

真空断路器真空度检测方法探讨

范兴明¹, 刘旭东¹, 潘永成², 贺家敏¹, 张鑫¹,
黄知超¹, 刘华东¹, 李震¹

(1. 桂林电子科技大学电气工程及其自动化系, 桂林 541004;
2. 日升集团有限公司, 浙江 315700)

摘要: 笔者详细总结了目前国内外真空断路器灭弧室的真空度检测技术;介绍了各种检测方法的检测机理及特点,并结合国家智能电网的发展方向对各方法的优缺点进行对比;探讨了对真空度检测技术的新要求和发展趋势。

关键词: 真空断路器;真空度检测;智能电网

中图分类号: TM561.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2011)08-0052-05

Discussion about the Vacuum Detection Methods for Vacuum Circuit Breakers

FAN Xing-ming¹, LIU Xu-dong¹, PAN Yong-cheng², HE Jia-min¹, ZHANG Xin¹,
HUANG Zhi-chao¹, LIU Hua-dong¹, LI Zhen¹

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. SUNRISE GROUP Corporation, Zhejiang 315700, China)

Abstract: The vacuum detection methods for vacuum circuit breakers (VCBs) are summarized. The principles and features of the methods are analyzed, and their advantages and disadvantages are compared respectively considering the development of the national smart power grids. Moreover, the new requirements and developing trend of the detection methods are discussed.

Key words: vacuum circuit breaker; vacuum detection; smart power grids

0 引言

随着国家“坚强智能电网”发展与构建的深入,人们对电能质量要求的不断提升,智能电网所带来的高效、可靠、低碳、经济的电能前景必然可以满足国家快速发展对电力能源的需求。智能电网尤为突出的特性是它的自愈能力,通过连续不断地状态智能监测与综合评估,能够及时、准确的掌握设备状况。当前倡导的基于状态检修的模式,即所谓状态检修就是根据对设备的日常检查、定期重点检查、在线状态检测和故障诊断所提供的信息,经过分析处理,判断设备的健康和性能劣化状况及其发展趋势,

并在设备故障发生前及性能降低到不允许极限前有计划地安排检修。因此要求在遍布全系统的所有节点上设有控制设备,当出现操作人员不能及时发现和处理的状况时,电网具有灵活的应对能力。状态检修不仅可以提高设备的可用率,还能有效降低检修费用^[1]。

近30年来,真空断路器的发展与应用十分迅速。与其他类型断路器相比,其具有体积小、重量轻、适用于频繁操作、灭弧不用检修的优点,使其在中压配电领域开关中占有主导地位。然而真空断路器一旦发生故障就极易引起严重的不良后果,不但会引起自身设备损坏,也可能引发大规模电网故障。因此智能电网对真空断路器运行状况的监测要

收稿日期:2011-02-15; 修回日期:2011-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51067002/E070302);广西教育厅科研项目(200808LX115,201010LX105)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51067002/E070302), Guangxi Educational Committee (200808LX115, 201010LX105).

求逐渐提高。真空断路器的故障往往是由于真空度降低所致,根据国家规定^[2],真空灭弧室内的气体压强应低于 1.33×10^{-2} Pa。笔者对目前真空断路器的真空度所出现的检测方法进行了总结,使读者对各类方法有所了解,并希望对电力行业的同行有所帮助。

1 出厂前断路器真空度的检测方法

真空度的检测在真空断路器的生产过程中就已经开始了。通常工业生产中利用真空计来完成真空度的测量。传统工业生产过程中普遍使用的几种真空计有^[3]:机械式真空计(mechanical vacuum gauge),它利用不同空气密度对振动的阻尼系数不同,将真空度间接转化为电信号;热传导式真空计(thermal conductivity vacuum gauge),其典型代表“皮拉尼真空计”(pirani vacuum gauge)靠测量接触待测真空腔的灯丝和未触及时待测真空腔的参考灯丝之间的电压差值判定真空度情况;离子式真空计(ion vacuum gauge)检测高真空时状态带电粒子来撞击气体分子以产生的离子电流强弱,推算真空腔内的气压值;基于潘宁放电原理的冷阴极离子式真空计(cold cathode ion vacuum gauge)检测碰撞电离后气体分子产生的离子电流,推算出气体分子的压力,得到灭弧室的真空压力值。

