

李宏仁♦编著

# 高压开关

## 现场技术精要



山东交通大学出版社

# 高压开关现场技术精要

李宏仁 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

高压开关现场技术精要 / 李宏仁编著. —成都:  
西南交通大学出版社, 2015.1  
ISBN 978-7-5643-3547-2

I. ①高… II. ①李… III. ①断路器 IV. ①TM561

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 261394 号

---

高压开关现场技术精要

李宏仁 编著

|       |                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------|
| 责任编辑  | 李芳芳                                                         |
| 封面设计  | 墨创文化                                                        |
| 出版发行  | 西南交通大学出版社<br>(四川省成都市金牛区交大路 146 号)                           |
| 发行部电话 | 028-87600564 028-87600533                                   |
| 邮政编码  | 610031                                                      |
| 网 址   | <a href="http://www.xnjdcbs.com">http://www.xnjdcbs.com</a> |
| 印 刷   | 四川川印印刷有限公司                                                  |
| 成品尺寸  | 165 mm × 240 mm                                             |
| 印 张   | 11.75                                                       |
| 插 页   | 8                                                           |
| 字 数   | 198 千字                                                      |
| 版 次   | 2015 年 1 月第 1 版                                             |
| 印 次   | 2015 年 1 月第 1 次                                             |
| 书 号   | ISBN 978-7-5643-3547-2                                      |
| 定 价   | 56.00 元                                                     |

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 《高压开关现场技术精要》

## 编委会

主 编 李宏仁

副主编 冯权龙 甘德刚 罗 飞

贾志杰 曾庆才 陈轲娜

编 委 王红梅 周电波 邓 勇

马 辉 程旭东 李 源

叶昌俊 杨 涛 罗 洋

王嘉易

# 前 言

从事高压开关现场工作的人员在电力现场可能常常会为某台高压开关是否存在缺陷、属于什么性质的缺陷、是不是应该立即停电进行检修等问题伤脑筋。当出现事故后，如何认定事故的原因和事故的性质，如何避免类似事故再次发生，有时候要回答这样的问题确非易事，往往涉及对高压开关的结构、工作原理等许多问题的理解和把握，这时，常常希望能找到人探讨，从而能得到某种借鉴。

这里，作者将自己多年来从事开关工作的体会和事故处理积累的一些经验编纂成册，奉献给读者，或许能为读者在处理相关问题时提供一点参考。

考虑到各相关人员的基础和背景各不相同，尽量避免复杂枯燥的理论和公式推导，力求用最浅显易懂的语言讲明某些基本原理。不拘泥于细节，注重突出要点，尽量把看似复杂的问题简单化，让即使不是本专业的读者也能较容易地将高压开关以及相关的内容在头脑中形成鲜明的概念，而较好地把握住要研究的对象。

总之，希望读者在不花太多时间和精力情况下，就能对高压开关有一个比较清晰的总体把握，较好地掌握高压开关的相关知识，并能较好地处理现场工作中遇到的相关问题。

这不是一本学术研究的书籍，而是一本实用读物，更多的是现场工作经验的总结和技术交流，一份浓缩的快餐食品，所以它的营养也是不全面、不均衡的。如果不同层次的一线工作者能从书中得到某种启发和借鉴，本书的目的也就达到了。

本书中部分案例的资料数据由罗飞、曾庆才、贾志杰、邓勇、陈轲娜、杨涛、程旭东、李源、叶昌俊等人提供。书中，开关柜涡流过热及 PT 烧毁故障分析由曾庆才编写；案例 12 由李源编写，案例 13 由程旭东编写，案例 17~21 由贾志杰编写，案例 14 的编写以及全文的校核由陈轲娜完成；德阳电力公司的部分技术规范由邓勇供稿；审阅：冯权龙、王红梅。这里对相关人员的的大力支持和帮助一并致以谢意。

作 者

2014 年 9 月

hongren48@sina.com

# 目 录

## 上篇 高压开关和开关试验

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 引 言 .....             | 3  |
| 第一章 基础知识 .....        | 5  |
| 第二章 高压开关的试验概述 .....   | 24 |
| 第三章 高压开关的机械特性试验 ..... | 26 |
| 第四章 波形的分析 .....       | 33 |
| 第五章 开关柜的常见问题 .....    | 50 |
| 第一节 防止开关柜结露的问题 .....  | 50 |
| 第二节 开关柜发热故障 .....     | 59 |
| 第三节 防止动、热稳定事故 .....   | 69 |
| 第四节 防止电缆头故障 .....     | 71 |

