

[开关设备]

大容量真空灭弧室的可靠性设计与制造

文/陕西宝光真空电器股份有限公司 何广丽

针对大容量真空灭弧室在应用方面存在的关键点进行了分析，提出了在大容量真空灭弧室设计和制造过程中应注意的问题，并给出了相应的解决措施，对提高大容量真空灭弧室的可靠性有一定的借鉴意义。

真空开关自问世以来，因其优越的开断性能、超长的使用寿命，现已在中压领域的电力输配电系统中占据主导地位。中压输配电领域的真空开关的电压一般在7.2~40.5 kV之间，额定电流一般不超过4 000 A，而短路开断电流也低于50 kA。在更高电压领域和更大电流应用场合，尤其是大容量发电机出口保护断路器，额定电流一般都大于5 000 A，短路开断电流也大于50 kA，而真空开关由于真空灭弧室的通流能力和开断能力的限制，真空开关的应用还不多。在高压领域，126 kV以上的真空开关各国都在研制，也进行了一些试验验证，日本的明电舍、我国的陕西宝光等企业也相继推出了126 kV、145 kV的真空灭弧室。随着真空开关制造技术和理论研究水平的不断提高，全球环保问题的日益突出，真空开关作为环境友好型开关，替代SF₆向高电压、大电流领域发展的呼声越来越高，真空开关的研发就显得尤为重要，而其关键的元件真空灭弧室的设计制造水平就极大地影响了真空开关在这些领域的应用前景。

大容量真空灭弧室设计要点

近年来，国内大容量真空灭弧室的研发已经取得了突破性进展。145 kV/3 150 A~40 kA的真空开关以及在发电机出口保护等方面应用的大电流开关也有了新的进展，继6 300 A/80 kA真空灭弧室研发成功后，更大容量的真空灭弧室及真空开关也在积

极研发。以下将就提高真空灭弧室的可靠性进而提高真空开关的可靠性进行介绍，主要有以下几个方面。

1. 可靠性设计

针对不同应用场合的不同要求，仔细分析其参数的特殊性，有针对性地进行设计，是提高灭弧室可靠性的关键，同时，将历史经验的积累吸收、场分析软件的有效使用以及验证性试验三者有机结合，是设计高可靠性灭弧室的不可或缺的方法。

2. 绝缘优化

大容量真空灭弧室有一个共同特点，就是绝缘水平要求高。作为高压领域应用的灭弧室，126 kV本身就要求很高的静态绝缘水平，由于要开断近区故障和失步故障，初始的瞬态恢复电压很高，上升速率很大，这就要求灭弧室具有较高的动态绝缘水平。同样的，用于发电及保护和电气化铁路的灭弧室，不仅静态绝缘水平要求比一般配电应用场合高，在开断后的RRRV都非常高，尤其是发电机保护断路器，预期瞬态恢复电压上升速度非常快，其值为普通断路器要求的13倍。因此，灭弧室必须同时具有更好的静态和动态绝缘。在设计过程中，不仅要依据以前的设计经验，更要利用电场分析软件，反复比较模拟，进行电场的优化，同时考虑与断路器装配后的电场之间的相互影响，设计合理的电场分布，保证绝

缘水平。图1、图2为126 kV真空灭弧室和80 kA真空灭弧室的电场分析结果。

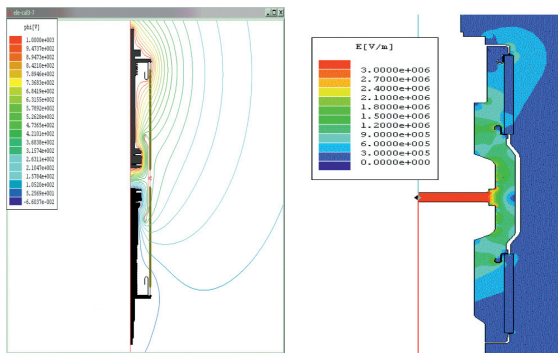


图1 126 kV灭弧室电场分析 图2 大电流灭弧室电场分析

3. 开断能力保证

(1) 电极设计

通过研究开断电流 I 与电极直径 D 、电极形状、电极间的磁感应强度 B_z 和磁场分布之间的关系,根据模拟分析、验证试验以及历史数据的积累总结,得出开断电流计算公式