2 使用中的断路器真空度检测方法

由于真空灭弧室存在缓慢漏气现象,真空度会随着使用时间的延长逐渐降低,当到达某一阈值时,就会引发设备故障。因此,对使用中的真空断路器的真空度要定期检查以防止意外发生。笔者将目前国内流行的检测方法分为离线检测和在线监测两类。

2.1 离线现场检测真空灭弧室真空度的方法

离线检测是预防性定期检修的主要方法,适合于已知损耗规律的设备,或难以随时停机进行检修的流程工业、自动生产线设备。为了便于对诸多方法进行比较,离线现场检测真空灭弧室真空度的方法的详细介绍见表1。

从表1可看出,方法1-4采用了观察法。通过观察直接、快速的对灭弧室好坏加以判断。优点是快速、简单,但无法确定灭弧室的工作寿命并且约束条件较多,不能满足新一代电网的监测精度要求,为了满足该要求,方法5-7尝试定量测定真空度的数值,虽未能在实际中得到应用,但在实验室条件下获得数据和分析对后人研究起到了推动作用。兼有简单有效和高精度的特点,方法8是目前广泛应用的离线测量法,经过多次的改进可以做到

无需拆卸灭弧室。此法应用效果较好,但需外加磁场却是实际执行中的繁琐环节。方法9-11克服了加入磁场的不足,同时对无需拆卸灭弧室的方法进行了探究,在检测原理上提出不同思路,是实验室条件下进行的探索,体现了真空度离线检测方法向着更精确、简洁、可靠的方向发展。

经过数十年的发展,离线检测方法成为较为成熟的检测手段,但是定期的停机检查对工业生产和人们生活带来诸多不便,为此无需系统过多停运的在线监测方法成为新兴研究的重点。

2.2 在线检测真空灭弧室真空度的方法

在线检测相对于离线检测更具有实时性,它要求检测设备的安装、运行、采集都不影响断路器正常运行。是状态检修的主要手段,根据设备日常检查、定期重点检查、在线状态监测和故障诊断提供的信息,经过分析处理,判断设备的健康和性能劣化状况及其发展趋势,并在设备故障发生前及性能降低到不允许极限前有计划地安排检修。状态检修随着维修管理水平的提高和故障诊断技术的发展而逐渐进入实用化,而基于可靠性的检修是根据设备状态和可靠性提出的一种评估标准,是对状态检修的改进。在线监测是此二种检修体制的基础,在线监测的精度和质量影响着评估的可靠性。笔者将目前各种在线监测方法的研究和应用状况列举于表2。

目前,以屏蔽罩电位变化,作为真空度标定的标准是主流的在线监测方法。文[24]对此原理进行了论述。方法1-4均是以屏蔽罩电位变化判定真空度在实际中的应用,其传感器的精度,寿命,以及成本等因素对检测效果产生极大影响。方法5应用声学方法进行检测。方法6-7提出改变灭弧室结构,内置真空度探测器。此类方法的实用前景良好,对开发新型灭弧室意义重大,但无法完成使用中的灭弧室真空度检测。

在线监测是近十几年来国内新兴的真空度检测手段,需要投入大量的实践应用才能更加成熟和完善。作为较先进的检测手段,在线监测可随时知道灭弧室真空度变化情况,有较高的灵活性,不需电力系统有过多动作。符合目前国家智能电网的发展要求,必将得到国家政策的鼓励和支持。

3 结语

随着国家智能电网战略,数字变电站技术,以及IEC 61850标准的发展。本着面向国家三代电网建设的要求,基于可靠性检修的体制将更多被采用。这就要求新型断路器不仅要满足基本性能要

