分析了各方法的检测原理、特点和应用情况。指出真空度离线式检测方法中脉冲磁控放电法和工频耐压法因为成本低、检测简单和重复性好,成为目前应用最广泛的真空度检测方法,但定期停机检查真空度成为制约该类方法发展的最主要因素;真空度在线式检测方法可实时检测真空度,及时发现真空度的劣化,但存在精度较低、成本高、抗干扰能力和稳定性较差等问题,因此未得到广泛应用。提出提高真空度在线式检测方法精度和融合多种真空度检测方法是真空断路器真空度检测方法的发展趋势。

关键词:真空断路器;真空灭弧室;真空度;真空度检测方法

中图分类号:TD611 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180521.1543.002.html>

Research status and prospect of vacuum degree detection methods for vacuum circuit breaker

WU Mengze^{1,2}, SONG Jiancheng^{1,2}, GAO Yunguang^{1,2}, CHEN Shushu^{1,2}

(1. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Research status of vacuum degree detection methods for vacuum circuit breaker was introduced including off-line detection methods such as observation method, power frequency withstand voltage method, pulsed magnetron discharge method and shield potential method, and on-line detection methods such as coupling capacitance method, partial discharge method, rotary electric field probe method, X ray method and built-in sensor method. Though analyzing detection principle, characteristics and application of each method, it indicated that pulsed magnetron discharge method and power frequency withstand voltage method in off-line detection methods were the most widely applied because of low cost, simple detection and good repeatability, but regular stopping to check vacuum degree became the most important factor to restrict development of the off-line detection methods, and on-line detection methods could detect vacuum degree in real time and find deterioration of vacuum degree, but the methods were not widely applied because of low accuracy, high cost and poor anti-interference and stability. Development

收稿日期:2017-12-08;修回日期:2018-05-18;责任编辑:盛男。

基金项目:山西省科技重大专项项目(20131101029)。

作者简介:吴梦泽(1989—),男,山西万荣人,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术,E-mail:340081108@qq.com。

引用格式:吴梦泽,宋建成,高云广,等.真空断路器真空度检测方法研究现状与展望[J].工矿自动化,2018,44(6):6-10.

WU Mengze, SONG Jiancheng, GAO Yunguang, et al. Research status and prospect of vacuum degree detection methods for vacuum circuit breaker[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(6): 6-10.

trends of vacuum degree detection method for vacuum circuit breaker were proposed, which were improving accuracy of on-line vacuum degree detection method and integrating multiple vacuum degree detection methods.

Key words: vacuum circuit breaker; vacuum interrupter; vacuum degree; vacuum degree detection method

0 引言

真空断路器以真空作为灭弧介质,具有分断能力强、电寿命长、电弧不外露和运行可靠等优点,真空介质较油介质和 SF₆ 介质没有火灾和爆炸的危险,因此真空断路器广泛应用于煤矿供配电系统。

真空度是指绝对压力低于一个大气压的气体稀薄程度,真空度越高,即气体压强越低。对于真空断路器用真空灭弧室,国家标准规定灭弧室真空度最低为 6.6×10^{-2} Pa,在电力行业实际生产中,一般在真空度低于 1.33×10^{-1} Pa 时对灭弧室进行换修。这是由于随着真空断路器使用年限增加,灭弧室真空度会下降,在电场作用下,动触头和静触头发射出的电子和离子与气体分子发生碰撞概率增加,灭弧室内带电粒子足够多时会形成击穿,难以保证绝缘和灭弧性能,无法可靠分断短路电流甚至负荷电流,危及煤矿供配电系统安全^[1]。因此,对真空断路器真空度进行检测具有重要意义。

目前真空度检测方法可分为离线式和在线式两大类,笔者对其检测原理、特点和应用情况进行了分析,并展望了真空度检测方法的发展趋势。

1 真空度离线式检测方法

真空断路器真空度离线式检测通过定期对运行中的断路器进行巡检,或将断路器停运并利用相关检测系统检查真空度。真空度离线式检测法主要包括观察法、工频耐压法、脉冲磁控放电法和屏蔽罩电位法。

