

特高压 6250A 大电流直流金具的研制

王晶¹ 周子瑜² 胡帅²

(1 平高集团有限公司 河南 平顶山 467000; 2 河南平高电气股份有限公司 河南 平顶山 467000)

摘要: 随着特高压直流输电容量的进一步提升,特别是±800kV特高压直流输电功率增至10000MW、输送电流由5000A升至6250A,对直流金具的结构设计与性能指标提出了更高的要求。本文着重阐述了输送电流提升前后直流金具通流能力的差异,特别是对于额定电流和过负荷电流的要求,以及直流金具的研制成果。

关键词: 特高压直流; 6250A大电流; 直流金具; 研制难点

0 引言

换流站是直流输电系统的核心组成部分,承担着交直流转换的关键任务。直流金具用于实现换流站中阀厅内及直流场内各设备之间的相互连接,设备虽小却是特高压直流输电中的必要设备,也是国产化最晚的设备之一。6250A直流金具的结构型式继承了原5000A工程直流金具的设计,6250直流金具研制的技术难点主要在于电流提高之后带来的导体发热、设计结构调整等问题。本文对直流金具的结构设计进行了介绍,并从设备研制角度讲述了直流金具在通流能力提升方面的研发难度和解决方案。

1 6250A 直流金具技术特点

在投运的超/特高压直流输电工程中,均出现过设备本体和接头端子发热的问题,对输电的可靠性产生了严重的影响。由于直流工程中设备长期处于满负荷运行工况,运行条件较为严苛,即便换流站内各设备都经过了温升试验的考验,但在实际运行中温升依然容易超限。金具承担着各设备之间的连接,除本身的运行温度外,也受到与之连接的设备运行温度的影响,加之安装工艺不到位,设备与金具的连接处往往成为发热的薄弱点。以往工程运行时发现的设备端子连接处过热,往往通过安装工艺改进和增大通流面积等技术改造解决了此类问题。

1.1 直流金具防止发热要求

金具应具有良好的电气性能,满足通流要求,通过金具的连续额定载流量,应在允许的温升条件下,不小于回路的额定电流值。应保证金具电气连接端子处的载流密度应在满足DL/T 5222-2005《导体和电器选择设计技术规定》要求的基础上再考虑一定安全裕度。金

具电气连接端子处的载流密度仍不宜高于DL/T 5222-2005《导体和电器选择设计技术规定》的要求。

在核算与设备端子连接处电流密度时,电流应按照系统的额定电流选取,接触面积需采用实际搭接面积。针对早期±800kV 5000A工程,铝-铝接触面电流密度控制在0.0936A/mm²以内,铜-铜以及铜镀银-铝镀锡接触面电流密度建议控制在0.12A/mm²以内,铜铝过渡接触面电流密度控制在0.1A/mm²以内。针对±800kV 6250A工程,铝-铝接触面电流密度控制在0.07488A/mm²以内,铜-铜以及铜镀银-铝镀锡接触面电流密度控制在0.0936A/mm²以内,铜铝过渡接触面电流密度控制在0.08A/mm²以内。

1.2 直流金具技术参数

电流提升后直流金具设计输入条件中对金具通流能力的要求有相应调整,具体对比见表1和表2。

表1 ±800kV 5000A工程直流母线电流额定值

理想条件下输送额定功率时的直流电流 $I_{dN}(A_{dc})$	5000
最大连续直流电流 $I_{mcc}(A_{dc})$	5046
2小时过负荷电流 $I(A_{dc})$	5343

表2 ±800kV 6250A工程直流母线电流额定值

理想条件下输送额定功率时的直流电流 $I_{dN}(A_{dc})$	6250
最大连续直流电流 $I_{mcc}(A_{dc})$	6328
2小时过负荷电流 $I(A_{dc})$	6693

在系统电流为6250A的情况下,直流金具的额定电流设置为6250A,在设计过程中考虑一定的设计裕度,温升试验电流为7500A,可以满足±800kV/10000MW级特高压直流工程的需求。

6250A直流金具的设计一般是基于以往同类型的直流金具。目前,直流金具最大的额定电流为5000A,但还未有通流能力达到额定电流6250A/温升电流7500A

的直流金具产品。而且直流金具不同的结构设计对散热也有着不同的影响，在相同外屏蔽尺寸下，大电流的直流金具结构更加紧凑，同样需要考虑实际安装中可能出现的问题。因此，需要对现有直流金具进行优化设计，研发出满足 10000MW 工程的直流金具。

