

# 126 kV 双断口真空断路器的理论分析

文化宾<sup>1</sup>, 邹积岩<sup>1</sup>, 廖敏夫<sup>1</sup>, 郑占锋<sup>1</sup>, 王帮田<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 在分析国内外高电压等级真空开关研究的基础上, 提出了研发 126 kV 双断口真空断路器的必要性和可行性, 并针对双断口真空开关存在的缺陷提出了解决措施。在双断口均压问题上, 笔者给出一种新型 126 kV 双断口真空断路器, 通过理论分析, 表明这种设计具有较好的断口均压特性, 避免了采用断口并联电容均压方式带来的不利影响。利用永磁机构传动精度高的特点, 将其应用在双断口真空断路器中, 保证了双断口合分动作的同步性。

**关键词:** 126 kV 双断口真空断路器; 断口均压; 永磁机构; 同步

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0014-04

## Theoretical Analysis on 126 kV Double-break Vacuum Circuit Breaker

WEN Hua-bin<sup>1</sup>, ZOU Ji-yan<sup>1</sup>, LAO Min-fu<sup>1</sup>, ZHENG Zhan-feng<sup>1</sup>, WANG Bang-tian<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** By analyzing the current researches of high voltage vacuum switch, the necessity and feasibility to research and develop 126 kV double-break vacuum circuit breaker are demonstrated, and some countermeasures are presented against the defects of the conventional double-break vacuum switch. Consequently, a new type of 126 kV double-break vacuum circuit breaker is proposed, and theoretical analysis illustrates its better voltage distribution in each break to avoid the adverse influence of voltage-sharing capacitance in parallel with each break. A permanent magnetic actuator with high moving precision is applied to the double-break vacuum circuit breaker to ensure the synchronization of double-break action.

**Key words:** 126 kV double-break vacuum circuit breaker; voltage distribution in each break; permanent magnetic actuator; synchronization

## 0 引言

随着国民经济的发展和人民物质文化生活水平的不断提高, 人们对电力的需求量越来越多, 促使电力事业迅速发展, 电网的容量不断扩大, 电压等级不断提高。目前, 国内大多数城网直接采用 126 kV 电压等级电网进城, 因此, 126 kV 开关设备得到了大量的使用, 而主宰这一电压等级的开关设备是六氟化硫(SF<sub>6</sub>)开关。早在 1997 年, 日本京都会议上 SF<sub>6</sub> 被正式定为温室效应气体, 一旦泄漏, 它在空气中存在的寿命超过 3000 年, 它的影响超过 CO<sub>2</sub> 影响的 25 000 倍<sup>[1]</sup>, 因此必须对它的使用和排放进行限制。在高电压等级中, 用真空开关技术替代 SF<sub>6</sub> 开关技术成为亟待解决的问题。国内外不少研究者对此进行了大量的试验和研究, 为高电压等级真空开关技

术的发展提供了理论依据。

文[2]介绍了我国开发 126 kV 真空断路器的必要性及其初步研究; 文[3]对发展高电压等级真空断路器的技术问题进行探讨, 指出高电压等级真空断路器的研发有两种形式: ①单断口真空断路器; ②双断口或多断口真空断路器; 文[4]介绍了 126 kV 单断口真空断路器的开发; 文[5]介绍了 126 kV 双断口的真空断路器的开发。

笔者提出了一种新型的 126 kV 双断口真空断路器的设计, 详细阐述了设计依据, 并对现有双断口真空断路器存在的缺陷提出了解决措施, 为 126 kV 双断口真空断路器的应用提供了新的解决方案。

## 1 126 kV 双断口真空断路器主要理论依据

### 1.1 真空间隙的击穿机理

真空间隙的击穿是一种相当复杂的物理现象,

收稿日期: 2008-05-25; 修回日期: 2008-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(50537010)。

作者简介: 文化宾(1975-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为真空开关和真空电弧理论及应用。