1.1 观察法

观察法是一种传统的凭经验定性判断真空度的方法,主要有火花计法、吸气剂薄膜法和弧光观察法。

火花计法利用火花探漏仪沿灭弧室表面移动,灭弧室内部残余气体会发生电离现象,并由于气压不同而产生不同颜色的辉光,从辉光的强度和色彩来判断真空度^[2]。若灭弧室内有淡青色辉光,则真空度良好;若灭弧室内呈红蓝色光,则表明灭弧室已经失效;若灭弧室内已处于大气状态,则不会发光。

吸气剂薄膜法是在制造灭弧室时将玻璃管内壁蒸散一层吸气剂,该物质可通过自身颜色变化反映真空度^[3]。真空度良好时,吸气剂的薄膜像镜面一样亮;随着真空度降低,吸气剂薄膜逐渐浑浊直至呈乳白色。

弧光观察法通过观察电弧颜色变化来判断真空度变化^[4]。真空断路器开断电路正常时,电弧很微弱、呈蓝色;若电弧较大、呈黄橙色,表明真空度降低。

观察法是检测真空度最直接、快速的方法,但仅适用于玻璃外壳灭弧室,且易受工作人员主观因素影响,检测精度较低,只适用于日常巡检。

1.2 工频耐压法

工频耐压法是在真空断路器处于停机状态时,将灭弧室动触头、静触头拉开至额定开距,在触头间施加 1 min 工频电压,通过检测泄漏电流大小及观察灭弧室内放电现象,判断真空度是否符合要求^[5]。当真空度降低到一定程度时,触头间较短的间隙就不能承受试验电压,甚至在升压过程中会出现放电击穿现象。

工频耐压法的优点是原理简单、操作方便,但和观察法一样只能定性地检测真空度,且真空度低于运行标准的灭弧室仍能通过耐压试验。因此,当利用工频耐压法检测出不合格的灭弧室时,往往真空度已经严重退化。文献[6]对工频耐压法进行改进,提出了发射电流起始场强法,利用发射电流起始场强与真空度呈正比的关系,通过检测发射电流起始场强来反映真空度,不仅可定量地检测真空度,而且提高了检测精确度,将测量范围拓宽到 $10^{-3} \sim 1$ Pa。

1.3 脉冲磁控放电法

脉冲磁控放电法是定量检测真空度较好的方法,其基本原理:将灭弧室的动触头、静触头拉至额定开距,在触头间施加脉冲高压,使触头之间处于强电场中,同时在触头间施加轴向强磁场。灭弧室内的电子在强电场与强磁场的共同作用下,从触头的一端以螺旋轨迹向另一端运动,并与灭弧室内残余气体分子发生碰撞电离,电离出的离子在强电场的

作用下形成离子电流^[7]。理论与试验证明,该离子电流与灭弧室内残余气体分子浓度呈正相关性,因此通过测量离子电流可推算灭弧室真空度。但对于直径不同的灭弧室,同等真空度条件下,离子电流大小并不相同。因此,需要通过试验标定出不同型号灭弧室的真空度与离子电流的对应关系曲线。当测得离子电流后,可通过查询相应型号灭弧室的离子电流-真空度曲线得出真空度。脉冲磁控放电法测量范围较宽,重复性好,检测精度可达 10^{-5} Pa。但采用该方法检测真空度时需要将灭弧室从断路器上卸下并放置于电磁线圈内。

1.4 屏蔽罩电位法

屏蔽罩电位法原理:在一定开距的触头两端施加高频脉冲高压,随着灭弧室真空度的降低,屏蔽罩电位不断降低,真空度在 10^{-1} Pa附近时屏蔽罩电位达到最小值,当真空度继续降低,屏蔽罩电位又不断增大,因此通过与屏蔽罩电气连接检测屏蔽罩电位的变化,根据电位与灭弧室真空度之间的函数关系来判断真空度^[8]。