表1 离线现场检测真空灭弧室真空度的方法

Tab. 1 Off-line testing methods for vacuum degree in VCB

方法名称	简介	特点	实用效果
弧光观察法	真空灭弧室内部真空度降低时常伴随着电弧颜色改变及内部零件氧化带来的颜色变化 ^[4] 。	直接,简单。	仅适用于玻璃外壳真空灭弧室。
火花计法	用火花探漏仪沿玻璃型灭弧室表面移动,内部不同压强则探测仪发光情况不同 ^[5] 。	直观,简单,易受人为因素干扰。	仅适用于玻璃外壳真空灭弧室。
吸气剂颜色变化判定法	在玻璃型真空灭弧室制造时将管内壁蒸散一层吸气剂。这样即可以吸附管内残余气体维持高真空,又能通过自身颜色变化指示真空度 ^[6] 。	直观,易受人为因素影响。	仅适用于玻璃外壳真空灭弧室。
工频耐压法	将触头拉至额定开距后在触头间施加工频电压,若能耐受电压1分钟,即认为真空度合格,否则即为不合格。	简单有效,无需拆卸灭弧室。但检测设备体积大,笨重,操作不便。	无法检测临界状态或串联使用的灭弧室。
电弧电压法 (arc voltage analysis)	文[7-8]中提到通过检测电弧电压判断真空度。前者提出电弧电压分为稳态和电弧脉冲两部分,以及通过这两部分特性判断真空度的方法。后者提出,将断路器切断某特定直流电流时形成的电弧电压波形转为柱状图,以此作为判断标准。	根据收集到的电弧形状判断真空度好坏,无需拆卸灭弧室,无需外加磁场。无法得到真空度具体数值。	精度较工频耐压法高,但实用性差,未能广泛使用。
屏蔽罩电位法 (the shield potential measurement)	文[9]提出在处于一定开距的触头两端施加高频脉冲高压电源,并检测屏蔽罩电位的变化。此电位与灭弧室内压强存在函数关系,可以推断断路器真空度。	受触头表面条件影响,屏蔽罩电位情况多种多样,通用性较差。	不适合于无屏蔽罩或无屏蔽罩引出点的断路器。
射线法	文[10]提出用能量强大的电磁波X射线对气体分子的电离作用,可以使真空灭弧室中残余气体分子产生稳定的电离电流。该电流值与气体分子数有关,可通过气体残余程度确定真空度。	可以得到真空度数值大小,无需外加磁场,无需拆卸灭弧室。	实验室条件下的尝试。检测设备较为贵重,实际操作经验不足。
磁控放电法 (magnetron methods)	基于潘宁放电原理,将触头拉至一定开距,在触头间施加一脉冲电压,与此同时灭弧室触头间又施加一轴向强磁场。检测因电子碰撞电离在电场内形成的离子流便可知灭弧室内空气密度,进而得到真空度的大小 ^[11] 。	测量范围宽,重复性好。改进后的无需拆卸灭弧室,但需要外加磁场。	无法检测全体封闭的固体绝缘真空开关。
发射电流衰减法	文[12]提出一种发射电流衰减法,利用发射电流衰减速度测量真空开关灭弧室真空度的方法。根据检测衰减时间判定真空度情况。	无需外加磁场,但对检测技术要求较高。	实验室条件下的尝试,应用前景较好。
X射线量跟踪法	利用场致发射电流大小与所产生的X射线强度之间呈比例的特点,将测量场致发射电流转化为测量X射线释放强度 ^[13] 。	不需外加磁场,测量范围宽,重复性好。	实验室条件下的尝试,实际效果有待观察。
局部放电检测法 (partial discharge characteristics)	文[14]中采用一套由电流互感器、ICCD摄像头和光电倍增管组成的检测仪器,利用检测到的放电脉冲的上升沿时间、脉冲长度以及脉冲峰值大小作为区分不同真空度的标准。	无需外加磁场,区别真空度拐点上放电特性,较电弧电压法精度高。	离线情况下实验室中的测试,有望应用于真空度在线监测。

求,还需要有更加智能化的功能,特别是在故障监测和诊断方面。因此,真空灭弧室真空度的在线监测技术必定会得到更广泛的应用,而方法本身也会向着更精确、更快速、更经济的方向发展。同时还应该看到,真空断路器的寿命不仅仅和真空度有关系,还与触头寿命,机械寿命有密切关系,这些都是值得深入研究的课题。

参考文献:

- [1] 何光宇,孙英云.智能电网基础[M].北京:中国电力出版社,2009.
HE Guang-yu,SUN Ying-yun. Basis of the smart grid[M]. Beijing:China Electric Power Press,2009.
- [2] DL/T 593—2006. 高压开关设备的共用订货技术导则[S].
DL/T 593—2006. Guide for the shared specifications of high-voltage switches[S].
- [3] HERAEUS L.Vacuum technology its foundations formulae and tables[M]. New York:Academic Pr.,1978.
- [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 Zheng-shi.Measurement of the vacuity of vacuum interrupters[J]. Vacuum Electronics,2002(3):70-72.
- [5] ZHAO Zi-yu. Study on internal pressure measurement of vacuum interrupters [J]. International Symposium on