## 下篇 案例篇

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 案例一 机械传动异常 .....        | 83 |
| 案例二 110 kV 开关同期异常 ..... | 85 |
| 案例三 220 kV 开关同期异常 ..... | 86 |
| 案例四 卡涩导致开关爆炸 .....      | 88 |
| 案例五 某真空开关开断失败事故分析 ..... | 89 |

|       |                                         |     |
|-------|-----------------------------------------|-----|
| 案例六   | 拉杆松动故障 .....                            | 101 |
| 案例七   | 测试操作不当造成假象 .....                        | 111 |
| 案例八   | 缓冲器引发的一些故障 .....                        | 113 |
| 案例九   | 开关柜 CT 击穿事故 .....                       | 115 |
| 案例十   | 开关因雷电闪络发生爆炸 .....                       | 116 |
| 案例十一  | LW34 开关爆炸事故原因分析 .....                   | 119 |
| 案例十二  | LW25-126 开关合闸波形异常分析 .....               | 129 |
| 案例十三  | LW34C-40.5 开关机械特性测试结果异常分析 .....         | 132 |
| 案例十四  | GIS 回路电阻现场测试易出现的错误 .....                | 136 |
| 案例十五  | 某 110 kV 站 10 kV 分段隔离柜过热烧毁事故 .....      | 138 |
| 案例十六  | 10 kV 母线分段开关柜烧损事故分析 .....               | 144 |
| 案例十七  | 红外热像检测 35 kV 电缆头缺陷 .....                | 149 |
| 案例十八  | 红外成像发现灭弧室 SF <sub>6</sub> 气体泄漏 .....    | 154 |
| 案例十九  | SF <sub>6</sub> 分解产物发现 GIS 刀闸悬浮放电 ..... | 156 |
| 案例二十  | 红外成像检测主变套管 SF <sub>6</sub> 泄漏缺陷 .....   | 164 |
| 案例二十一 | 红外热像发现支柱瓷瓶内部缺陷 .....                    | 167 |
| 附 录   | .....                                   | 174 |
| 附录 1  | 母线螺栓搭接面的安装 .....                        | 174 |
| 附录 2  | 10 ~ 35 kV 电缆头制作、安装及试验、验收 .....         | 175 |
| 附录 3  | 书中相关彩图 .....                            | 181 |



# 上 篇



## 高压开关和开关试验

---



## 引 言

目前,国内在开展高压开关的机械特性测试时,大多数情况下只测一下时间数据,而国产开关所给出的时间量标准值又非常宽泛,如合闸时间 $\leq 60\text{ ms}$ ,分闸时间 $\leq 40\text{ ms}$ 。现场测试的结果几乎没有不合格的。所以,许多人都认为:开关的机械特性试验似乎可做可不做。然而,高压开关问题出得最多的往往是机械方面的故障。对于这样一个问题应该如何看待呢?我们也许能从下面的故事中得到某种启发。

1998年,四川电力试验研究院受四川省电力公司的委托,担负了对西昌500 kV昭觉变电站的调试任务。由于该地区特殊的地理条件,为确保质量,特别选用了某国际知名品牌的原装进口500 kV GIS。在调试过程中发现,该GIS 24台带合闸电阻的开关中,多数开关合闸电阻的提前投入时间较厂家规定的时间多 $1\sim 2\text{ ms}$ ,且在合闸电阻支路断口的波形中出现较多的弹跳波形。我方把这一情况及时告诉了该公司驻中国办事处。针对我方的一再质疑,该公司中国办事处以及国外总部多次来电或发来传真,认为该开关没有问题,可以投运。但是,在我方的强烈要求下,该公司从国外派来了由多人组成的高级专家代表团,与我们一起在变电站召开现场会议,针对试验报告的结果双方阐述各自的观点。该公司专家认为:合闸电阻提前投入时间多 $1\sim 2\text{ ms}$ 是很正常的,也不会影响开关的正常运行。我方的意见则是,对于开关来说,多 $1\sim 2\text{ ms}$ 的确不会有什么影响,但是这多出的 $1\sim 2\text{ ms}$ ,以及合闸电阻在投入过程中所表现出来的不正常的弹跳现象,表明开关工作不正常,明确向对方指出:我们认为这批开关存在严重的机械缺陷!双方在会上未能达成一致。事后,在对该GIS进行局部解体查勘时发现,这些开关在经过了现场调试过程中的多次操作后,合闸电阻断口相关机构的转轴大部分出现了严重磨损,并出现明显的凹凸伤痕。合闸电阻在投入过程中所表现出来的不正常的弹跳现象,正是由于此转轴的严重