由于屏蔽罩电位极值出现在真空度临界值附近,所以屏蔽罩电位法的灵敏度和准确度较高。但该方法难点是对于没有屏蔽罩引出点的灭弧室,如何在保证灭弧室的气密性前提下,实现与屏蔽罩的电气连接。目前常采用传感器非接触式测量屏蔽罩电位,如文献[9]通过高压电容传感探头采集屏蔽罩电位,检测精度达 10^{-2} Pa;文献[10]利用比例差分探头采集屏蔽罩交流电位分量,并与母线电压取比率-差分,经过标定后作为检测参量来检测真空度,能抵消母线电压波动和谐波干扰的影响,但只能在带载操作时检测出屏蔽罩电位的变化。

2 真空度在线式检测方法

真空断路器真空度在线式检测是在断路器运行时,通过检测装置不间断采集、传输及处理数据,得到真空度实时状态。真空度在线式检测方法主要有耦合电容法、局部放电法、旋转电场探头法、X射线法和内置传感器法。

2.1 耦合电容法

耦合电容法基于动态电荷分布和电容分压原理,当真空度变化时,触头与屏蔽罩之间的分布电容和屏蔽罩与感应电极间的分布电容会发生变化,由于耦合电容与分布电容串联,所以耦合电容电压会发生变化,通过测量耦合电容电压即可实现真空度在线检测^[11]。

耦合电容法应用简单、方便,检测精度可达 10^{-2} Pa。文献[12]采用耦合电容法并结合局部放电现象测量耦合电容上的脉冲电压,以此判断真空度。

2.2 局部放电法

局部放电法原理:根据 paschen 曲线,局部放电起始电压随着真空度降低先下降后上升,因此通过测量真空度下降时灭弧室内局部放电数据来检测真空度。文献[13]采用电流互感器和光电倍增管测量因真空度下降而产生的局部放电脉冲的上升时间、宽度和峰值强度,进而判断真空度:当真空度较高时,汤森放电具有较大脉冲宽度和较长上升时间;当真空度较低时,流注放电具有较小脉冲宽度和较短上升时间。

局部放电法无需外加磁场,重复性好,但只能定性检测真空度。此外,当灭弧室真空度极高或极低时不会出现局部放电现象,无法判断灭弧室真空度状态,影响检测范围。文献[14]通过安装在真空断路器外侧的天线传感器耦合局部放电电磁波信号,从而判断真空度,检测精度约为 10^{-2} Pa。

2.3 旋转电场探头法

旋转电场探头法利用探头在线测量屏蔽罩电位,从而推导出真空度^[15]。旋转式电场探头如图1所示。上金属片与无刷电动机相连而快速旋转,下金属片保持不动。当上下金属片完全重合时,下金属片不受电场影响;当上下金属片没有完全重合时,下金属片未重合部分暴露于电场中,金属片上会感应出电荷,实质为电场的调制信号。同时,从发光管发出的光照射到光电池上,光电池输出得到参考信号。调制信号与参考信号经处理后提取出屏蔽罩交流信号,以此判断真空度。