它与许多因素有关,其主要因素是由于电极过程引起的。电极过程有3种学说<sup>[6-8]</sup>:场致发射学说;微粒撞击学说;粒子交换学说。从事这3种学说的研究者经过理论和试验验证得出了击穿电压和间隙长度之间的关系,尽管不同研究者所得击穿电压值各不相同,但发现真空间隙的击穿电压与间隙距离有比较明确的关系。图1所示是击穿电压、击穿电场强度与间隙距离的关系<sup>[9]</sup>,实验表明<sup>[10]</sup>,当间隙距离较小(小于0.5 cm)时,随着间隙距离的增大,击穿电压 $U$ 呈线性增长,即

$$U=Kd \quad (1)$$

式(1)中, $d$ 为真空间隙距离,cm; $K$ 为比例常数。

但是在间隙距离较大时,间隙距离与击穿电压的关系将按下式变化,即

$$U=Kd^\alpha \quad (2)$$

式(2)中,指数 $\alpha$ 是非常重要的因子,取值一般在0.4~0.7。

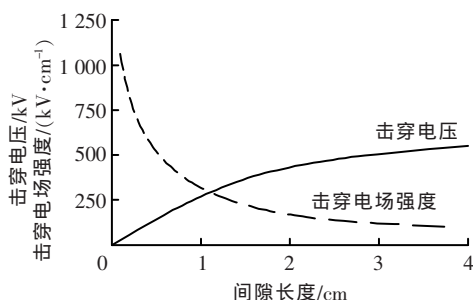


图1 击穿电压、击穿电场强度与间隙距离的关系

从图1可以看出,当间隙长度超过10 mm后,击穿电压值与间隙长度不再呈线性关系,指数 $\alpha$ 值将趋向于愈来愈小,也就是说击穿电压和间隙长度之间存在饱和效应。为此单靠加长间隙距离来提高耐压水平已变得十分困难,因此,对于126 kV真空断路器来说,由于其断口开距大,采用双断口将比单断口更有利。

## 1.2 双断口真空开关的静态绝缘特性

双断口真空开关的静态绝缘特性是指开关在没有开断大电流情况下的绝缘特性,是研究多断口真空开关技术中绝缘结构设计的基础。目前,国内外的研究方向主要集中在多断口真空开关的静态击穿特性、静态击穿统计特性和静态绝缘击穿机理等几个方面<sup>[11]</sup>。

文[12,13]对双断口真空开关和单断口真空开关的静态击穿特性进行了比较研究。通过在真空灭弧室上分别施加交流电压和雷电冲击电压,测量得到在一定的总间隙长度下,双断口真空开关与单断口真空开关相比具有更高的击穿电压值。

文[14]对双断口真空断路器的击穿统计特性进行了实验研究。研究结果表明,与单断口真空断路器相比,在相同的间隙距离下双断口真空断路器的

击穿概率要低;文[15]对两个串联布置的真空触发开关进行击穿统计特性研究,得到与文[14]类似的研究结果;文[16]提出了多断口真空开关击穿电压增益的概念,并理论推导得到多断口真空开关的击穿电压增益倍数为

$$K_n = \frac{U_n}{U_{single}} = n^{(1-\alpha)} \quad (3)$$

式(3)中, $n$ 表示断口的数量。

那么对于双断口来说,其真空开关击穿电压增益倍数为 $2^{(1-\alpha)}$ ,如果 $\alpha$ 取值为0.5,则增益倍数为1.414。因此,若单断口126 kV真空断路器的断口开距为60 mm,那么用两个30 mm的真空断口开距串联构成的126 kV真空断路器要比60 mm开距的单断口断路器具有更高的断口绝缘特性,因此在运行上具有更高的可靠性。

## 1.3 双断口真空开关的动态绝缘特性

双断口真空开关的动态绝缘特性是指双断口真空开关在开断大电流后的各断口的介质强度恢复特性和弧后重击穿特性。

文[17,18]首先研究了两个24 kV真空灭弧室串联起来运行时的试验结果,发现双断口真空开关和单断口真空开关的开断能力相比增长可达1.3倍以上,证明了双断口真空开关比单断口真空开关具有更高的开断能力。文[19]对双断口真空断路器开断能力进行了探讨,经过试验研究得出双断口真空开关开断能力在一定条件下比单断口高出1倍。

