

文章编号: 1001-1609(2006)05-0375-04

真空灭弧室发展分析

刘顺新, 丛吉远, 廖敏夫, 董华军

(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

Analysis of Development about Vacuum Interrupter

LIU Shun-xin, CONG Ji-yuan, LIAO Min-fu, DONG Hua-jun

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

摘要: 阐述了真空灭弧室的发展历史及现状,对决定真空灭弧室发展的4个关键技术:触头材料、电弧控制系统、灭弧室结构及灭弧室制造技术进行了分析,同时对真空灭弧室的发展趋势作了介绍。

关键词: 真空灭弧室;触头材料;电弧控制系统

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Abstracts: Vacuum interrupter is an important part in the field of vacuum switch. In this paper, the developing history and the current situation of the vacuum interrupter are explained. Four key techniques of vacuum interrupter, which are contact material, arc control system, interrupter construction and interrupter manufacture, are analyzed. The future development tendency of vacuum interrupter is also discussed.

Key words: vacuum interrupter; contact material; arc control systems

0 引言

随着电网容量不断的扩大以及电压等级的不断提高,对用于电力系统的控制和保护的开关设备提出了更苛刻的要求,真空开关以高真空作为灭弧和绝缘介质,触头与灭弧系统简单,具有使用寿命长,检修间隔时间长,易于维护,适合频繁操作,体积小,重量轻等特点^[1],在中压领域占主导地位。近年来,随着国内外对真空灭弧室研究的不断深入,真空开关在高压领域和低压领域也得到了不断的渗透。真空灭弧室的发展与真空开关的发展,是紧紧联系在一起的,甚至它的研究工作要超前一些。因为只有灭弧室技术的重大突破,才可带来真空开关技术水平的大大提高。

1 发展历史及现状

自从1643年,意大利科学家托里彻利发现真空

以来,就有人开始设想将真空应用到其他行业^[2-4],到1893年,美国Rittenhouse设计的第1个结构简单的真空灭弧室以专利发表后就引起了教授和专家们的重视。之后,在1923年Sorenson和Mendelhall发现真空中金属蒸汽电弧特性,认为真空在开断高压大电流方面是一种完美的介质;并成功地在41 kV下开断了926 A的工频交流电流,于1926年公布了研究结果。虽然真空灭弧室的概念和原理相对简单,但设计的每一个方面以及制造都需要仔细地研究和检验,所以其真正应用还是在20世纪60年代后,这主要得益于与真空灭弧室研制开发的许多相关技术得到了较大发展,例如材料科学、真空技术等。1966年,英国成功开发了15, 25 kA和31.5 kA的真空灭弧室,从此,真空灭弧室正式开始为电力工业服务。到目前为止,额定电流已达到4 000 A,如合理地采用风冷措施可提高到6 300 A。现在单断口真空灭弧室的额定电压已分别达到123, 145 kV和168 kV的水平,开断电流能力最高可达100 kA。日本对纵向磁场结构真空灭弧室的研究已在实验室12 kV条件下,开断了200 kA。

为了提高真空灭弧室的电压等级和开断电流水平,电器工作者做了许多努力,使用多断口串连技术也是其中重要一个方面。1980年,美国通用电气(GE)公司生产出168 kV双断口的真空开关,开断能力达到40 kA;西屋电气公司开发的145 kV双断口真空断路器;1990年,前苏联用4个灭弧室串联生产出110 kV多断口真空断路器;美国通用电气公司后来又生产出以14个真空灭弧室串联组成的800 kV的真空断路器。

在2003年,Alstom公司使用“环保设计法”设计出新一代真空灭弧室^[5];其参数为额定电压40.5 kV,额定电流3 150 A,额定短路开断电流63 kA。这种

收稿日期: 2006-01-31; 修回日期: 2006-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(50537010)。

作者简介: 刘顺新(1978-),男,硕士研究生,主要研究方向为真空电弧诊断设备。

环保设计法,贯穿于产品研制生产和试验的全过程,并取得了良好的技术经济效益;可节省能源40%,节省原材料(铜、陶瓷)30%以上。以20年生产100万只灭弧室计算,利用环保设计法,可节省陶瓷798t;金属1826t(主要是铜和不锈钢);节省水570万升;节省电能12万kWh。此外,由于主回路电阻减小,在运行中可节约2700kWh电能。还由于灭弧室体积减小和重量减轻,可节省包装和运输费50%。