缺陷所引起的。事后查明，这是车间在装配过程中，误将未经热处理强化的转轴错装入产品造成的。若不是在测试中及时发现了这些缺陷，投入后将会造成非常严重的事故。图 1 为该 500 kV 开关的合闸波形。

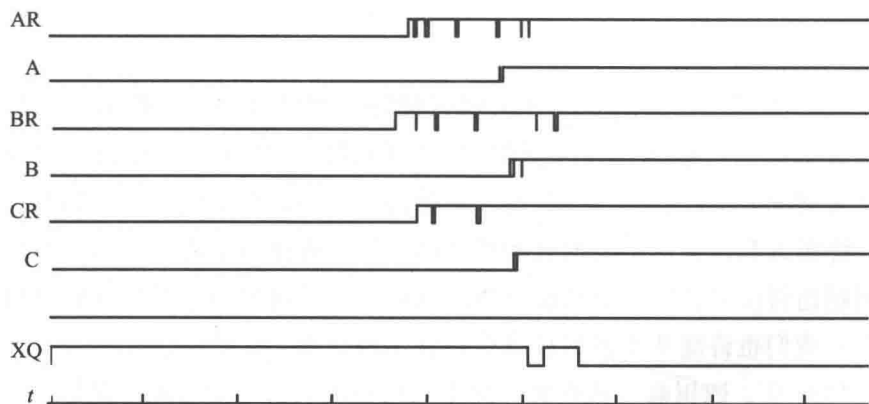


图 1 该 500 kV 开关的合闸波形

A、B、C—主断口波形；AR、BR、CR—合闸电阻断口波形；XQ—线圈电压波形； $t$ —时间坐标

此事例说明，即使是众多权威的专家，在解读试验结果时也可能会出错。同时也告诉我们，开关的机械特性试验结果值得我们花一些精力认真分析它，真正读懂它。

而要读懂开关试验的结果，首先应该了解你的试验对象，了解高压开关的基本结构、工作原理，各种开关的特点；了解开关试验参数的意义以及这些试验参数对开关性能有什么样的影响等。只有对试验对象本身有了深入的了解，才可能从试验结果中发现问题，及时发现开关可能存在的缺陷和故障。

下面，我们共同来复习关于开关本体的一些基本知识。这里希望用最浅显的语言，尽量避免枯燥的理论和复杂的算式，把一些看似复杂的问题简单化。不纠缠细节，而突出事物的梗概，力求通过简要的描述，使读者能形成一些鲜明的概念，从而很好地把握住研究的对象，抓住问题的本质。

# 第一章 基础知识

## 一、高压开关的基本功能

高压开关除了作为接通和断开正常负载的工作设备以外，同时还是电力设备中最重要的保护设备。也就是说，高压开关除了要投、切正常的工作电流以外，同时还担负着投、切故障电流的任务。为什么高压开关的基本功能包括“投”故障电流的问题，这是因为在合开关的时候，并不知道将要被接通的回路究竟是处于“良好”的状态，还是处于非正常状态，甚至短路状态。只有开关合上以后，相应的保护回路才能通过检测确定回路是否正常。如果检测到短路故障电流，将立即发出跳闸指令，开关跳闸。这时，高压开关做的是一个“合分”操作，它所接通的是一个短路电流。显然可靠地接通和切断此故障电流是高压开关的一种额定工况。

过去，笔者在从事高压开关技术管理工作的早期，每年从基层电业局报上来的工作总结中，总有一两起这样的说法：“某某 10 kV 出线开关因用户故障而发生爆炸，事故责任人——用户”。言下之意，开关无法切断故障电流而导致开关爆炸是天经地义的事。后经多次向基层开关专责说明，可靠切断故障电流是开关的基本功能，由于用户方出现故障而导致开关爆炸，应该查找开关自身的原因。以后，这样的说法才逐步得到纠正。