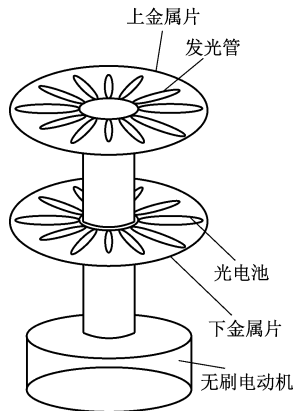


图1 旋转式电场探头

Fig.1 Rotary electric field probe

旋转电场探头法实质是在线式屏蔽罩电位法,

通过非接触测量屏蔽罩电位进而判断真空度,检测精度可达 5×10^{-1} Pa。

2.4 X射线法

X射线法通过测量X射线相关量来检测真空度。一种思路是通过测量X射线强度间接判断真空度:在强电场条件下,灭弧室内部会因真空度下降而发生场致发射现象,场致发射电子以很高的速度从阴极表面逸出,在加速电场的作用下高速轰击阳极,根据韧致辐射原理,会从阳极表面释放出X射线,当射线达到一定强度后会穿透真空灭弧室外壳,这时可通过X射线剂量率仪检测X射线强度来判断场致发射电流大小,而场致发射电流与真空度呈正相关性^[16]。另一种思路是通过施加X射线,测量因此而产生的电离电流大小来检测真空度。如文献[17]利用X射线对气体分子的电离作用,使灭弧室气体残余分子产生稳定的电离电流,通过设计的天线传感器测量电离电流,进而在线检测真空度。

X射线法无需外加磁场,测量范围大,重复性好,检测精度可达 10^{-4} Pa,但目前仅在实验室进行了测试,实际应用效果有待考证,且检测设备较贵。

2.5 内置传感器法

内置传感器法通过改变灭弧室内部结构,内置真空度传感器实现真空度在线检测。该方法精度较高,但需要更改灭弧室结构,无法对已经使用的灭弧室真空度进行在线检测。

文献[18]提出在静触头导电杆处安装微型冷阴极磁控真空计,通过该真空计向外输出实时信息来实现真空度在线检测,测量范围为 $3\times 10^{-4}\sim 10^{-1}$ Pa;文献[19]提出了一种新型双波纹管结构灭弧室,在其内部植入压力传感器,传感器顶部装有压力元件,当真空度变化时,元件受力发生变化,传感器向外输出信号来实现真空度在线检测,检测精度达 10^{-1} Pa;文献[20]通过植入金属间隙探头,并采用外置天线采集探头放电信号,根据信号强度推断真空度,检测精度在 10^{-1} Pa左右。

3 真空度检测方法展望

真空断路器真空度检测方法未来的研究重点主要集中在以下方面:

(1) 提高真空度在线式检测方法精度。借鉴精度较高的真空度离线式检测方法的思路,研究离线式检测向在线式检测转变的方法,例如对目前较成熟的脉冲磁控放电法进行在线式优化,通过在灭弧

室外侧设置励磁线圈,利用环氧树脂将励磁线圈和灭弧室浇注成整体,实现不拆卸灭弧室以实时在线检测真空度;通过融合其他学科高新技术,探究新的真空度检测参量来提高检测精度,例如真空度与气体分子数关系密切,而气体分子数会影响光谱信号,因此可通过分光仪采集H、O原子密度光谱信号,根据不同真空度的光谱信号强度不同来判断真空度。

(2) 融合不同的真空度检测方法。例如将耦合电容法与局部放电法相结合:一方面,耦合电容法会因干扰信号导致检测不准确,将局部放电数据作为补充判据可有效提高耦合电容法的检测精度;另一方面,耦合电容法可有效拓宽局部放电法的检测范围。

4 结论

(1) 真空度离线式检测方法具有检测设备相对简单、精确度高、性价比高、灵活性好、操作方便等优点,在真空度检测领域应用范围较广,且技术成熟,但定期停机检查真空度造成的不便成为制约该类方法发展的最主要因素。其中脉冲磁控放电法和工频耐压法因其成本低、检测简单和重复性好,成为目前应用最广泛的真空度检测方法。

(2) 真空度在线式检测方法可实时检测真空度,及时发现真空度的劣化,但存在精度较低、成本高、抗干扰能力和稳定性较差等问题,因此未得到广泛应用。

(3) 提高真空度在线式检测方法精度、融合多种真空度检测方法将是真空度检测方法的发展方向。

参考文献(References):

[1] 李喆,冯国新. 电气化铁路真空断路器灭弧室真空度降低的原因分析及对策[J]. 科协论坛(下半月),2010(11):83-84.

[2] ZHAO Ziyu, SONG Huansheng, JIANG Xiuchen, et al. Study on new method for measurement of internal pressure of vacuum interrupters [C]// International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006:169-172.

