

「开关设备」

高压直流隔离开关发热问题研究

文/西安西电高压开关有限责任公司 王宇驰 司小伟

基于三个直流工程中400 kV直流隔离开关发热问题的研究，发现通流标准不统一、连接板结构与金具不匹配和螺栓夹紧力不足是造成隔离开关连接结构发热的主要原因。针对以上分析，根据产品的不同结构与连接材料提出新的通流密度选取标准，给出了接线端子板的标准结构以及制订了具体的装配工艺。最后，针对发热产品进行改良，现场情况运行良好。

近年来，随着我国工业化和城镇化建设的不断推进，能源需求将进一步扩大。预计到2020年我国用电量几乎相当于2010年的1.5倍。然而，我国能源和负荷却呈现出逆向分布的态势。风、光、煤炭资源主要集中于西北、山西和内蒙古东部等地区，水资源主要集中于四川、西藏和云南等西南地区。上述地区距离我国主要负荷中心“三华”均有千里之遥。因此，必须通过特高压、大功率输送技术才能确保我国能源的经济、高效利用。

高压直流输电由于输送距离远、输送功率大、稳定性高与利于分区调度管理的优点，受到广泛的关注。高压直流隔离开关作为直流输电的重要设备，发热是造成隔离开关频繁发生故障的重要原因，这将会极大地危及电网安全。因此，研究和解决直流隔离开关的发热问题非常重要。

针对三个直流工程中的高压隔离开关过热问题进行分析，随后制定了相应的设计与工艺参考标准，为今后设计生产提供技术支持和参考依据。

现场情况

某三个满负荷运行换流站的400 kV高压直流隔离开关产品在运行过程中，出现了个别产品局部发热现象。隔离开关的外观如图1所示。



图1 400 kV高压直流隔离开关外观图

400 kV高压直流隔离开关发热部位实测温度如图2所示，动触头软连接处、导电基座软



(a) 动触头软连接处

(b) 导电基座软连接处

(c) 接线端子与金具的搭接处

图2 400 kV高压直流隔离开关现场实测温度值

连接处、接线端子与金具的搭接处实测温度在80~170℃之间。

过高的温度会影响导电材料的性能,从而威胁系统安全运行。表1汇总了具体的发热情况。从表1可以看出,三个工程现场通流为4 500~5 000 A,发热处集中在接线端子、软连接和导电基座等部位的连接处。其中,接线端子与金具的搭接处出现的发热情况最多。

表1 400 kV高压直流隔离开关发热情况汇总

工程名称	额定电流/A	现场通流/A	发热处数	位置
工程一	5 000	4 500	3	图2a、2b、2c
工程二	5 500	5 000	1	图2c
工程三	5 500	5 000	1	图2c

隔离开关发热分析

1. 通流密度设计依据

原有设计温升的极限通流密度如表2所示,所列数据即为原产品设计依据。为了避免产品出现发热问题,设计产品时,实际的通流密度一般应小于表2中的电流密度值。

表2 无镀层接头接触面的电流密度标准

工作电流/A	J_{Cu} (铜-铜)/(A/mm ²)	J_{Al} (铝-铝)/(A/mm ²)
<200	0.31	
200~2 000	$0.31 - 1.05(I - 200) \times 10^{-4}$	$J_{Al} = 0.78 J_{Cu}$
>2 000	0.12	

注: I 为回路工作电流。

连接部位的电流密度 ρ 的计算公式为

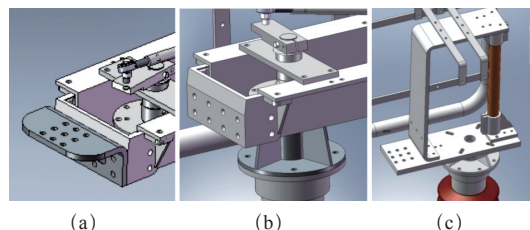
$$\rho = I / S \quad (1)$$

式中, I 为额定电流; S 为有效接触面积。

2. 隔离开关连接部位温升实验

400 kV直流隔离开关各连接部位如图3所示。

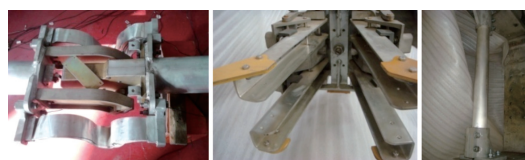
各连接部位的结构参数与温升试验数据如表3所示。在温升试验中隔离开关各连接部位温升均低于限值,但是,在现场中有个别产品出现发热