2 6250A 直流金具技术方案

特高压换流站内直流金具主要包括阀厅金具和直流场金具。

2.1 阀厅金具技术方案

阀厅是高压直流输电的中枢环节，阀厅内交、直流场混合，设备众多且相对昂贵，各式设备通过阀厅金具实现连接。目前，已经投运的 ±800kV 换流站阀厅均采用了管型母线和软导线混合联结的方式，阀厅内设备连接总体上采用管型母线，管型母线与设备的连接在局部上则采用软导线，这使得阀厅的整体布置显得非常清晰简洁，但阀厅内连接的金具则需根据实际工况进行特殊定制。阀厅金具在结构设计中应主要考虑连接位置的载流量要求、防电晕特性要求、机械强度的可靠性要求、耐热性要求、外形尺寸以及金具连接型式的要求等。

以往 5000A 工程中，直流金具的通流能力设计裕度较大，电流小幅提升对直流金具的影响有限。但是将电流进一步提升到 6250A 时，原有的金具性能已很难满足大电流的要求。因此，额定电流 6250A 特高压直流阀厅金具研制工作的关键技术难点在于通流能力提升后阀厅金具的通流部分尺寸增大，软导线连接导线根数的增加，在整体外形尺寸不改变的情况下，内部结构更加紧凑，安装空间更加狭小。阀厅金具对外针对设备、管母、导线的接口设计，对内针对载流部

分、支撑部分及屏蔽部分的结构设计等均需进行优化。研制工作内容包括结构形式研究、长期额定通流研究、安装、无线电干扰水平研究等。

针对阀厅金具电流提升的关键技术难点（通流及发热），金具在原有设计上进行了有针对性的提升：

(1) 对于发热问题，裕度较小的导线线夹连接部分通过增加导线搭接面积减小本体发热，同时采取增加小夹块数量降低接触面的通流密度等措施（图 1）；

(2) 对于裕度较大的管母线连接部分，核算其实际通流密度，对于通流密度不达标部位进行优化改进；

(3) 对所有设备接口部分实行有效接触面积全覆盖的原则；

(4) 对于内部软导线连接则通过增加软导线的根数（图 2）等方式来提高产品的通流能力。

以上措施可以保证阀厅金具在额定或过负荷工况下运行。

在研制过程中发现，增加软导线根数后，如果软导线的内部连接仍采用原 JL-1120 铝绞线，会造成金具整体刚度过大，复杂角度的软导线焊装难以实现生产制造，实际安装过程中也存在不好进行安装调整的问题，极大的增加了现场安装的难度。亟需研制出一种既能满足通流要求，刚度适中又能调节的导线。经过与导线厂家反复沟通研究，前后共研制出三种导线，再通过对比软导线焊接金具的成品，实际安装工况下的调节能力，导线自身的状态（是否能够改变一定的形状，调节一定角度，且导线本身不出现散股、胀包的情况），最终确定 JLR-1000 导线为大电流工程的专用导线。