我国在1958年前后开始从事真空电弧的理论研究,最初的联合研发小组由西安交通大学牵头,于6个月后研制成功了第1个真空灭弧室,并顺利通过了4kV,5kA的型式试验。但1966后的10年中,由于文化大革命,真空电弧理论和应用的研究基本处于停滞状态。目前,我国已能生产额定电压12kV,40.5kV,额定电流6300A、额定短路开断电流80kA的真空灭弧室。真空灭弧室的年产量也在逐年提高,如图1所示,2004年达到70万只,占世界总产量的1/2还多。

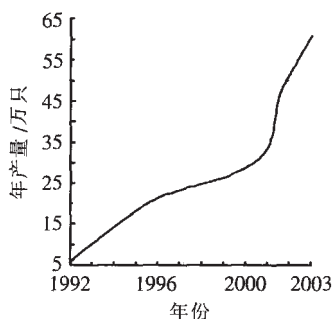


图1 我国真空灭弧室的年产量

在1990年,文[6]提出了110kV双断口真空断路器用的真空灭弧室结构和整机设计方案。并与原北京开关厂于1997年分别完成了真空灭弧室和样机的试制工作,同时完成了研究性试验;2004年,根据国内电力工业发展的需要,西安交通大学与某公司联合开发了126kV单断口真空断路器,其额定电流为2000A,开断电流为40kA,该真空断路器不久将会投入生产。

2 关键技术

真空灭弧室的发展主要取决于四个关键技术,它们分别是触头材料、电弧控制系统、灭弧室的结构以及灭弧室制造工艺。

2.1 触头材料

真空灭弧室的触头材料是决定灭弧室特性的重要因素之一,同时触头材料还决定了真空开关的应用范围和新产品的开发方向,因此国内外学者积极致力于触头材料的研究。真空灭弧室的触头材料要求含气量低、抗熔焊性能优良且截流水平低^[7],同时又要求具有大的分断电流的能力、高的耐压值、高的

导电和导热能力以及耐电弧烧蚀能力^[8]。由于这些性能的矛盾性,很难有一种触头材料能同时满足这些要求,通常总是牺牲次要性能来保证对主要性能的要求,分断能力和耐电压值通常是最先考虑的因素。目前占统治地位的触头材料是CuCr50和CuCr25,它有许多其他材料不具备的优点。它们的耐压强度高,分断能力大,截流水平低,抗熔焊性能较好,综合性能指标比较优越。同时Cr在冷凝时也有很好的吸气能力。特别是CuCr50的耐电弧烧蚀能力非常好,冷凝后的触头表面很光滑,弧后绝缘性能很好。

目前,西安交通大学和华中科技大学开发了CuCoTa触头材料,试制的使用CuCo5Ta5触头材料制成的真空灭弧室的最大分断能力为20kA,低于相同结构尺寸的CuCr50触头材料真空灭弧室的分断能力。以CuCo20Ta5触头材料制成真空灭弧室,同时以CuCr50触头材料制成真空灭弧室(结构尺寸均相同),都在单频LC振荡回路上进行分断电流能力试验。试验结果表明,用CuCr50触头材料的真空灭弧室最大分断电流为14.5kA,而CuCo20Ta5触头材料真空灭弧室的最大分断电流为18kA,分断能力较前者提高24%(有效值)。分析认为是由于Co元素和Ta元素的强化作用使得CuCo20Ta5触头材料具有较高的硬度(CuCo20Ta5测量硬度为101HB,CuCr50为90HB),从而具有比CuCr50好的耐电压特性和耐电弧烧蚀能力。CuCo20Ta5触头材料真空灭弧室的电弧电压较CuCr50触头材料真空灭弧室的低,说明CuCo20Ta5触头材料提供金属蒸汽的能力较强,使得电弧能以较低的能量燃烧,上述的两个方面都有利于CuCo20Ta5触头材料分断电流能力的提高。