表 2 在线监测真空断路器真空度方法

Tab.2 On-line testing methods for vacuum degree in VCB

方法名称	简介	特点	实用效果
耦合电容法	根据动态电荷分布和电容分压原理。当真空度下降时,屏蔽罩上电位绝对值降低。这样可以通过跟踪屏蔽罩电位的变化过程,实现在线检测 ^[15] 。	外置耦合电容探测采集屏蔽罩电位,结构简单,监测效果好。	有较强应用价值,能够完成在线监测任务。
旋转式电场探头检测法	文[16]通过一种旋转式电场探头作为传感器,能够通过探头载波信号的分离提取出屏蔽罩交、直流电场的信息。并以此判断真空度变化。	探测屏蔽罩电位推断真空度数值,探头结构新颖,精度高。但后续处理较为繁琐。	有较强实用价值,可以完成在线监测任务。
光电变换法	文[17]中提出用光学元件泡克尔斯(Pockels)作为探头,把与真空度对应电场的变化转换成光通量的变化,再经光纤传到低电场区或控制系统中进行检测。	以屏蔽罩电位为采集目标,光电信号转换为技术核心。对探头质量要求高。	探头长期运行的可靠性,测试仪器的电磁兼容问题,及探头存在温差干扰。
比例差分探头检测法	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 ^[18] 。	依靠新型电场探头探测屏蔽罩电位变化,抗干扰能力强,能够抵消母线电压波动的影响。	具有较强的实际应用价值,能够完成在线监测任务。
声学检测法	声音传感器探测真空度劣化时放电的电弧声 ^[19] 。	精度差,且不易于执行。	暂无实用实例。
压力传感器法	文[20]提出新型双波纹管灭弧室来实现灭弧室压力在线检测。新设计在灭弧室顶部装一个压力元件,当其受力发生变化,说明真空压强也在改变 ^[20] 。	采用双波纹管弧室结构,在其内部植入压力传感器。	需更换新型灭弧室,对已经成型断路器的在线监测失效。
微型冷阴极磁控计法	文[21]人提出在静触头导杆处安放一微型冷阴极磁控计,实时检测真空度变化。	植入一微型潘宁指示,测量范围在 $3 \times 10^{-4} \sim 10^{-1}$ Pa。	改变灭弧室结构,无法应用于成型的断路器。
电磁波检测法	文[22]等提出电磁波法,文[23]提出一种射频法,都采用外置天线收集电磁波信号。根据检测信号的强度,推断灭弧室内真空度变化情况。	前者将局部放电法应用于在线监测,后者植入一金属间隙探头,监测探头的放电情况。	监测局放是一种较新颖的思路,正在逐渐应用于实际工程。

Discharges and Electrical Insulation in Vacuum,ISDEIV, 2000(2):775-778.

[6] 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.
ZOU Ji-yan,HE Jun-jia,CHENG Li-chun. On-line measurement and monitor of vacuum content in vacuum interrupters[J]. High Voltage Apparatus,1993,29(5):13-17.

[7] FRONTZEK F R,KOENIG D. Methods for internal pressure diagnostic of vacuum circuit breakers[J]. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum,1998(2): 467-472.

[8] MERCK W F H,DAMSTRA G C,GRUNTJES R J B. Estimation of vacuum condition in vacuum circuit breakers [J]. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum,1998(2):506-509.

[9] DAMSTRA G C,MERCK W F H,BOS P J,et al. Diagnostic methods for vacuum state estimation[J]. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum,1998(2):443-446,

[10] SYDORENKOV S V,BATURIN A S,SHESHIN E P,et al. Field emission method of pressure dynamics registration in vacuum interrupters[J]. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum,2002: 568-571.

[11] 赵子玉,邹积岩,何俊佳,等.真空灭弧室真空度现场测试技术研究[J]. 高压电器,1999,35(2):10-12.
ZHAO Zi-yu,ZOU Ji-yan, HE Jun-jia,et al.On-sit measuring technique for internal pressure of vacuum interrupters[J]. High Voltage Apparatus,1999,35(2):10-12.

[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.
ZHAO Zi-yu,SONG Huan-sheng,JIANG Xiu-chen,et al. Study on new method for measurement of internal pressure of vacuum interrupters[J]. Proceeding of the CSEE,2006, 26(16):144-149.

[13] 李 炜,郭媛媛.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 Yuan-yuan. Vacuum estimation method for vacuum interrupter based on variation of X-ray[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(4):315-318.

[14] KAMAROL M,OHTSUKAL S.Diagnosis of vacuum degree in vacuum interrupter based on partial discharge[J]. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum,2006(1): 165-168.

