

文章编号:1001-1609(2003)02-0026-03

# 我国开发 126 kV 真空断路器的 必要性及其初步研究

刘东晖<sup>1</sup>, 王季梅<sup>1</sup>, 王仲奕<sup>1</sup>, 顾丕骥<sup>2</sup>

(1.西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2.陕西宝光集团有限公司, 陕西 宝鸡 721006)

## PRELIMINARY STUDY ON THE DEVELOPMENT OF 126 kV VACUUM CIRCUIT BREAKER IN CHINA

LIU Dong-hui<sup>1</sup>, WANG Ji-mei<sup>1</sup>, WANG Zhong-yi<sup>1</sup>, GU Pei-ji<sup>2</sup>

(1.Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2.Shanxi Baoguang Group Ltd., Baoji 721006, China)

**摘要:** 报导了真空断路器在我国电网上的使用情况, 分析了一些发达国家今后发展真空断路器的趋势。论证了在我国开发 126 kV 等级真空断路器的现实意义, 介绍了将在我国建立制造高压真空断路器基地及其操动机构的准备工作等。

**关键词:** 真空断路器; 电极结构; 永磁操动机构; 必要性

**中图分类号:** TM561.2

**文献标识码:** B

**Abstract:** This paper introduces the application of vacuum circuit breaker in China and analyses the developing tendency of high voltage vacuum circuit breakers in some advanced countries. Furthermore, the necessity is demonstrated for developing 126 kV vacuum circuit breaker in China. Some preparatory work for setting up 126 kV vacuum circuit breaker manufacturing base including its actuator in China is introduced as well.

**Key words:** vacuum circuit breaker; contact structure; permanent magnetic actuator; necessity

## 1 高压断路器的应用情况和发展趋势

真空断路器的特点是重量轻、结构简单、使用寿命长、几乎不需要维护检修、无爆炸危险, 尤其不会对环境造成污染等。在中等电压领域中, 欧洲和美国已占到 70%, 日本已接近 100%, 俄罗斯已达到 50% 以上。我国自 90 年代以来, 真空断路器的增长速度较快, 目前在中等电压领域中已占到 80% 以上。在高电压等级的领域中, 1980 年美国通用电气公司已正式生产了双断口的 168 kV, 40 kA 的真空断路器, 同年日本日立电气公司制造出 123 kV, 31.5 kA 的单断口真空断路器和 168 kV 双断口的真空断路器

产品。目前, 日本东芝、明电舍等多家公司都已生产出 125 kV, 31.5~40 kA 的单断口的真空断路器。而当前由于 SF<sub>6</sub> 高压断路器的生产受到温室效应的影响, 世界各国将倾向于发展真空断路器来逐步取代 SF<sub>6</sub> 高压断路器。

自 1990 年以来, 我国已对高电压等级的真空断路器做了不少研究工作, 并已开始进行产品研发和生产。

## 2 高电压真空灭弧室电极结构的选择

真空灭弧室的电极结构经历了圆柱型触头结构、横向磁场的引入及纵向磁场的引入等 3 个发展时期。由于纵向磁场可使电弧均匀分布在触头表面, 维持低的电弧电压, 并使真空灭弧室具有较高的弧后介质强度恢复速度、低的电弧能量和低的电腐蚀速率、从而提高了真空断路器开断短路电流的能力和寿命, 被广泛使用<sup>[1]</sup>。

常用的纵向磁场电极有单极线圈型、杯状型和铁心式的结构。单极纵向磁场线圈结构最早是日本东芝公司推出的。目前有 1/2 匝、1/3 匝和 1/4 匝等几种形式。杯状纵向磁场电极结构也属于单极纵向磁场结构。所谓单极纵向磁场是指电极只产生一个方向的纵向磁场。单极纵向磁场在触头表面上会感应出涡流, 而涡流产生的磁场与电极产生的磁场方向相反。当电弧熄灭后, 电极中的电流虽同时消失, 但触头间还存在涡流引起的剩余磁场, 这一剩余磁场将阻止剩余等离子体向四周扩散, 这将阻碍介质强度的迅速恢复, 不利于电流的开断。涡流问题已成为提高纵向磁场结构真空灭弧室开断能力的一大障碍。为了更好地解决纵向磁场结构的涡流问题, 线圈式 4 极纵向磁场电极结构及两极和 4 极铁心式纵向磁场电极结构相继问世。其中最具代表的是荷兰

收稿日期: 2002-10-20; 修回日期: 2002-12-05

HOLEC公司一直在开发使用的两极和4极铁心式结构,如图1,2所示;以及日立公司开发的一种4级线圈式结构,如图3所示,其触头间的纵向磁场分为上下交错的几部分。多极纵向磁场,可以抵消大部分触头表面产生的涡流,在电弧电流过零后,触头间的剩余磁场较小,尤其是触头中心部分,剩余磁场几乎为零,这十分有利于电流过零后,弧隙剩余等离子体的迅速扩散。这一点,多极纵向磁场结构明显优于单极纵向磁场结构。