日本三菱公司曾提出采用CuCoTa-CO₂Ta合金,以提高开断能力,合适的Ta和CO的加入最高可提高目前CuCr合金的1倍,但制造上还有各种各样的困难,尚未进入实用价值。另外,低截流值的触头材料研制亦有一定进展,但还不很理想。

总之,常规的真空开关仍采用CuCr合金触头为主体,根据不同的需要调整CuCr合金的配比,一般在CuCr25~50范围左右;但随着科学技术的进步和测试手段的提高,以及冶炼工业的迅速发展,触头材料的研究将来会有更新的突破。

2.2 电弧控制系统

电弧控制系统是通过真空灭弧室内触头结构的合理设计,使高压大电流下的集聚性电弧转化为扩散性电弧,或使集聚弧快速运动以避免触头局部过度熔化,达到提高开断能力的目的。目前有4种常用的真空灭弧室的触头结构,分别是①平板对接式触头;②螺旋型横磁触头;③线圈式纵磁触头;④杯

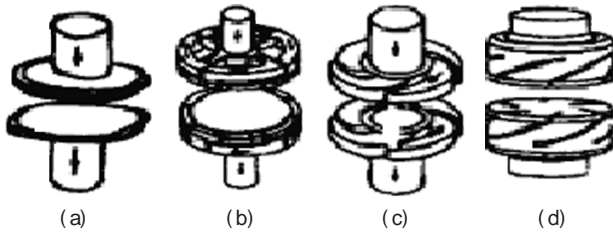


图2 触头结构图

状纵向磁场触头,见图2。

(1) 平板对接式触头(适用于开断小电流)是真空灭弧室中最简单的一种结构,只适用于较低的扩散型电弧电流,电流一般低于5000 A。广泛用于负荷电流开断的真空灭弧室以及接触器用的真空灭弧室,最大开断电流为4000 A。当应用于高电压等级时,触头的设计应注意其表面和边缘需在机床上磨光和倒圆,这样可以改善触头间的电场分布^[9]。

(2) 螺旋型横向磁场触头(适用于大电流电弧的开断):此种触头是利用横向磁场产生的电动力使大电流电弧在触头上进行高速旋转运动;开始时,熔化的金属桥在触头间断裂,产生电弧,并维持一定时间;然后在瞬间沿着触头的四周呈高速度旋转运动,触头表面产生均匀的烧蚀,并且烧蚀比较轻微,热量分散在触头区域的四周;由于电弧在触头自生产热量不足的情况下,加上电弧不断地高速运动,迫使扩散型电弧在电流过零时开断了电流。这种方法是使电极表面呈螺旋槽状,能使电弧沿螺旋槽旋转,电极表面得以有效利用,虽在一定程度上提高了分断能力,但还没能从根本上解决阳极斑点的形成问题,很难将分断电流提高到40 kA以上^[10]。

(3) 纵向磁场触头(适用于大电流电弧的开断)具有纵向磁场的真空灭弧室是20世纪70年代发展起来的,它的主要特点是利用纵向磁场来控制真空电弧以获得电弧的均匀分布和降低电弧电压,从而提高其分断能力。纵向磁场是由分断电流流经触头产生一个沿电弧弧柱方向的轴向磁场,以此磁场用来稳定电弧,可从根本上防止大电流真空电弧在阳极表面的聚集,从而使分断能力大幅度提高。目前纵向磁场结构的触头形式已经成为大电流真空灭弧室触头的主导结构,最主要有线圈式纵磁结构和杯状纵磁结构,在我国杯状纵磁真空灭弧室触头应用最广^[11];另外,还有多极纵向磁场,如马蹄铁式触头、日立的四极浅圈式等。

国内外许多学者致力于新型真空电弧控制技术 & 新型触头结构的研究。文[12]提出的斜面对接的椭圆形触头结构,在同样灭弧室外径下可提高分断能力20%。文[13]提出了磁场增强型触头,中心场强约为10 mT/kA,其特点是可使起始集聚型电弧更快地转化为扩散型电弧。文[14]提出了新的真空电弧控制技术:电极自电弧扩散技术(SADE),它利用专