因此,126 kV真空断路器采用双断口结构,能提高其开断能力。

## 1.4 真空开关动触头运动需求动能分析

设126 kV双断口断路器每个断口的动触头质量为 $m$ ,其合分动作的平均速度为 $v$ ,那么其所需动能为 $W_{double}$

$$W_{double} = 2 \times \frac{1}{2}mv^2 = mv^2 \quad (4)$$

而对于126 kV单断口来说,其动触头质量近似为 $m$ ,若达到相同的运动参数则需要动能为

$$W_{single} = \frac{1}{2}m(2v)^2 = 2mv^2 \quad (5)$$

通过式(4)、(5)的比较可以发现,126 kV双断口真空断路器的操动机构的输出功可以比单断口的小,因此更易实现126 kV真空断路器的设计。

## 2 126 kV双断口真空断路器关键问题的探讨

### 2.1 126 kV双断口真空断路器的断口均压

国内外的研究者在进行双断口真空断路器的设计往往采用T形、Y形和双柱形结构,见图2。

为了对其端口电压分布进行分析,做出图2双断口真空开关的等值回路,见图3。

于是两断口间的电压分布可按图3计算

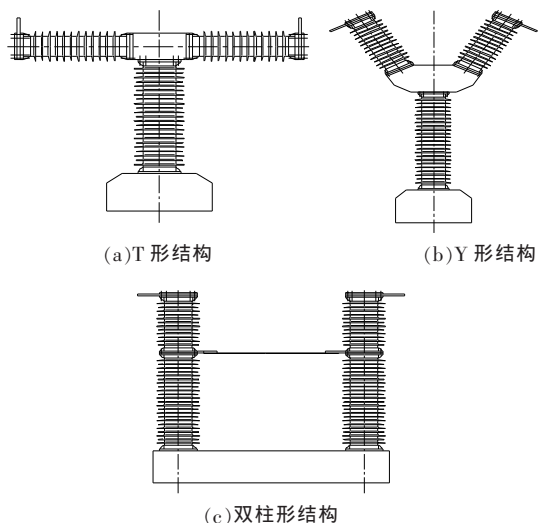


图2 常用双断口真空断路器结构图

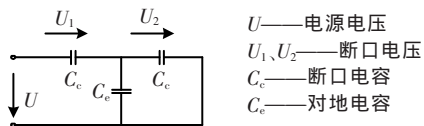


图3 图2双断口真空开关的等值电路

$$U_1 = U \frac{C_c + C_e}{2C_c + C_e} \tag{6}$$

$$U_2 = U \frac{C_e}{2C_c + C_e} \tag{7}$$

$C_c$  与  $C_e$  通常都是几十微微法,若  $C_c = C_e$ ,则  $U_1 = 2U/3, U_2 = U/3$ <sup>[20]</sup>。可见,两个断口上的电压差别很大,这种差别会造成每个断口在开断位置的电压分配和开断过程中的恢复电压分配极不均匀,分配电压过高的断口容易引起电压击穿或开断后电弧复燃,从而导致整个设备的运行失败。

解决这一问题的方法是在每个断口并联一个均压电容,但是均压电容的并联带来一系列的问题,如存在绝缘隐患、铁磁谐振等<sup>[21-23]</sup>。

笔者提出一种新型的 126 kV 双断口真空断路器的结构设计,利用结构布置来优化双断口的电压分配,见图 4。

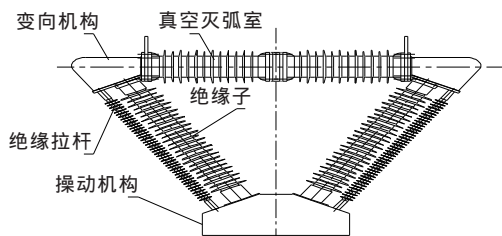


图4 新型 126 kV 双断口真空断路器结构图

由于两个真空灭弧室断口连接的距离较短,并且连接处离接地部位较远(大于 1 000 mm),因此,连接处导体对地分散电容非常小,如果忽略不计,则图 4 的等值回路见图 5。