## 二、高压开关的基本结构

高压开关（瓷柱式断路器）的基本结构可以大体看成由灭弧室、绝缘支柱、操动机构等三大部分组成。其外形结构如图 1-1 所示。灭弧室由绝缘外壳和装在内部的动、静触头以及灭弧介质等部分构成。操作机构则通过绝缘拉杆驱动动触头进行合闸或分闸操作。

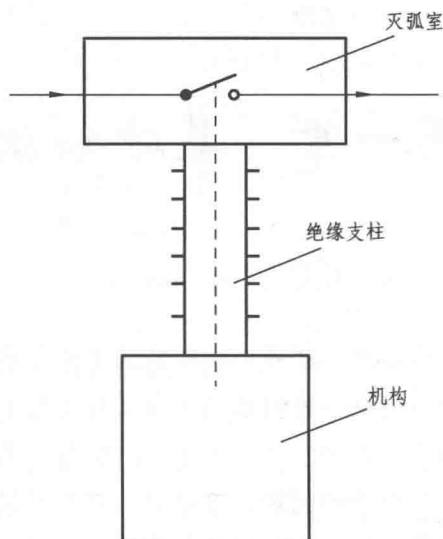


图 1-1 高压开关基本结构图

### 三、关于灭弧

高压开关工作中，绝大部分情况下，被开断电路的电压和电流都大于生弧电压和生弧电流，所以在分闸过程中总要产生电弧，而如何可靠地切断电弧就成了高压开关实现其切断电路任务的关键。可以毫不夸张地说，高压开关的核心工作就是围绕如何灭弧来进行的，高压开关的技术进步也是以其灭弧能力的提高为标志的。

#### 1. 电弧的产生

高压开关接到分闸信号后，触头开始做分闸运动时，动、静触头接触的面积逐渐减小，接触处的电流密度逐渐增大，因而此处的金属强烈发热。在触头分离瞬间，接触处的金属先熔化，形成液态金属桥，然后一部分变成金属蒸汽进入触头间隙中。同时，在动、静触头分离的瞬间间距近似为无穷小，那么此时动、静触头间的电场强度则为无穷大。在甚高的电场强度和温度的作用下，阴极触头表面喷射电子，金属蒸汽被电离，使弧隙中

产生大量的电子和正离子，弧隙中气体的温度迅速升高，气体中带电粒子越来越多，气体的导电率越来越大，因而弧隙两端的电压降越来越小，电弧逐步稳定燃烧。整个过程在 $\mu\text{s}$ 级的时间内完成。

## 2. 关于灭弧

为了熄灭电弧，必须采取专门的技术措施。而熄灭电弧最常用的措施就是吹弧：用强烈的气流吹拂电弧，强迫电弧通道的温度降低。同时，利用交流电源电流“过零”的机会，其燃烧产生的功率 $P = i^2 r = 0$ （ $r$ 为电弧通道的等值电阻）的时刻使电弧通道的温度迅速下降，被电离的正、负离子重新结合成不导电的中性分子或原子。动、静触头间的绝缘重新建立，熄弧的工作完成。这一使正、负离子重新结合成不导电的原子或分子的过程，也被称为“游离”过程。

故障电流由于其电流值较大，电弧产生的能量也就大，因此要实现熄弧也就更加困难。而对于感性或容性负载，由于其中电压与电流的相角度为 $90^\circ$ ，当电流过零时，触头两端的电压却达到最大值，高的电场强度使得熄弧也就更困难。

由于技术的进步，使得开关的开断能力越来越强。近年发展起来的一种叫自能式熄弧原理的开关，就是利用电弧燃烧时气体膨胀，气压上升，利用此压力来帮助吹拂电弧，从而实现了用较小的操作功开断较大电流的目的，从而使操作功较小的弹簧机构有可能完成过去只能用操作功强大的液压机构、气动机构才能完成的工作，提高了高压开关的机械寿命，保证了高压开关的可靠性。

## 四、各种开关灭弧室的结构、工作原理及注意事项

不同的高压开关采用了不同的介质，此介质既作为开关内部的绝缘介

质，又作为熄灭电弧的灭弧介质。各种介质具有不同的特点，正是由于采用的介质不同决定了相应开关结构的不同。

## （一）真空开关

### 1. 真空介质的特点

在高真空度的情况下，真空有非常好的绝缘性能。在均匀电场下，真空的击穿场强可达  $30\,000\text{ V/mm}$  以上（因极板状况不同而异）。因此，真空是非常好的绝缘介质。另一方面，由于真空电弧独特的性质，又使得真空具有非常好的灭弧性能。

