

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.025

## ±800 kV 柔性直流换流阀塔均压优化设计

姚宏洋<sup>1</sup>, 文卫兵<sup>2</sup>, 谢晔源<sup>1</sup>, 杨勇<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:**柔性直流输电工程已迈入特高压时代, 现有柔性直流换流阀(VSC 阀)的均压屏蔽设计已无法满足特高压应用场合。为解决±800 kV VSC 阀塔顶部均压管母表面电场强度过大的问题, 文中首先利用 PTC Creo 与 ANSYS 联合建模技术完成复杂阀塔结构的三维建模与静电场有限元仿真, 通过增加与顶部均压管母等电位连接的顶部屏蔽板, 有效降低阀塔顶部均压管母及子模块的表面电场强度。然后, 提取顶部屏蔽板增加前后的阀塔对地寄生电容参数, 分析顶部屏蔽板对操作冲击下模块电压分布的影响。最后, 研究阀塔不同均压部件间距对最大电场强度分布的影响, 完成±800 kV VSC 阀塔均压优化设计, 并在阀塔样机上进行冲击电压试验。文中所提优化措施提升了 VSC 阀在特高压应用场合的安全运行能力, 为 VSC 阀在特高压柔性直流输电工程的应用及设计提供借鉴。

**关键词:**柔性直流换流阀(VSC 阀); 有限元; 电场分布; 寄生电容; 阀塔均压

**中图分类号:** TM761

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2021)02-0178-07

### 0 引言

基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的柔性直流输电技术可实现有功、无功的解耦控制, 满足向无源孤岛电力系统供电的需求, 适用于异步联网、新能源并网消纳、远距离直流输电等应用场景<sup>[1-5]</sup>。随着功率器件技术水平与输送电压等级、容量的不断提高, 柔性直流输电技术经历了早期两电平拓扑向模块化多电平拓扑的转变。1997年首个采用两电平拓扑的柔性直流输电工业试验工程(±10 kV/3 MW)在瑞典赫尔斯杨投运; 2019年10月, 基于模块化多电平拓扑的渝鄂背靠背工程(±420 kV/1 250 MW)投运; 2020年6月, 采用±500 kV/3 000 MW 柔性直流换流阀(VSC 阀)的张北±500 kV 柔性直流试验示范工程顺利投运。

电压等级的不断攀升, 对换流阀均压屏蔽提出了更高要求, 例如乌东德电站送电广东广西特高压多端直流示范工程(简称昆柳龙直流工程)对 VSC 阀的操作冲击电压要求已达到 1 600 kV。基于模块化多电平技术的 VSC 阀塔均压设计一定程度上借鉴了常规直流换流阀(line commutated converter, LCC)外均压措施<sup>[6-11]</sup>, 但由于起步时间较晚, 鲜有相关文献报道。文献[12]基于 ANSYS 详细计算了阀塔在绝缘型式试验下的表面电场分布; 文献[13]基于 Solidworks 与 ANSYS 联合建模完成了 VSC 阀

交流电场分布的仿真分析, 对比研究了有、无水路对阀塔金具表面电场分布的影响; 文献[14]研究了 VSC 阀串联绝缘子电压分配不均的问题, 提出了采用支撑绝缘子法兰与水路等电位连接的电压均衡方法; 文献[15]采用 ElecNet 电场仿真软件分析了绝缘试验电压下功率模块内部电场的分布特性; 文献[16]针对±500 kV VSC 阀塔, 分析了绝缘试验下的阀塔电场分布情况, 并针对电场强度较高部分采取了增加均压环管径的方法。

文中针对±800 kV VSC 阀塔, 采用结构建模软件 PTC Creo 与电磁场仿真软件 ANSYS 进行阀塔三维建模与有限元仿真计算。为降低顶部均压管母表面电场强度, 以增加顶部屏蔽板的方式实现阀塔顶部表面电场分布的优化, 并分析采用该措施对阀塔其他电气参数的影响。进一步地, 研究阀塔外均压系统中不同均压部件间距对最大电场强度分布的影响, 提出最优距离布置方案。基于上述优化设计完成了±800 kV VSC 阀塔样机研制, 阀塔样机冲击电压试验过程中无击穿与闪络, 验证了所提设计方案的可行性。

### 1 ±800 kV VSC 阀塔结构与建模

ANSYS 内置建模工具适用于常规三维对象建模, VSC 阀塔存在零部件结构复杂等特点, 采用内置建模工具较为耗时。PTC Creo 作为专业的三维建模软件, 借助强大、自适应的三维参数化建模技术, 可准确、快速地建立 VSC 阀塔三维模型, 便于后期优化设计过程中模型的快速调整。通过 PTC