2.2 直流场金具技术方案

直流场金具相较于阀厅金具而言，结构简单，体积较小，其设计难点主要在于与之连接的设备众多，金

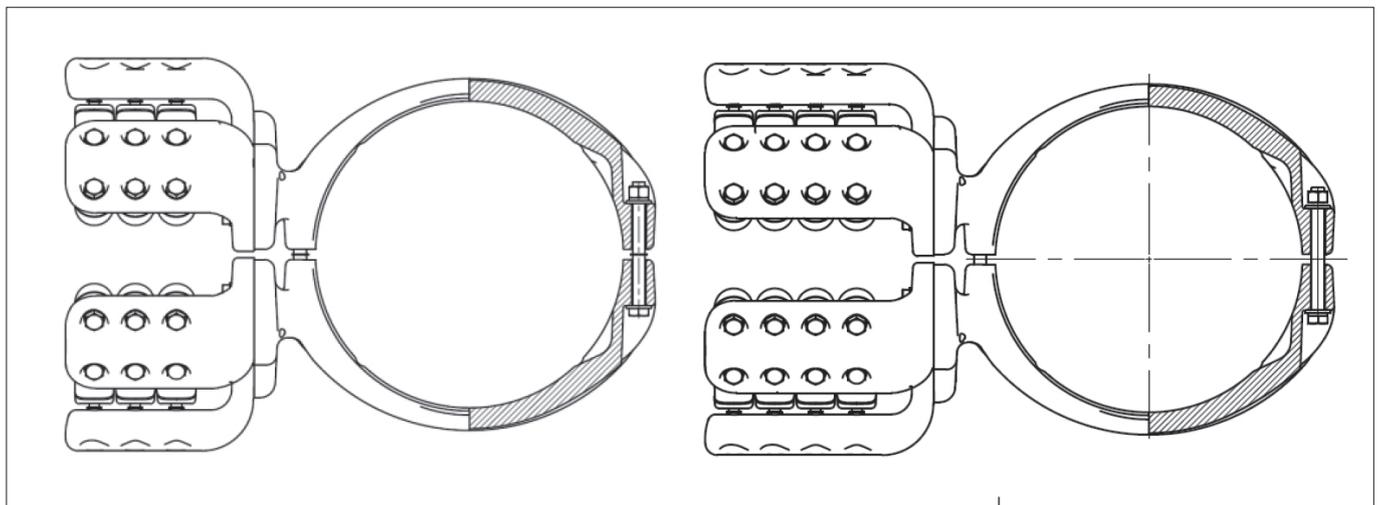


图 1 导线线夹改进示意图

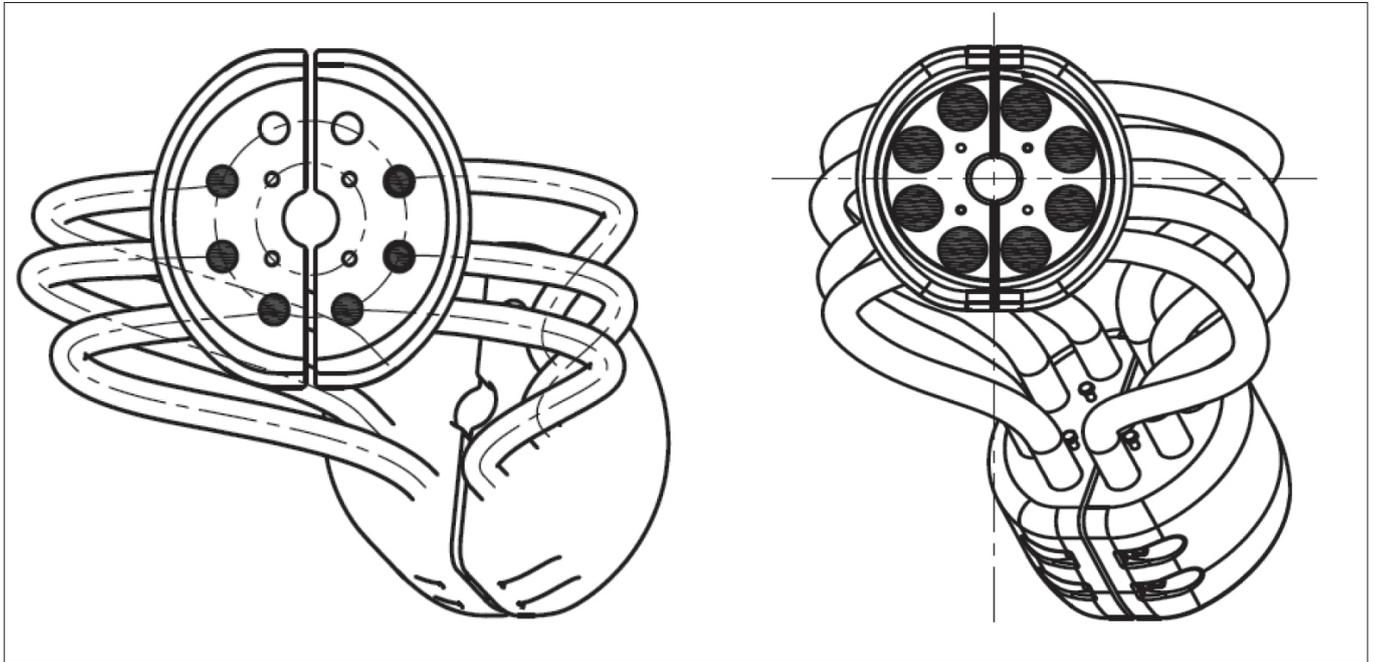


图2 软导线改进示意图

具布置相对繁杂。对于常规换流站而言，直流场金具的整体种类数量约是阀厅金具种类数量的6~7倍。

直流场金具安装在户外，受空间位置约束较小，运行电流的提升对直流场金具的设计影响相对较弱。设计过程中除了要考虑工程直流额定电流外，还要满足招标文件的相关要求。如直流场通流6250A软导线采用六分裂导线，±800kV极母线为6×LGJK-1000（包络圆心直径450mm）导线；±400kV及以下为6×JL-900（包络圆心直径220mm）导线。同时要综合考虑不同区域不同母线直径，不同设备端子，及现场布置方式，最终设计出合理的直流场金具结构方案。