门设计的电极产生一个角边边缘场强与中心的非均匀分布的纵向磁场以提高真空灭弧室的开断能力。SADE技术在实际的真空灭弧室(12.5~63 kA, 6.2~84 kV)中使用,效果很好。采用SADE技术,使得真空灭弧室电极面积及其体积有很大减少,实现了高分断能力下的小型化。

2.3 灭弧室结构

真空灭弧室主要由绝缘外壳,屏蔽罩,波纹管 and 动、静触头等组成^[15]。按绝缘外壳的材料不同,可分为玻璃外壳、陶瓷外壳和微晶玻璃外壳;目前,主要使用的是玻璃外壳和陶瓷外壳,这两种技术已经成熟,相比较而言,陶瓷外壳的真空灭弧室的产品质量要比玻璃外壳的好,但相对而言价格也高。微晶玻璃的机械强度比氧化铝陶瓷还高,且价格低于氧化铝陶瓷,将是制造真空灭弧室的理想材料。真空灭弧室内常用的屏蔽罩有主屏蔽罩、波纹管屏蔽罩和均压屏蔽罩。合理地布置灭弧室的屏蔽罩,可优化内部电场结构,使电场分布均匀,电场强度峰值减小,且使峰值出现在远离触头的部位。以往的高压真空灭弧室设计大多以解决主间隙的电场均匀性为目的,或对现有真空灭弧室进行仿真分析,对个别结构参数进行设计。按这种思路进行电场分析难以得到所希望的优化结构。文[16]借鉴已有的成果,提出一种真空灭弧室设计的新方法:利用有限元法和最优化理论,推导出真空灭弧室的电场数学模型,对各个结构参数进行全面优化,从而得到灭弧室内各屏蔽罩间最佳的电场配置,提高了灭弧室的耐压能力。波纹管能在动触头往复运动中保证真空灭弧室外壳的完全密封。从机械上讲,它是真空灭弧室中最薄弱的元件,真空灭弧室的机械寿命主要取决于波纹管。目前主要有液压成形的波纹管和薄片焊接波纹管。液压成形的波纹管的加工工艺相对简单,价格也比较便宜,所以使用较广;薄片焊接波纹管通常用于机械寿命要求长、额定电压等级高、触头行程大的灭弧室中。另外,在调试真空开关时,要防止波纹管受到过量的压缩,开关过冲行程不宜过大,从而保护波纹管,延长其使用寿命。

2.4 制造工艺

真空灭弧室的制造工艺历来是最难的,其对生产条件的要求非常高。20世纪20年代,Millikan和Sorensen R W教授在研究金属电子的场致发射过程中,观察到真空间隙有很高的介质强度,并利用此现象发明了真空开关。但其真正实用是在40年后,这是因为在30年代初进行的试验暴露出了一些严重的弱点^[17]:由于真空工艺处于初期阶段,大型玻璃和金属封接很脆弱而且不可靠;不能获得和测量低于 10^{-6} torr压力的真空系统;保证寿命长而不出毛病的密封真空灭弧室需要的高度除气的真空技术还

没有发展起来。直到20世纪50年代^[18],当时真空工艺有了较大进展,已能够获得和测量 10^{-9} torr数量级的真空度;直到20世纪60年代^[19],满足电力断路器用的真空灭弧室才问世。

目前国内外普遍采用的是一次封排工艺,这也是目前最先进的生产工艺,是真空工艺突破性的进展。所谓一次封排,就是真空灭弧室的封口和排气同时进行一次完成。20世纪80年代初,美、英等国已将一次封排工艺用于真空灭弧室的生产。日本东芝公司的真空灭弧室也广泛采用一次封排工艺。我国的灭弧室生产厂家也在20世纪90年代普遍引进了此制造工艺。采用一次封排新工艺,使真空灭弧室因漏气或真空度下降造成的失效率从原来的0.3%下降到0.1%,甚而降至0.03%。一次封排工艺与常规的排气工艺相比,大大简化了工艺流程,同时提高了产品质量和生产效率,降低了生产成本;大大促进了真空灭弧室的发展。