收稿日期: 2020-09-12; 修回日期: 2020-10-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB09031-00); 国家电网有限公司科技项目(5200-201956058A-0-0-00)

Creo 与 ANSYS 联合建模,还可极大提升迭代优化设计效率,具体设计流程如图 1 所示。

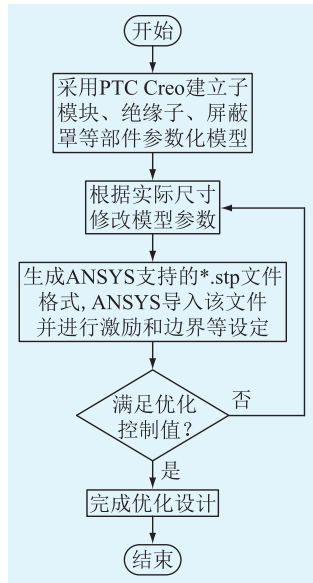


图 1 基于 PTC Creo 建模的 ANSYS 迭代优化设计

Fig.1 The ANSYS iterative optimization design based on PTC Creo modeling

文中研究的 VSC 阀采用户内支撑式、双列背靠背布置的塔式结构,主要部件有阀基及层间支撑绝缘子、子模块与支撑框架组成的阀段、连接铜排、均压部件等。各个部件结构复杂,需要对非关键部位的结构细节进行简化,提高有限元剖分成功率,降低计算耗时。因此,可忽略阀塔内部斜拉绝缘子、连接螺栓、阀基绝缘子伞裙及绝缘横梁等部件,简化子模块结构、屏蔽环/管/板与框架的连接结构等。简化后的 VSC 阀塔三维有限元模型见图 2。

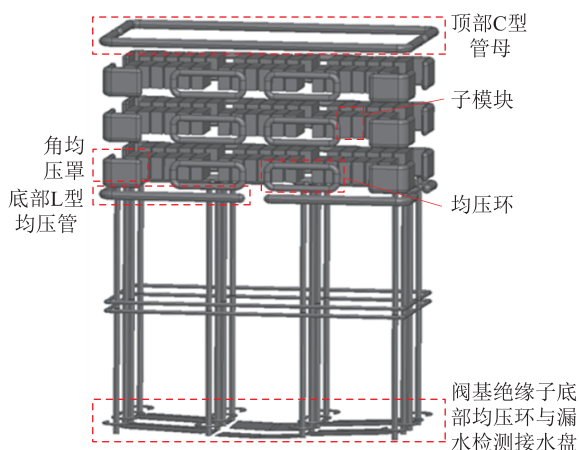


图 2 阀塔三维有限元模型

Fig.2 The three-dimensional finite element model of valve tower

随着柔性直流输电工程电压等级越来越高, VSC 阀塔的均压屏蔽措施直接关系整个换流系统在正常运行及各种冲击工况下的稳定运行能力。

国际电工委员会标准 IEC 62501—2014 规定了 VSC 阀需要进行的直流耐压、交流耐压、操作冲击和雷电冲击等试验<sup>[17]</sup>。考虑试验电压大小及试验波形情况,通常采用操作冲击电压作为激励校核换流阀的外均压设计。VSC 阀的子模块电容值通常为 mF 级,试验系统存在容量限制,在子模块电容串入试验回路时无法施加满足标准要求的冲击电压波形,因此试验时通常将所有子模块与均压管/环短接。

室内金具起晕电场强度一般限值为 3 kV/mm,考虑一定裕度,文中设计的±800 kV VSC 阀塔均压系统在操作冲击试验条件下的阀塔表面电场强度控制在 2.5 kV/mm 以内。

## 2 阀塔表面电场强度分布优化

在进行 VSC 阀塔外均压系统仿真时,由于施加的电压激励和阀塔结构呈中心对称,满足对称边界条件,可利用 1/2 或 1/4 对称模型进行求解计算<sup>[18—20]</sup>。由于仿真服务器性能足够,且考虑模型展现的完整性,文中采用完整模型进行仿真计算。实际阀厅尺寸的±800 kV VSC 阀塔初步设计方案三维有限元求解域如图 3 所示,采用长方体空气求解域模拟实际阀厅,阀塔到求解域侧面及顶面的距离与阀塔在实际阀厅中的几何位置一致。