可见,这种结构布局对双断口的电压分配基本

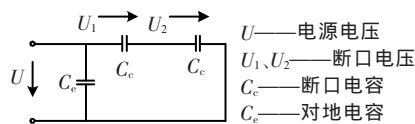


图5 新型 126 kV 双断口真空断路器的等值电路

相等,因此,每个断口不需并联均压电容,从而避免安装均压电容带来的负面影响。

### 2.2 126 kV 双断口真空断路器的断口合分同步性

开关的双断口合分同步性是 126 kV 双断口真空断路器设计的关键问题之一。对双断口真空开关的弧后动态介质恢复及开断能力研究表明<sup>[24, 25]</sup>,毫秒级的各断口动作分散性,对多断口真空开关来说都是不能容忍的,因为如果双断口不同期性过大,则真空开关在分断电流时将会造成各断口燃弧时间的显著差异,引起分断过程断口电压分布的不均匀,不仅使各触头的电磨损差别较大,更重要的是容易导致真空电弧的重燃甚至开断失败。

在高电压等级的开关设备中,常用的操动机构是弹簧或液压机构。这两种机构由于零部件数量较多,操动机构的传动稳定性差,因此用在双断口真空断路器中很难保证断口合分的同步性。

目前,一种永磁保持、电子控制的永磁机构在中压真空设备中已经得到大量的应用,这种操动机构的优势在于其机构零部件数量较少,并且运动部件只有一个,所以具有很高的可靠性和较长的机械寿命<sup>[26-28]</sup>,同时还具有很高的动力精度,文[29]对这种永磁机构的操动精度进行了分析,指出其精度可达微秒级。

由于永磁机构的操动精度高,在中压真空同步开关上已得到成功的运用<sup>[30-32]</sup>。那么,将其应用在 126 kV 双断口真空断路器上,应能大大提高双断口合分动作的同步性。

### 3 结论

(1)笔者通过理论分析得出 126 kV 真空断路器采用双断口结构更为合理,说明了研制 126 kV 双断口真空断路器的必要性和可行性。

(2)提出了一种新型 126 kV 双断口真空断路器结构,通过理论分析得出这种结构能够使断口电压分布得到优化,避免断口并联电容均压方式产生的不利影响。

(3)将永磁机构应用在 126 kV 双断口断路器中,永磁机构的高精度传动有利于保证双断口运动的同步性。

### 参考文献:

[1] OKUBO H, YANABU S. Feasibility Study on Application of High Voltage and High Power Vacuum Circuit Breaker[C]// Proc. XXth ISDEIV, Paris, France, 2002: 275-278.