[15] 范兴明,邹积岩.基于 DSP 的真空断路器状态参数在线监测装置[J]. 电力系统自动化,2005,29(8):99-103.
FAN Xing-ming,ZOU Ji-yan.A VCB parameters on-line condition monitoring system based on DSP[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(8):99-103.

[16] 赵子玉,李兆治.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 Zi-yu, LI Zhao-zhi. Study on internal pressure measurement without detaching vacuum tube from circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10):29-31.

[17] 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(4):30-32.
 DUAN Xiong-ying, ZHAO Zi-yu. Experimental research of vacuum degree on-line monitoring in vacuum interrupters [J]. High Voltage Apparatus, 2000(4):30-32.

[18] 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 Chang-long, ZOU Ji-yan. 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.

[19] 王成江, 舒乃秋. 真空断路器真空度声学检测方法研究[J]. 三峡大学学报, 2003, 25(6):512-515.
 WANG Cheng-jiang, SHU Nai-qiu. Research on acoustic monitor of vacuum of vacuum breakers[J]. Journal of University of Hydraulic and Electric Engineering, 2003, 25(6):512-515.

[20] 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 Xiao-dong, ZHAO Xue-wen. Characteristic tests of VCB with novel on-line vacuum monitoring equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12):58-60.

[21] MAO Hui-yong, WANG Yi. Studies of online monitoring of the pressure in vacuum circuit breaker by penning discharge [C]//2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, [S.l.]:IEEE, 2005: 625-628.

[22] HIKITA M, OHTSUKA S. Electromagnetic (EM) wave characteristics in GIS and measuring the EM wave leakage at the spacer aperture for partial discharge diagnosis[J]. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2007, 14(2):453-460.

[23] GUAN Yong-gang, LIU Wei-dong. Utilizing ratio frequency signal in online monitoring on high voltage vacuum cubicle switchboard[C]//Power and Energy Engineering Conference. Asia-Pacific: IEEE, 2009:1-4.

[24] 李卫国, 吴军, 田涛. 灭弧室内屏蔽罩上电位与真空度的关系[J]. 高电压技术, 2007, 33(6):133-142.
 LI Wei-guo, WU Jun, TIAN Tao. Relationship of potential on shielding cover and vacuum degree in arc extinguish chamber[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6):133-142.

刘旭东(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能化电器。

范兴明(1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能化电器、高电压新技术及应用。

(上接第 51 页)

of partial discharge in SF₆ gas using a carbon nanotube-based gas sensor[J]. Sensors and Actuators B, 2005, 105(2):164-169.

[10] KAWAMURA M, ISHII K, SATO S. Detection of arc- or corona-discharge in SF₆-insulated equipments by using an OTDR method and corner cube prisms coated with dye films[J]. Sensors and Actuators B, 1998, 50(2):140-144.

[11] BRASSINGTON D J, FREEDMAN A N, LAIRD C K. The feasibility of detecting partial discharges in metal clad equipment by tunable diode laser spectrometry of SF₆ breakdown products[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy, 1987, 43(4):549-558.

[12] 毕玉修, 卞超. 应用 SF₆ 气体分解物进行电气设备故障诊断的探讨[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(5):14-16.
 BI Yu-xiu, BIAN Chao. The discussion of detecting electrical equipment fault by SF₆ decomposition products [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(5):14-16.

[13] 庄贤盛, 李智, 姚唯建, 等. SF₆ 电气设备放电故障检测和判断方法[J]. 广东电力, 2008, 21(12):35-38.
 ZHUANG Xian-sheng, LI Zhi, YAO Wei-jian, et al.

Detection and judgment of discharge failures of sulphur hexafluoride electrical equipment [J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(12):35-38.

[14] 黄云光, 朱立平, 王琪. 气体分析在 GIS 闪络定位中的应用[J]. 广西电力, 2003, 23(4): 84-87.
 HUANG Yun-guang, ZHU Li-ping, WANG Qi. Gas analysis applied to detecting GIS sparks [J]. Guangxi Electric Power, 2003, 23(4): 84-87.

[15] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
 LUO Xue-chen. SF₆ gas insulated switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

[16] GB/T 8905—1996. 六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则[S].
 GB/T 8905—1996. The guide for processing and measuring SF₆ gas in power apparatus[S].

龚尚昆(1984—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为高压电器设备绝缘监测和故障诊断。