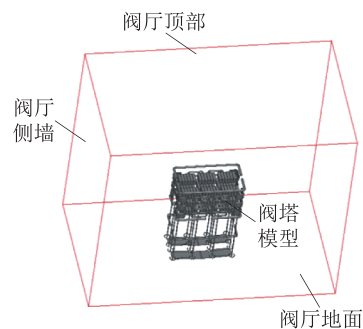


图 3 计及阀厅尺寸的阀塔模型求解域

Fig.3 Solution domain of valve tower model considering valve hall size

根据标准 IEC 62501—2014 对 VSC 阀冲击试验方法的规定,文中针对初步设计阀塔方案的底部 L 型与顶部 C 型管母、角均压罩、均压环及所有子模块施加幅值为 1 600 kV 的电压激励,针对阀塔支撑绝缘子底部均压环、漏水检测接水盘及求解域 6 个面施加地电位,完成阀塔的三维静电场有限元仿真,阀塔表面电场强度分布如图 4 所示。

图 4 中,初始设计方案的阀塔表面电场强度较大区域主要位于顶部 C 型和底部 L 型均压管的拐角处,阀塔顶部空间主要借助 2 个 C 型通流管母进行均压,其中顶部 C 型通流管母的拐角处电场强度

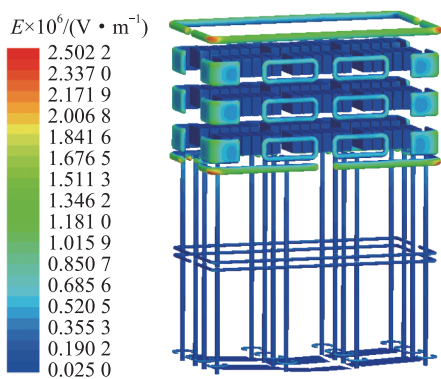


图4 阀塔表面电场强度分布

Fig.4 Electric field distribution on the valve tower surface 已达到 2.49 kV/mm(接近设计控制值 2.5 kV/mm)。降低该处电场强度最简易的方案为直接增加管母直径(即增大曲率)。现有设计方案中 C 型管母的尺寸已接近极限,若要继续增加其直径势必增加其尺寸与重量。此外,考虑阀塔顶部面积较大,可在原来 2 个 C 型通流均压管母基础上再增加独立支撑的 4 块与 C 型管母等电位连接的铝制顶屏蔽板,降低 C 型管母拐角处的最大电场强度,为内部子模块及顶部裸露金属连接件提供更全面的防护。

通过对比仿真分析顶部金属屏蔽板增加前后阀塔顶部及内部子模块表面电场分布的改善情况。增加顶部屏蔽板前、后的阀塔顶部表面电场分布分别如图 5(a)、图 5(b)所示。

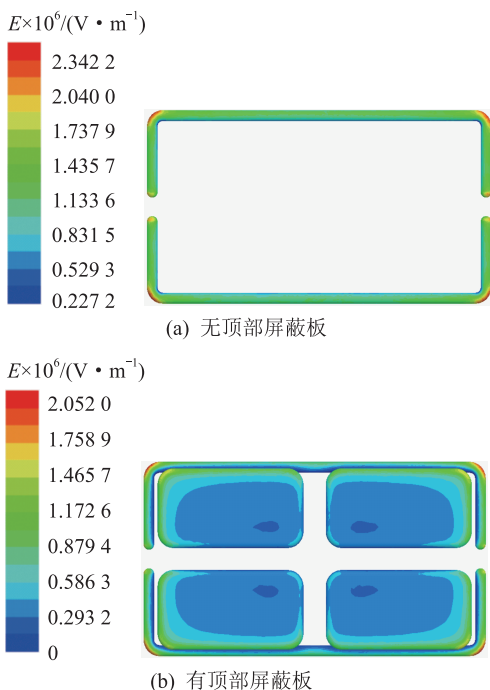


图5 有无顶部屏蔽板时的顶部管母电场分布  
Fig.5 Electric field distribution of top bus tube with or without top shield

对比可知,增加顶部屏蔽板前,C 型均压管母表面最大电场强度位于拐角处(2.49 kV/mm);增加顶部屏蔽板后,C 型均压管母表面最大电场强度降低至 2.20 kV/mm。

增加顶部屏蔽板前、后对应的顶层子模块表面电场分布分别如图 6(a)、图 6(b)所示。大部分区域的电场强度在增加顶部屏蔽板后降低了一个数量级。可见,增加顶部屏蔽板可有效改善阀塔顶部的电场分布。