(a) U形连接板与动侧接线端子的连接处 (铝-铝)
(b) U形连接板和铝型材的连接处 (铝-铝)
(c) 接线端子与金具的接触面 (铝-铝)



(d) 铝型材和软连接的连接处 (铝-铝)
(e) 下部导电管和软连接的连接面 (铝-铝)
(f) 下部导电管和中间软连接的接触面 (铝-铝)



(g) 上部导电管和软连接的接触面 (铝-铝)
(h) 动触片 (铜)
(i) 静触头杆 (铜)



(j) 动触头处软连接部位 (铜-铝)
(k) 夹紧块和弯板的接触面 (铝-铝)
(l) 弯板和接线板的接触面 (铝-铝)

图3 400 kV高压直流隔离开关各连接部位

情况,这是由于复杂的现场情况造成的。图3a中U形连接板与动侧接线端子的连接处(铝-铝)在现场出现个别产品发热情况,这是因为接触的部位设计的通流密度裕度较小。过小的裕度值使得产品设计参数难以承受环境变化、装配人员操作水平或其他不确定因素带来的实际参数的波动,从而造成最终产品发热。如图3d与图3j,现场发热的原因因为安装工艺不规范所致。

3. 通流密度参考值确定

分析表3和表4可知,通流极限裕度较小是直流隔离开关发热的重要原因之一。不同设计者对通流密度的经验值选取不统一,最终造成设计紊乱。针对此问题,根据长期运行经验,增大产品的设计裕度,提高产品在大负荷作用下长期通流的稳定性,建议的直流隔离开关参考的电流密度标准如表4所示。

4. 接线端子连接的设计参考

在现场检修过程中,发现了一些在接线端子与金具连接处,由于接线端子与现场金具结构不

表3 400 kV隔离开关的温升试验数据

(试验电流为AC 5 000 A; 温升稳定后电流为AC 5 500 A, 时间2 h)

接触位置	接触面积/mm ²	电流密度/(A/mm ²)	测量值/℃	限值/℃	现场发热情况
图3a	30 264	0.167	36.7/43.2	65	个别发热
图3b	24 159	0.200	41.5/49.5	65	未发热
图3c	32 464	0.077	36.4/40.6	65	未发热
图3d	5 812×2	0.435	59.9/71.1	75	个别发热
图3e	5 812×2	0.435	51.0/61.2	75	未发热
图3f	5 812×2	0.435	52.6/62.6	75	未发热
图3g	5 812×2	0.435	50.7/61.8	75	未发热
图3h	668×4	1.890	53.1/63.8	65	未发热
图3i	1 571	1.610	49.3/61.2	65	未发热
图3j	2 750×4	0.46	50/58.3	75	个别发热
图3k	18 041	0.140	36.4/46.0	75	未发热
图3l	9 602	0.260	35.5/42.6	75	未发热

表4 直流隔离开关参考的电流密度标准

名称	电流密度标准/(A/mm ²)
接线端子(铝-铝)	0.07
内部零部件搭接面(铝-铝)	0.30
内部零部件搭接面(铝-铜)	0.50

表5 接线端子板结构的标准化

(额定电流为5 000 A)

名称	图示	参数
两排10孔		1) 孔大小为 $\phi 18$ mm, 孔间距为 60×60 mm, 孔距离接触边尺寸 $35\sim 40$ mm, 接触面长 $310\sim 320$ mm, 接触面宽 $130\sim 140$ mm 2) 接触面积为 $37\ 755\times 2$ mm ² (已除去孔), 5 000 A通流密度为 0.066 A/mm ² 3) 金具与接线端子接触面面积最小为 310×130 mm ²
三排15孔		1) 孔大小为 $\phi 18$ mm, 孔间距为 50×50 mm, 孔距离接触边尺寸 $30\sim 35$ mm, 接触面长 $260\sim 270$ mm, 接触面宽 $160\sim 170$ mm 2) 接触面积为 $37\ 782\times 2$ mm ² (已除去孔), 5 000 A通流密度为 0.066 A/mm ² 3) 金具与接线端子接触面面积最小为 260×160 mm ²

针对图3d出现的情况, 我公司将铝质软连接改为铜质软连接, 增加导流板, 基座处软连接改进后: 铜质, 增加分流板接触面积为 $5\ 812\times 2+12\ 181\times 2$ mm², 5 000 A通流密度为 0.14 A/mm²,