$$I = 3.079 \times 10^{-3} \times D^2 \times B_z 0.4$$

按照这个公式设计确定的电极尺寸,经试验验证准确度非常高。

(2) 磁场强度和磁场分布

根据研究,同样尺寸的电极,其开断能力不仅取决于磁场强度的高低,也取决于触头表面有效利用面积的大小,即开断能力也与磁场的分布有关。当电极中心的磁场过大时,就会使电弧束缚在中心区域,减少了电极的有效使用面积,开断能力不升反降。同时,在大容量灭弧室设计中磁滞的影响也不可忽视。电极尺寸加大的同时,磁场滞后也随之加大。在开断过程中往往会由于磁滞的影响使触头在起始阶段烧蚀严重而导致开断失败。因此,在设计大容量灭弧室时,不仅要提高电极表面的磁场强度,同时要使电极靠近边缘区域的磁场强度得到加强,得到较好的磁场分布图,有效地提高电极的利用面积,达到稳定可靠的开断能力。图3、图4为不同电极结构沿触头表面直径方向分布的磁场计算结果(横坐标单位为mm,纵坐标单位为mT/kA)。

4. 导电回路设计

对于大容量灭弧室来说,除了其额定短路开断电流比较大以外,其额定电流也很大,这样,降低其温升就成了一大难点。带电体的发热 $Q \propto I^2 R$,当电流增大时,发热增加很快。因此,对大容量灭弧室来说,如何满足真空开关的温升要求

就显得尤为关键。这就需要在产品设计时仔细分析热场分布,设计合理的导电回路和接触面,使灭弧室在开断能力不受影响的前提下导电路径最短、接触面积最大和接触电阻最小,得到优化的内部结构设计,既保证电极的开断能力,又满足导电回路的要求,使得灭弧室的内部回路电阻和接触电阻都保持较小的数值。另外,在与断路器的连接方面对导电面积、接触压力和散热效率进行综合考虑,必要时采取特殊的散热方法如热管技术提高散热效率,达到降低温升的目的。

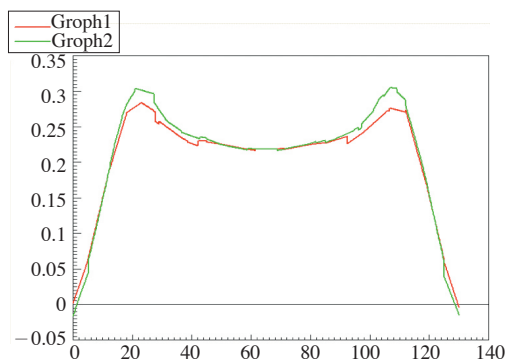


图3 磁场强度和磁场分布分析

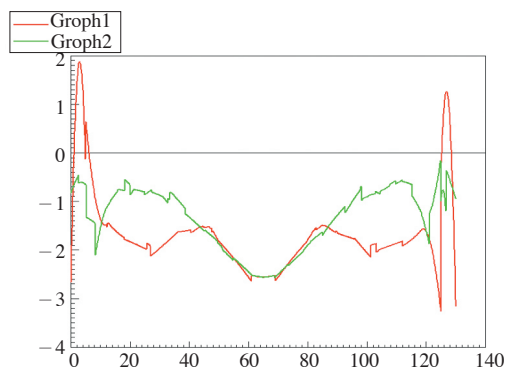


图4 磁滞分析

5. 设计裕度

在应用大容量灭弧室的场合,都要求其可靠而稳定电气性能,无论开断能力还是绝缘水平都要有足够的裕度。尤其是在发电机出口保护回路,其关合电流比普通断路器大,一般情况下关合电流是短路电流的2.5倍,而发电机保护则是2.74倍;同时预期瞬态恢复电压上升速率也远远高于普通应用场合,以12 kV为例,GB/T 14824要求RRRV4.5,而GB 1984要求RRRV0.34;都有失步开断的要求(首开极系数2.5)。因此,在设计中必须充分考虑其应用场合的特殊性,采取特殊措施满足这些电气性能要求。