[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]. 高压电器,1993,29(5):13-17.

[4] 王罡,王正石. 真空开关管真空度的测量[J]. 真空电子技术,2002(3):70-72.

- WANG Gang, WANG Zhengshi. Measurement of the vacuity of vacuum interrupters [J]. Vacuum Electronics, 2002(3): 70-72.
- [5] 张世宇. 真空断路器真空度检测的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [6] 赵子玉, 宋焕生, 江秀臣, 等. 真空断路器真空度现场测量新技术[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 99-103.
- ZHAO Ziyu, SONG Huansheng, JIANG Xiuchen, et al. New technology for measurement of internal pressure of vacuum breakers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 99-103.
- [7] 金志明. 基于脉冲磁控放电法的真空寿命评估技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [8] DAMSTRA G C, MERCK W F H, NOS P J, et al. Diagnostic methods for vacuum state estimation[C]//International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eindhoven, 1998: 443-446.
- [9] 肖慧荣, 刘建魁, 邓加南. 真空灭弧室真空度在线检测系统[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(1): 106-112.
- XIAO Huirong, LIU Jiankui, DENG Jianan. Novel monitor for on-line measurement of pressure in vacuum interrupter[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(1): 106-112.
- [10] 陈昌龙, 邹积岩. 基于比例差分探头的真空灭弧室真空度在线监测[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 124-127.
- CHEN Changlong, ZOU Jiyang. On-line monitoring of vacuum degree in vacuum interrupters based on proportional difference electric field detectors [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 124-127.
- [11] LIU Shuguang, GUO Qian, WU Xuexing. A HFID-based online testing technique for internal pressure of vacuum breaker[C]//The 26th Chinese Control and Decision Conference, Changsha, 2014: 1764-1767.
- [12] SAITO H, MATSUI Y, SAKAKI M. Discharge properties in low vacuum and vacuum monitoring method for vacuum circuit breakers [C]//International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006: 181-184.
- [13] KAMAROL M, OHTSUKA S, SAITOU H, et al. Diagnosis of vacuum degree in vacuum interrupter based on partial discharge [C]//International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006: 165-168.
- [14] 窦春梅, 陈谦, 潘绍松. 真空断路器真空度在线监测装置[J]. 电子设计工程, 2013, 21(3): 106-108.
- DOU Chunmei, CHEN Qian, PAN Shaosong. Online monitoring device on vacuum degree in vacuum breaker[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(3): 106-108.
- [15] 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]. 高电压技术, 2003, 29(10): 29-31.
- ZHAO Ziyu, LI Zhaozhi, CHEN Wu, et al. Study on internal pressure measurement without detaching vacuum tube from circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 29-31.
- [16] 李炜, 郭媛媛, 王承玉, 等. 基于 X 射线量变化评估真空灭弧室真空度的方法[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 315-318.
- LI Wei, GUO Yuanyuan, WANG Chengyu, et al. Vacuum estimation method for vacuum interrupter based on variation of X-ray [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 315-318.
- [17] MEI Yuxin, YUAN Huan, WANG Xiaohua, et al. Study on the change tendency of electro-magnetic signal under different vacuum degree for 10 kV vacuum chamber [C]//Tencon IEEE Region 10 Conference, Macao, 2015: 1-6.
- [18] MAO Huiyong, WANG Yi. Studies of online monitoring of the pressure in vacuum circuit breaker by Penning discharge[C]//Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Nashville, 2005: 625-628.
- [19] 叶晓东, 赵学文. 具有新型真空度在线检测装置的真空断路器特性试验[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 58-60.
- YE Xiaodong, ZHAO Xuewen. Characteristic tests of VCB with novel on-line vacuum monitoring equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 58-60.
- [20] GUAN Yonggang, LIU Weidong, XU Guozheng, et al. Utilizing ratio frequency signal in online monitoring on high voltage vacuum cubicle switchboard [C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, 2009: 1-4.