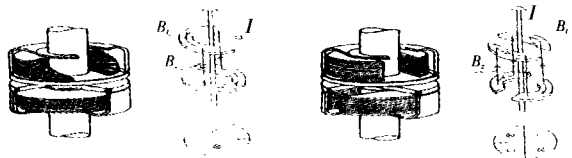


图1 两极铁心式纵向磁场结构 图2 两极铁心式纵向磁场结构

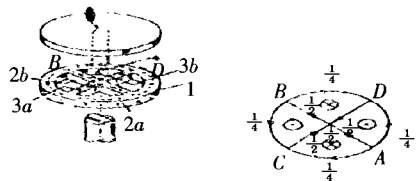


图3 4极线圈式纵向磁场结构

在真空断路器近几年的开发研究中又有一些新型的多极纵向磁场结构问世<sup>[2-4]</sup>。文[4]比较了两极和4极(如图4,5所示)纵向磁场结构的性能,认为4极纵向磁场结构产生的磁场较两极结构产生的磁场强度大。在126 kV真空断路器的研制中,倾向于选择4极电极结构。具体的结构形式及参数仍在设计计算当中。

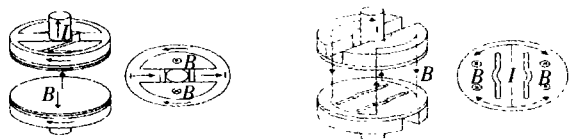


图4 两极磁场结构 图5 4极磁场结构

### 3 高电压等级操动机构的设计

#### 3.1 选用永磁操动机构的理由

就目前的制造水平而言,真空灭弧室的可靠性已经达到了相当高的水平,但在实际运行中,开关设备的可靠性却不容乐观。统计资料表明,设备故障中约有70%~90%以上为操动机构机械故障。因此,提高真空断路器可靠性的主要途径就是改进真空断路器的操动机构,而操动机构需要较多的机械零件配合组成,其故障率上升的可能性是和零件的数量成正比的。

传统的真空断路器操动机构有电磁式和电动弹簧式。弹簧操动机构是以交流小功率储能供给脱扣线圈进行分、合闸操作的,其优点是不需要大功率的

直流电源,电动机功率小,交直流两用,适宜交流操作;其缺点是结构比较复杂,零件数量多(约为200个),制造工艺复杂,成本高,产品的可靠性不易保证。电磁操动机构的优点是结构简单,零件数量少(约为120个),工作可靠,制造成本低;其缺点是合闸线圈消耗的功率大,要求用户配备价格昂贵的蓄电池组,加上电磁机构的结构笨重,动作时间较长。

为了进一步提高真空断路器运行的可靠性,自1997年,ABB Calor Emag公司、法国的Alstom公司及国内的一些厂家已相继研究成功新型的永磁操动机构。永磁操动机构是利用永磁材料的剩磁产生保持力,使触头保持在闭合或分断状态。它具有以下特点:永久磁铁与分、合闸控制线圈结合,解决了合闸时需要大功率能量的问题,因而磁系统结构尺寸及分、合闸控制线圈电流比普通电磁机构小;真空灭弧室是靠永久磁铁产生的力使其保持在合闸与分闸位置上,取代了传统的机械锁扣方式,机械结构大为简化,零件总数约为50个,机械动作的可靠性大大提高,且成本低。因此,永磁操动机构自投入市场以来,已引起国内外的普遍关注,并已被成功地配用于12 kV真空断路器。40.5 kV和126 kV真空断路器所需的永磁操动机构尚处于研究中。

高电压等级真空断路器的操动机构不但要求具有较长的运动行程,同时需要较高的分、合闸速度。例如:40.5 kV和126 kV的操动机构要求相应的运动行程为20mm和60mm,分、合闸速度都在1.4 m/s以上。为此,设计制造大运动行程和高速运动的永磁机构有一定的难度。但随着真空断路器不断地向高电压等级发展,迫切需要研制高电压等级的永磁操动机构。

#### 3.2 永磁操动机构的计算方法

为了使有较长运动行程的电磁铁能在运动初始阶段从激磁线圈的外加磁场中获得足够的动能,可在分闸线圈的工作气隙区域内设置一由导磁材料构成的磁分路,带有磁分路的永磁操动机构电磁系统的结构如图6所示。

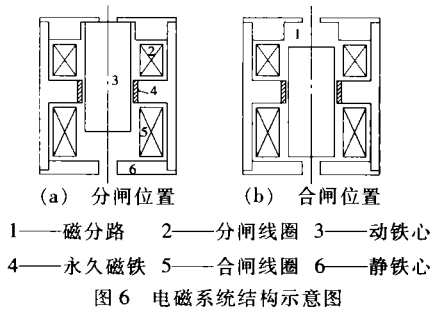


图6 电磁系统结构示意图  
1——磁分路 2——分闸线圈 3——动铁心  
4——永久磁铁 5——合闸线圈 6——静铁心

永久磁铁是利用磁性材料的剩磁而工作的,计算时可以将其看作一个套在磁导体上的具有恒定磁

势  $I_p$  的面电流线圈(匝数  $N=1$ )<sup>[5]</sup>。计算可采用有限元法对永磁操动机构电磁系统的静磁场进行数值计算。其磁场分布具有轴对称性,故可采用圆柱坐标  $(r, \theta, z)$ ,  $r$  坐标为半径方向,  $z$  坐标为对称轴。以  $z=0$  平面为对称面,故只需计算其左半部分即可。计算场域  $\Omega$  如图 7 所示,边界面上的矢量磁位  $A=0$ 。