通常，我们所见到的大气中的电弧——闪电，其电弧通道被约束在某一狭小的空间内，其形态就像树根一样。但是真空电弧的形态则完全不一样，它的形状呈喷射状，在平板电极间（从阴极板到阳极板间）形成一个个形状像圆锥体的、截面面积不断扩大的电弧。这种电弧被称之为扩散型电弧。其电弧形态如图 1-2 所示。

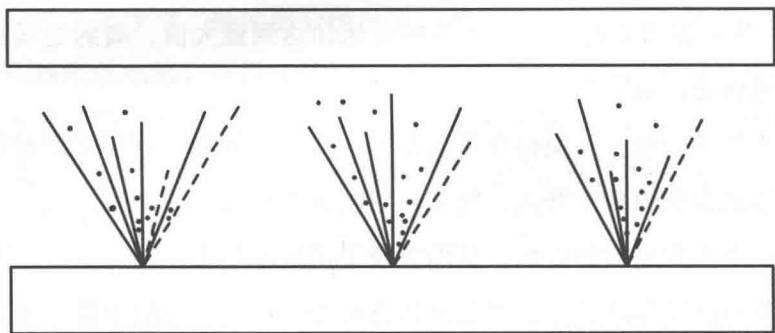


图 1-2 真空电弧示意图

真空是一种性能优异的灭弧介质，真空中的燃弧与熄弧过程如下。当电流较小时，电弧只有一个阴极斑点，一条呈圆锥形的弧柱，锥顶在阴极斑点上。随着电流的增大，电弧分裂成许多并联的支弧，每一支弧有自己的阴极斑点和圆锥形的弧柱。这些支弧的斑点互相排斥并从电极的中心不断向边缘部分运动。当一个支弧运动到电极的边缘后，它就熄灭，于是电



极中心部分的支弧再分裂产生新的支弧。在交流电流过零前,随着电流瞬时值的减小,阴极斑点的数目也减少,最后只剩一个斑点并在电流过零时消失。弧隙中残留的金属蒸汽和等离子体向周围真空中迅速扩散,凝结到屏蔽罩上和触头上。这样弧隙可以在数微秒之内由导体状态恢复到真空间隙的绝缘水平。

## 2. 真空开关灭弧室结构

真空开关灭弧室主要由动、静触头以及将其封闭起来的壳体组成,内部抽  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  Pa 的高真空,其基本结构如图 1-3 所示。其中静触头固定在上法兰上,动触头通过金属波纹管与下法兰焊接,从而保证动触头在运动时,灭弧室内部仍然是一个高度密闭的空间。

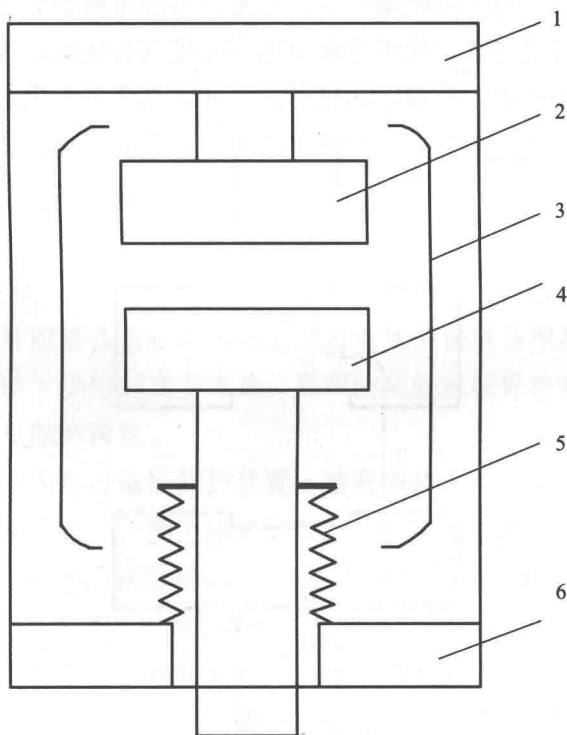


图 1-3 真空开关灭弧室示意图

1—上法兰; 2—静触头; 3—屏蔽罩; 4—动触头; 5—波纹管; 6—下法兰