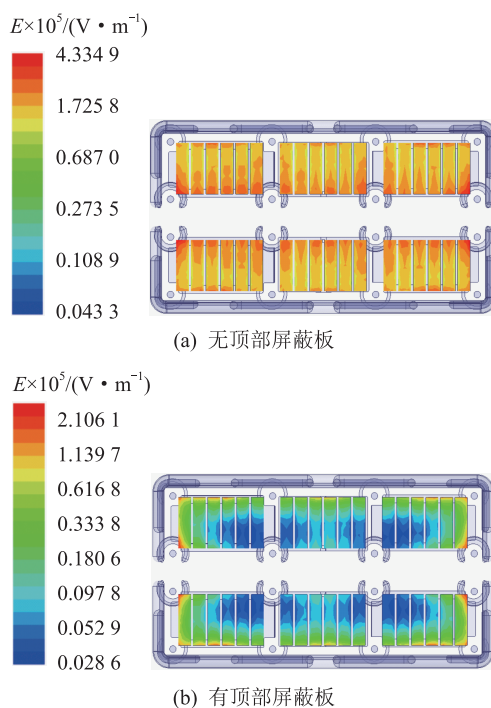


图6 有无顶部屏蔽板时的内部子模块电场强度分布  
Fig.6 Electric field distribution of internal sub module with or without top shield

阀塔外均压系统对地寄生电容分布情况如图 7 所示。

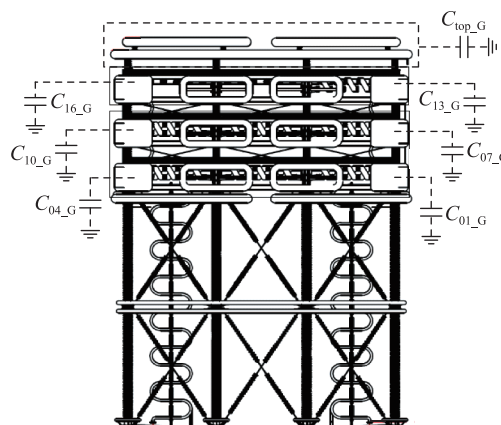


图7 阀塔对地寄生电容分布  
Fig.7 Distribution of parasitic capacitance to ground for valve tower

通过 ANSYS 计算各个部件间储存的静电能量,得到准确的寄生电容矩阵,如表 1 所示。由表 1 可知,顶部屏蔽板增加前后对其他均压管/环的对地寄生电容参数影响较小,仅顶部  $C_{top\_G}$  由 203.55 pF 增加至 284.32 pF。操作冲击下的阀塔等效电路如图 8 所示,基于 ATP-EMTP 搭建顶部屏蔽板增加前后的阀塔等效模型,仿真结果如图 9 所示。结果表明,子模块端口电压分布受  $C_{top\_G}$  容值变化的影响并不明显。

表 1 有无顶部屏蔽板时的对地寄生电容对比  
Table 1 Comparison of parasitic capacitance to ground with or without top shield pF

编号	对地电容	
	无顶部屏蔽板	有顶部屏蔽板
$C_{top\_G}$	203.55	284.32
$C_{18\_G}$	9.077	8.22
$C_{17\_G}$	9.07	8.22
$C_{16\_G}$	32.39	30.57
$C_{15\_G}$	9.07	8.22
$C_{14\_G}$	9.07	8.22
$C_{13\_G}$	31.41	30.26
$C_{12\_G}$	8.17	7.99
$C_{11\_G}$	8.16	7.99
$C_{10\_G}$	30.44	29.93
$C_{09\_G}$	8.17	7.99
$C_{08\_G}$	8.16	7.99
$C_{07\_G}$	29.72	29.36
$C_{06\_G}$	40.58	40.38
$C_{05\_G}$	40.57	40.38
$C_{04\_G}$	29.01	28.78
$C_{03\_G}$	40.58	40.38
$C_{02\_G}$	40.58	40.38
$C_{01\_G}$	14.50	14.39