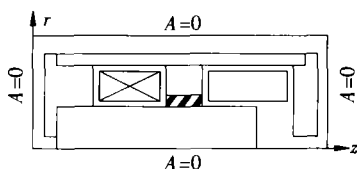


图 7 磁场的计算域  $\Omega$  (取电磁系统结构的左半部分)

根据麦克斯韦方程组,可导出在圆柱坐标系的  $r-z$  平面上矢量磁位  $A$  的数学方程为:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r\mu} \frac{\partial(rA)}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{r\mu} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right] &= -J \\ A|_{r=0} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为磁导率,  $J$  为电流密度。

由于合闸和分闸激磁线圈是不同时操作的,它们各自形成一个独立的电磁系统。二者动态过程方程式的表达形式完全相同,只是具体参数有所不同。激磁线圈的操作能量来自储能电容器的预充电压,并通过功率器件来控制其通断。由于动铁心位移会使永久磁铁的磁场发生改变,故永久磁铁的磁场与激磁线圈的磁场相耦合。图 8 为激磁线圈回路的等效电路。

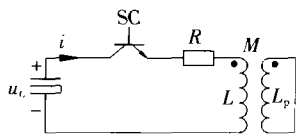


图 8 激磁线圈回路的等效电路

若不计晶闸管的正向导通压降,激磁线圈的电路方程为:

$$\left\{ \begin{aligned} u_c &= iR + \frac{d\Phi}{dt} \\ \Phi &= iL + I_p M \\ i &= -C \frac{du_c}{dt} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中:  $u_c$  为电容器两端的电压,  $i$  为激磁线圈的电流,  $R$  为激磁线圈的电阻,  $\Phi$  为激磁线圈的磁链,  $L$  为激磁线圈的自感,  $M$  为永久磁铁与激磁线圈间的互感,  $C$  为电容器的电容,  $I_p$  为永久磁铁等效面电流。

动铁心在运动过程中,运动部分的位移方程式为:

$$F - F_f(x) - F_f \left( \frac{dx}{dt} \right) = m(x) \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

式中:  $m(x)$  为动铁心运动部分的归化质量,  $x$  为动铁心的位移,  $\frac{dx}{dt}$  为动铁心的运动速度,  $F_f(x)$ ,  $F_f \left( \frac{dx}{dt} \right)$  为与运动部分的位移和速度有关的反力。

对于线性磁系统,当通过激磁线圈的电流为  $i$  时,磁系统的磁场能量为:

$$W = \frac{1}{2} Li^2 + I_p i M + \frac{1}{2} L_p I_p^2 \quad (4)$$

式中:  $L_p$  为永久磁铁等效线圈的自感,动铁心的电磁吸力为:

$$F = \frac{dW}{dx} = - \left( \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} + I_p i \frac{dM}{dx} + \frac{1}{2} I_p^2 \frac{dL_p}{dx} \right) \quad (5)$$

可用有限元法计算出所需的电磁参数  $L, M, \frac{dL}{dx}, \frac{dM}{dx}$  和  $\frac{dL_p}{dx}$  对位移  $x$  的函数。

为了使永磁操动机构能得到较大的输出机械功率而快速动作,电磁系统及电源参数必须正确选择。输出机械功的电源可采用大容量电介质电容器经充电后提供。为了完全满足分、合闸速度和运动力的要求,可以通过激磁线圈匝数的减少和增加来达到<sup>[2]</sup>。

目前,126 kV 真空断路器的永磁操动机构的计算正在进行中。

## 5 结论

通过对真空灭弧室各种电极结构的比较,及对永磁操动机构的计算,提出了生产 126 kV 真空断路器的初步设计方案,即:①电极结构采用 4 极纵向磁场结构;②操动机构采用永磁操动机构。

## 参考文献:

- [1] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.
- [2] 马少华. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究和设计[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [3] 贾申利. 真空开断电弧特性研究及其应用[D]. 西安交通大学博士论文, 1997.
- [4] H Fink, M Heimbach, W Shang. Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Field Contacts Based on Bipolar and Quadrupolar Design[A]. IEEE 19th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum[C], Xi'an, China, 2000.
- [5] 马少华, 徐建源, 王季梅. 永磁操动机构特性分析和配用于高压真空断路器的可能性[J]. 高压电器, 2000(4): 19-23.

作者简介: 刘东晖(1967-), 女, 新疆人, 博士研究生, 从事真空电弧理论及其应用的研究。