- [2] 刘东晖, 王季梅, 王中奕, 等. 我国开发 126 kV 真空断路器的必要性及其初步研究[J]. 高压电器, 2003, 39(2): 26-28.
- [3] 修士新, 王季梅. 发展高电压等级真空断路器的技术问题探讨[J]. 真空电子技术, 1997(3): 1-5.
- [4] 王季梅, 刘志远, 修士新, 等. 126 kV 真空断路器的改进与提高[J]. 华通技术, 2006(3): 21-23.
- [5] 王季梅, 苑舜. 大容量真空开关理论及其产品开发 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [6] 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.
- [7] 岩原皓一. 真空开关[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [8] LAFFERTY J M. Vacuum Arcs: Theory and Application[M]. New York: John wiley & Sons, 1980.
- [9] 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.
- [10] HAWLEY R. Insulating Properties of High Vacuum[J]. IEEE, 1965, 112(6): 1 237-1 248.
- [11] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英, 等. 多断口真空开关技术的发展与研究现状[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 456-459.
- [12] GIERE S, KARNER H G. Dielectric Strength of Double and Single-break Vacuum Interrupters [J]. IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1): 43-47.
- [13] SENTKER P, KARNER P H C. Double Breaks in Vacuum: Technical Benefit and Flashover Mechanism [C]// IEEE Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, 1996: 16-19.
- [14] SHIOIRI T. Investigation of Dielectric Breakdown Probability Distribution for Double-break Vacuum Circuit Breaker [C]// Proc. XXth ISDEIV, Paris, France, 2002: 323-326
- [15] SIDOROV V A, ALFEROV D F. High Voltage High-current Commutator Based on Series-connected Triggered Vacuum Switches[C]// Proc. XXth ISDEIV, Paris, France, 2002: 202-205.
- [16] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩, 等. 多断口真空开关的动态介质恢复及统计特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 82-87.
- [17] FUGEL T, KOENING D. Peculiarities of the Switching Performance of Two 24 kV-vacuum Interrupters in Series[C]// IEEE 19th Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China, 2000: 411-414.
- [18] FUGEL T, KOENING T D. Switching Performance of Two 24kV Vacuum Interrupters in Series[C]// IEEE XXth. Symp.on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Paris, France, 2002: 164-168
- [19] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英. 双断口真空断路器开断能力的探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 34-36.
- [20] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [21] 刘让雄, 禹炬林. 双断口真空断路器加装均压电容的负效应与必要性探讨[J]. 电气开关, 1997(6): 4-37.
- [22] 李述冰. 高压断路器均压电容的作用与改进措施 [J]. 东北电力技术, 2000(11): 19-22.
- [23] 沈毅, 陈水明, 陈刚, 等. 由于断路器并口电容引起的铁磁谐振[J]. 华北电力技术, 2006(3): 7-10.
- [24] BETZ T, KOENING D. Influence of Grading Capacitors on the Breaking Capacity of Two Vacuum Interrupters in Series [J]. IEEE Trans. on Dielectrics, and Electrical Insulation, 1999, 6(4): 405-409.
- [25] BETZ T, KOENING D. Breaking Performance of a Capacitive-graded Series Design of Two 24 kV Vacuum Circuit Breakers [C]// Proc. XXth. ISDEIV, Paris, France, 2002: 360-363.
- [26] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [27] 马少华, 徐建源, 王季梅. 永磁操动结构特性分析和配用高压真空断路器的可能性[J]. 高压电器, 2000, 36(4): 19-23.
- [28] 付万安, 宋宝韞. 高压断路器永磁机构的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 21-26.
- [29] 邹积岩, 王瑛, 董恩源. 电子操动的概念与实践 [J]. 高压电器, 2000, 36(5): 29-31.
- [30] 方春恩, 邹积岩, 丛吉远, 等. 基于 DSP 的无功补偿电容器组同步投切装置[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 21-23.
- [31] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空断路器投切空载变压器的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 90-93.
- [32] 丁富华, 段雄英, 邹积岩. 基于同步真空断路器的智能无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 30-35.

(上接第 13 页)

表 1 实验数据

			℃		
标准温度	实测温度	系统误差	标准温度	实测温度	系统误差
62	61.6	-0.4	42	41.6	-0.4
60	59.4	-0.6	40	40.3	0.3
58	58.3	0.3	38	37.5	-0.5
56	57.0	1.0	36	35.2	-0.8
54	54.6	0.6	34	33.9	-0.1
52	53.3	1.3	32	32.5	0.5
50	50.4	0.4	30	29.8	-0.2
48	47.3	-0.7	28	27.2	-0.8
46	46.2	0.2	26	25.4	-0.6
44	44.2	0.2	24	22.8	-1.2

程中的关键所在。

## 5 结语

实验结果表明, 红外温度在线监测系统结构简单, 成本较低, 安装方便, 抗干扰能力强, 且系统运行稳定, 可靠性高, 测量结果能够满足实际运行要求。利用红外温度传感器解决了接触式测温无法测取高压开关柜温度的问题。红外温度在线监测系统不仅适用

于高压隔离开关, 而且在其它电力设备监测中也具有一定适用价值。因此, 该系统具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 苑舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 钱祥忠. 高压开关内接头温度在线监测系统的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2007(2): 73-75.
- [3] 杨武, 王小华, 荣命哲, 等. 基于红外测温技术的高压电力设备温度在线监测传感器的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 113-117.
- [4] 巩宪锋, 衣红钢, 王长松, 等. 高压开关柜隔离触头温度监测研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 155-158.
- [5] WHISTLE D B, GRAY I D. A New Technique for Condition Monitoring of MV Metal Clad Switchgear [J]. Trends in Distribution Switchgear, 1998, 10(11): 10-12.
- [6] 张艳, 田竞, 叶逢春. 基于红外传感器的高压开关柜温度实时监测网络的研制[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 91-94.
- [7] 孟庆民. 高压开关设备的温度在线监测研究 [J]. 高压电器, 2006, 42(5): 352-354.