3 发展趋势

真空灭弧室的发展在过去50年一直在持续^[20],早期的挑战是使真空灭弧室能使用,其后进入第2个阶段,要求其能满足更苛刻的参数条件,现在的目标就是尽可能地降低其成本,减小它的体积。未来,真空灭弧室将继续沿着小型化和高电压大容量方向发展,同时也将向低电压方向渗透。目前所有这些都要求电器工作者在上面4个关键因素上继续努力:

(1) 高性能触头材料的制造;

(2) 不断加强对电弧的控制,在加强对电弧能量消耗研究的同时,应研究如何减少电弧能量的产生。如对同步控制,应选择合适的开断点,以减小电弧能量的产生;

(3) 要设计出合理优化的高电压等级真空灭弧室,主要需解决在大开距下的真空灭弧室内部电场的均匀分布和合适的纵向磁场强度等问题;

(4) 研制或改进用于制造高电压等级真空灭弧室的大型装备和设备。

4 结语

目前,在高压领域 SF_6 电气设备还占有绝对优势,但京都议定书把 SF_6 气体列入为一种严重温室效应的气体,规定到2030年后将禁用 SF_6 断路器及有关应用 SF_6 气体的设备。最近几年来世界各国均在致力于研究可替代 SF_6 气体的电气设备,包括 SF_6 断路器。真空开关将是一个重要选择之一,相信随着2030年的临近,将会掀起真空灭弧室研究新的热

潮。另外,真空灭弧室将持续沿着更高的性能,更低的成本,更小的体积的方向发展;虽然这些将会更加困难,但对有幸从事这一行业的工作者将是一个更大更好的挑战。

参考文献:

- [1] 赖小红. 真空开关的现状与发展 [J]. 江苏理工大学学报, 2000(21): 78-82.
- [2] 王季梅. 真空开关理论及其应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [3] 王季梅, 吴维忠, 魏一钧, 等. 真空开关[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [4] 王季梅. 国外真空开关发展概况 [J]. 高压电器, 1986, 22(5): 6-8.
- [5] 李建基. 国外高压开关技术的新发展 [J]. 江苏电器, 2005(5): 46-48.
- [6] 王季梅. 真空开关的现状与发展趋势 [J]. 电力设备, 2005(2): 1-5.
- [7] 王章启, 何俊佳, 邹积岩, 等. 电力开关技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [8] 范志康, 梁淑华. 高压电触头材料 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] 王季梅. 真空灭弧室设计和制造工艺概述与发展方向 [J]. 真空电子技术, 2001(3): 23-25.
- [10] 李建基. 高压断路器及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [11] A Greenwood A. Vacuum Switchgear [M]. London: IEE, 1994: 114-120.
- [12] 邹积岩. 第16届国际真空放电与绝缘会议 [J]. 高压电器, 1994, 30(4): 49-51.
- [13] Pertsev A. Strengthen Magnetic Field Contacts for Vacuum Interrupters[J]. Proc. ISDE IV, 1994: 291-294.
- [14] Honma M. New Vacuum Arc Control Technology [C]// Proc. 14th International conference and Exhibition Electricity Distribution, s.n. 1997: 121-125.
- [15] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [16] 赵智忠, 邹积岩, 文化宾, 等. 高压真空灭弧室的电场设计的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005(6): 109-112.
- [17] Slade P G. Vacuum Interrupters, the New Technology for Switching and Protecting Distribution Circuits [J]. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1997. Conference Record, Papers Presented at the 1997 Annual Meeting, IEEE 1997: 133-147.
- [18] Falkingham L T. A Brief History Showing Trends in Vacuum Interrupter Technology [J]. Proceedings ISDEIV. XV th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 1998: 407-414.
- [19] Lee T H. Development of Power Vacuum Interrupters [J]. IEEE Trans. Power Appar. Syst. PAS-81, 1962: 629-639.
- [20] Leslie T Ralkingham. A Brief History Showing Trends in Vacuum Interrupter Technology [C]// IEEE 18th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eindhoven, 1998.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!