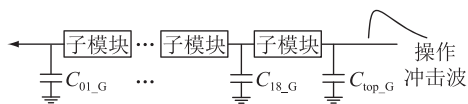


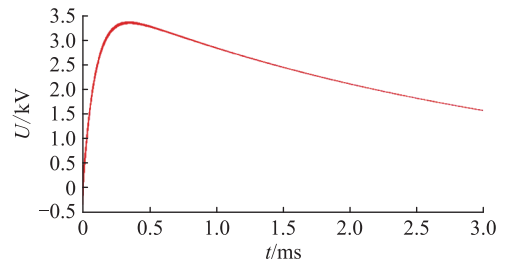
图 8 操作冲击下的阀塔等效电路

Fig.8 Equivalent circuit of valve tower under operating impulse

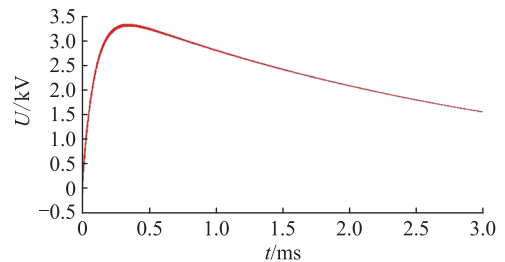
### 3 不同均压部件距离对最大电场强度的影响

LCC 阀与 VSC 阀最大场强处示意如图 10 所示。LCC 阀塔均压系统场强最大值位于侧面避雷器 C 型均压环外侧, VSC 阀塔场强最大值位于底部 L 型均压管拐角处。

800 kV 等级的 VSC 阀塔和 LCC 阀塔对地距离、冲击试验电压、最大场强及对应管径如表 2 所示。



(a)  $C_{top\_G}=203.55$  pF



(b)  $C_{top\_G}=284.33$  pF

图 9 操作冲击下的子模块端口电压  
Fig.9 The port voltage of sub module under operating impulse

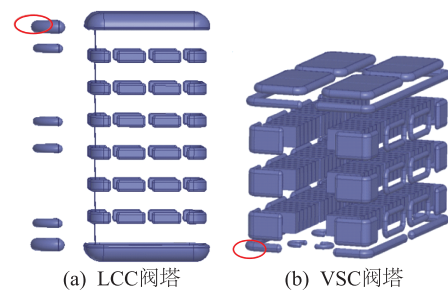


图 10 LCC 阀塔与 VSC 阀塔最大场强处示意

Fig.10 Schematic diagram of maximum field strength for LCC valve tower and VSC valve tower

表 2 VSC 阀塔与 LCC 阀塔对比

Table 2 Comparison between VSC valve tower and LCC valve tower

参数	VSC 阀塔	LCC 阀塔
对地距离/m	9.5	11
操作冲击电压/kV	1 600	1 800
操作冲击下最大电场强度/( $kV \cdot mm^{-1}$ )	2.41	2.40
场强最大处的管径/mm	350	450

相较于 LCC 阀塔电场强度最大的避雷器 C 型均压环, VSC 阀塔场强最大的 L 型均压管管径与曲率均较小, 实际电场分布与对地距离、本电极形状及曲率大小、与附近电极间的距离等多个因素相关。相较于 LCC 阀塔避雷器 C 型均压环凸出在外、距离主体阀均压系统较远, VSC 阀塔底部 L 型均压管则与上层角均压罩、均压环等距离较近且整体布置较为紧凑。

为进一步验证上述分析, 对比仿真验证了底部 L 型均压管相对角均压罩不同水平距离时的表面最

大电场强度分布情况,仿真结果如表3所示。结果表明,最大场强随着距离增大而增加,故在保证L型均压管与角均压罩最小空气绝缘净距的基础上,应尽量缩减两者间的距离。

表3 均压部件间不同距离对应的最大电场强度

Table 3 The maximum electric field intensity corresponding to different distances among equalizing parts

距离/mm	最大电场强度/(kV·mm <sup>-1</sup> )
0	2.31
150	2.39
300	2.45
450	2.67

### 4 ±800 kV VSC 阀塔冲击试验

阀对地冲击试验包括操作冲击试验与雷电冲击试验,可用于校验换流阀绝缘设计的合理性,要求在施加规定的冲击电压时不能出现击穿或闪络,且无破坏性放电。

根据设计要求,±800 kV VSC 阀塔对地应能承受 250/2 500 μs(波前时间/半峰值时间)、1 600 kV 正负极性各 3 次的操作冲击电压和 1/50 μs(波前时间/半峰值时间)、1 950 kV 正负极性各 3 次的雷电冲击电压。按照最终设计方案,在高压试验大厅搭建完整的 ±800 kV VSC 阀塔,根据标准 IEC 62501—2014 的试验方法,将同塔所有功率模块短接,冷却管道充满介质,阀顶部管母连接至冲击电压发生器,冲击试验接线原理与试验大厅如图 11 所示。其中,R<sub>1</sub>,R<sub>2</sub>分别为波头、波尾电阻;C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>分别为冲击、负荷电容。