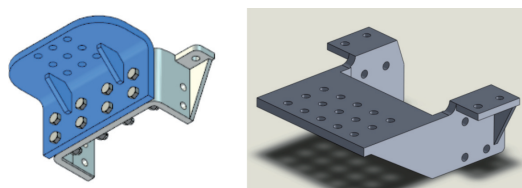
匹配及夹紧力不够造成的局部发热的问题。通过对发热点发热的计算分析, 针对对高压直流隔离开关产品制定统一的接线端子设计参考标准及接线端子力矩标准。接线端子板和金具连接的装配工艺总体要求为接线端子与金具连接时至少采用6.8级螺栓, 紧固时需加弹簧垫圈, 并按标准力矩值紧固, 其夹紧力即可满足接触压力要求。详细的直流产品接线板结构标准如表5所示, 给出了两排10孔与三排15孔, 两种连接孔的布局及具体结构参数。设计人员可根据接线端子板和金具连接的装配工艺总体要求, 结合参考标准针对不同产品做相应调整。

改进后情况

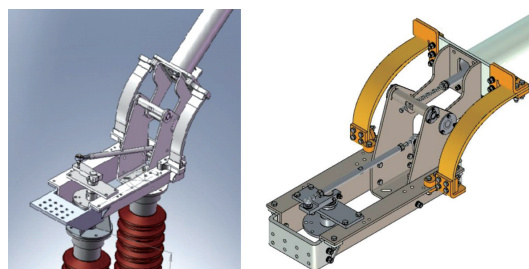
为了保证电网的安全, 根据对高压隔离开关的发热分析, 对相应的隔离开关进行改造升级。针对图3a出现的情况, 我公司根据提出的通流密度标准更换大接触面的接线端子和金具, 动侧接线端子改进后: 接触面积为 $37\ 782$ mm² $\times 2$, 5 000 A通流密度为 0.066 A/mm², 5 500 A通流密度为 0.07 A/mm², 如图4所示, 现场更换后运行情况良好。

如图5所示, 现场更换后运行情况良好。

针对图3j所示的动触头软连接处, 增加软连接和上部导电管的接触面积和压紧力, 改进后: 接触面积为 $3\ 812$ mm² $\times 4$, 5 000 A通流密度为 0.322 A/mm²,



(a) 动侧接线端子改进前 (b) 动侧接线端子改进后
图4 接线端子与金具连接部位改良

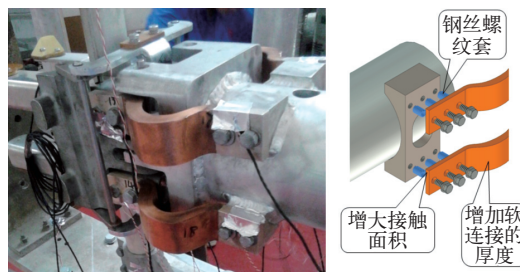


(a) 软连接部位改进前 (b) 基座处软连接部位改进后
图5 基座处软连接部位改良

5 500 A 通流密度为 0.35 A/mm^2 ，如图6所示，现场更换后运行情况良好。

结束语

通过对直流系统运行特点的分析和事故现场



(a) 动触头处改进前 (b) 动触头处改进后
图6 动触头处软连接部位改良

环境等影响，使得实际温升超过设计温升，引起联接处发热异常。

2) 接线端子板螺钉分布不合理与紧固力矩不足造成连接不紧，从而使接触电阻增大。

3) 安装工艺不规范导致联接处接触不良，从而引起连接处的发热。

经过研究分析，修正了产品温升设计裕度、提出了接线端子通流密度的参考标准、制定了接线端子板的结构设计参考标准和装配力矩标准。最后，针对相应的发热产品进行改良，现场更换后运行情况良好。EA

(收稿日期：2017.10.18)

(编辑：刘群鑫)

虹润人工智能温控器喜获三项国家发明专利

虹润人工智能温控器产品，是虹润公司集二十多年自动化控制理论研究成果、十多年现场经验积累而成的产品，融合了当前国内外多种最先进的温控算式。特别是经过近几年潜心研究，造就了真正的人工智能算式。虹润人工智能算式温控器，无需人工整定参数，控温精度达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，无超调、欠调，达国际先进水平。

虹润全新人工智能温控器喜获三项国家发明专利，并主持起草了温控仪表国家标准。该算式产品用于空空导弹研究院、中国原子能科学研究院、中科院高能物理研究所等20多家军工企业。还被广泛应用于航天航空、军工生产、核电高铁、采矿冶金、石油石化、食品医药、机械电子、装备制造和农业环保等领域。



一直以来，虹润秉承创新铸就生命力的科技理念，十分重视知识产权开发与保护，本次发明专利的获得以及国家标准的制定不但为虹润产品提供了有效的知识产权保护，还提升了企业知名度，进一步提升了公司的核心竞争力。