大容量真空灭弧室的特殊制造工艺

在设计优化的基础上，真空灭弧室的制造工艺对其可靠性起着不可忽视的作用。

1. 采用可靠的一次封排技术，保证大容量灭弧室的彻底除气和真空气密性

一次封排工艺生产的真空灭弧室由于在真空炉中进行除气、焊接和封口，除气温度高、时间长，因此去气效果好、真空度高，同时气密性好，真空寿命长。对大容量灭弧室来讲，一般是先将电极部分与导电部分在真空炉中焊接起来，再与其他零件组装再次进真空炉排气封口。其优点是经过分步焊接，既保证了内部零件的焊接可靠性，同时两次除气更加彻底，而且封排时动静触头可以分开，解决了触头的冷焊问题。

2. 关键零件的制造及采购控制

选择优质的触头材料是保证电气参数达到设计要求的关键。如果说真空灭弧室是真空开关的心脏，那么触头材料就是灭弧室的心脏。在设计中根据材料性能及应用场合选择合适的触头很固然重要，但由于制造厂家及制造方法的繁多，对采购的触头进行质量控制从而确保产品的电气性能也不能掉以轻心。

同样的，其他零件的制造精度和表面质量也直接影响了灭弧室的性能，比如屏蔽筒、电极等零件的表面毛刺、表面粗糙度、 R 角大小等都会使绝缘劣化，因此对这些零件的加工过程控制和表面处理过程要特别关注。

3. 长寿命波纹管的设计制造技术是灭弧室的机械操作可靠性的保障。

波纹管是真空灭弧室的主要结构件之一，由于它结构复杂、壁厚极薄、工艺过程长、操作频率高且使用环境差，很容易出现失效。因此，在某种意义上来说波纹管质量水平的好坏决定着真空灭弧室的机械寿命高低。在大容量灭弧室波纹管的设计中，采用长寿命波纹管的设计技术，采用特殊的波形和特殊的制造工艺，可以很好地解决波纹管的焊接气密性及机械耐久性。

4. 使用新型真空炉，提高工艺稳定性

新型真空炉采用全无油真空系统、计算机自动控制、远程诊断技术和新型的热交换技术，使得冷/热态极限真空、压升率和高温区的温差等指标远远优于早期的大型真空炉，极大的保证了真空灭弧室的除气效果、气密性、焊接强度以及洁净度。

5. 巧妙设计封排夹具，提高产品的一致性

在进行大容量产品封排时，由于其重量和体积都比较大，需要设计专用的新型封接模具，在装配时很好地保证所有零件的位置精度，保证整管的同轴度和垂直度要求，在焊接过程中又能保证在钎料融化过程中零件不产生位移同时有一定的压力保证焊缝质量。

6. 控制洁净度保证良好的动态绝缘和容性电流开断。

灭弧室内部零件的洁净度不仅影响静态真空度，更会对动态绝缘水平产生严重的影响，对容性电流开断过程中的重燃现象起着决定性的作用，因此，要采取有效的措施保证管内零件的洁净度。除了在超净的厂房进行触头等关键零件的加工和装配外，还应使用无油真空系统，设计专用的转运容器，保证零件贮存、运输和封排过程中的清洁。

7. 合理制定工艺流程和工艺参数，是保证真空灭弧室性能的关键

相对于其他灭弧室而言，大容量的灭弧室的工艺流程可能比较长，比如为了提高性能增加的一些老练和检测。但是，要尽可能缩短工艺流程，过于烦琐的工艺对提高性能并无益处，反而会增加产品失效的概率。另外，真空灭弧室在封排前后都要进行各种工艺处理和老练，这些工艺参数要通过不断的改进、试验来达到最优。尤其是电流老练和电压老练参数，设置过低起不到老练效果，设置过高会造成灭弧室损坏。

结束语

电力系统对真空开关的可靠性有着极高的要求，而真空灭弧室的可靠性又是其中的重中之重。在高电压大容量真空灭弧室的设计制造中，只要把握好设计环节的可靠性设计计算和验证，把握好制造环节的质量控制，有了高水平的产品设计、高可靠的制造工艺保证，加上稳定可靠的真空断路器相配合，大容量真空灭弧室在试验中才能有上乘的表现，大容量的真空开关才能满足客户的要求，为电力系统的安全运行提供可靠的保障。EA

(收稿日期：2015.09.29)

(编辑：刘群立)