相比较于原5000A直流场金具而言，6250A直流场金具其结构形式没有过大改动，主要体现在结构细节上的调整：

- (1) 修改螺接导线线夹尺寸，满足连接导线的要求；
- (2) 修改螺接导线小夹块数量，满足通流能力的要求；

- (3) 修改端子板接口尺寸，满足通流能力及端子表面全覆盖的要求；

- (4) 修改软连接金具中软导线的规格及数量，满足通流能力的要求；

- (5) 根据现场布置调整节点金具结构设计，满足现场使用需求。

3 6250A 直流金具温升试验

通过优化设计，我国的直流金具设计通流能力均满足6250A工程使用要求。且相应产品均通过了温升试验，主要部位的温升结果见表3，试验结果表明6250A直流金具的通流能力满足技术规范要求。

10000MW直流输电工程系统电流为6250A，在原5000A直流金具的基础上进行了技术攻关，并提出了相应的解决方案。产品的载流能力通过温升试验校核，产品性能满足工程的实际需求。

直流输电系统要求的电流为6250A（额定）/6693A

表3 主要部位温升值

测量部位	温升试验电流 /A	2 小时试验电流 /A	材质及镀层	实测值 /K	温升限值 /K
接线板与卡爪接触面	6250	7500	铝	38.8	65
卡爪	6250	7500	铝	41	65
抱夹与铝棒接触面	6250	7500	铝	42.1	65
铝棒	6250	7500	铝	44.2	65
导电带与抱夹接触面	6250	7500	铝	39.6	65
抱夹与管母接触面	6250	7500	铝	32.2	65
管母	6250	7500	铝	34.1	65
端子板	6250	7500	铝	37.4	65

(2小时),产品设备及温升试验的要求值为6250A(额定)/7500A(2小时),直流金具的设计和温升试验电流均大于技术规范要求值,在设计上留有一定裕度。

4 结语

本文介绍了 $\pm 800\text{kV}/10000\text{MW}$ 工程直流金具的技术参数研究和试验工作。10000MW直流输电工程系统电流为6250A,金具的载流能力需重新进行核算,对不满足要求的金具需进行重新设计研制及温升试验校核。金具的通流及发热是核心技术难题,在以往工程的基础上,本文针对上述问题提出了相应的解决方案:

(1)对于阀厅金具而言,在原有的 $\pm 800\text{kV}/5000\text{A}$ 的设备基础上进行改进设计。主要侧重于金具载流部分的结构调整与优化设计,再结合考虑金具实际节点的运行工况进行支撑部分、屏蔽部分、对外接口部分的设计,

最终完成金具的整体设计方案,并通过试验验证其满足工程要求。

(2)对于直流场金具,由于不太受空间大小及位置的影响,系统电流的提升对这类产品的影响不大,只需根据实际运行工况进行重新设计并通过试验验证即可。

综上所述,直流金具的主要技术难度集中在电流增大后引起的发热问题。本文内容所提及的解决方案足以克服以上技术难题。

参考文献:

- [1]丁永福. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流换流站阀厅金具的结构特点[J].高电电器,2013,49(11):13-18.
[2]张文亮.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.

(上接第27页)

降低了设计风险。基于产品种类及空间受限的关系,采用倍力气缸,可进一步优化压头尺寸,降低成本。

参考文献:

- [1]《机械设计手册》编委会.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,2004.
[2]DS Solid Works公司.SolidWorks Simulation高级教程[M].北京:机械工业出版社,2011.

[3]SMC(中国)有限公司.现代实用气动技术:第2版[M].北京:机械工业出版社,2004.

[4]《机械工程材料性能数据编委会手册》编委会.机械工程材料性能数据手册[M].北京:机械工业出版社,1995.

作者简介:黄殿海(1986.03-),男,汉族,辽宁丹东人,本科,工程师,研究方向:非标自动化。

更正

本刊2022年第12期(4月下旬刊)的论文《电力电缆交流耐压试验分析》,作者赵小宇、满少杰、王兆、佟雷,第三作者姓名应为“王兆熹”。特此更正并向作者致歉!

《中国机械》杂志社编辑部