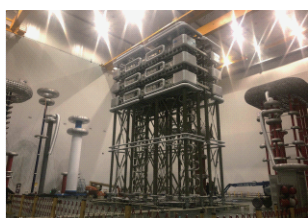
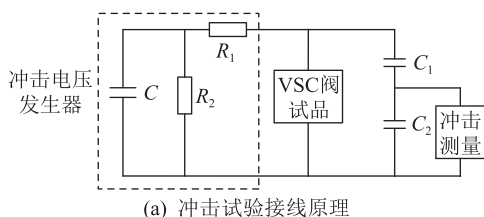


图 11 阀塔冲击试验接线与试验阀厅现场

Fig.11 Test wiring of valve tower and test valve hall

在阀与地之间施加前述操作冲击电压与雷电冲击电压,阀-地的操作和雷电冲击电压波形分别如

图 12(a)、图 12(b)所示。试验过程中无击穿与闪络现象,施加的冲击电压波形满足标准 IEC 60060—2010 的要求。试验结果表明,所设计的 ±800 kV VSC 阀塔均压绝缘设计合理。

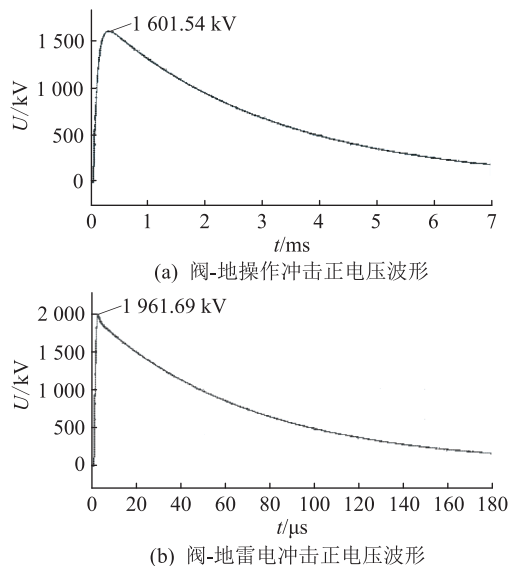


图 12 阀塔冲击试验电压波形

Fig.12 Voltage waveforms of impulse test for valve tower

### 5 结语

文中针对±800 kV VSC 阀塔均压措施开展优化设计,基于 PTC Creo 与 ANSYS 联合建模完成了阀塔的三维有限元仿真,针对顶部区域的均压薄弱点,通过增加与顶部均压管母等电位连接的顶部屏蔽板,实现了顶部电场分布优化,极大地降低了顶层子模块与均压管母的电场分布。进一步地,提取了顶部屏蔽板增加前后的阀塔对地寄生电容参数,分析了顶部屏蔽板的增加对操作冲击下模块端口电压分布的影响。最后,研究了底部 L 型均压管与均压罩间距对其最大电场强度的影响,得出的结论为:在保证空气绝缘净距的基础上,均压管与均压罩间距越小,最大电场强度则越小。通过以上优化措施,实现了 ±800 kV VSC 阀塔均压的优化设计,阀塔样机在高压试验大厅通过了阀-地冲击电压试验。提出的优化措施有效降低了 ±800 kV VSC 阀在操作冲击电压条件下的最大电场强度,改善了阀塔整体的场强分布,进一步提升了 VSC 阀在特高压应用场景下的安全运行能力。

#### 参考文献:

[1] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):53-58.  
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Elec-

- tric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [2] 乔卫东, 毛颖科. 上海柔性直流输电示范工程综述[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1137-1140.  
QIAO Weidong, MAO Yingke. Overview of Shanghai flexible HVDC transmission demonstration project[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1137-1140.
- [3] 喻松涛, 李巍巍, 许树楷, 等. 一种改进的柔性直流功率变换单元和 MMC 阀段对冲试验方法[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 65-72.  
YU Songtao, LI Weiwei, XU Shukai, et al. An improved back to back power test method for flexible DC converter modules and MMC valve sections[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 65-72.
- [4] 路建良, 关兆亮, 王新颖, 等. 高压大容量柔性直流输电阀基控制设备及其动态模拟试验研究[J]. 广东电力, 2020, 30(5): 105-116.  
LU Jianliang, GUAN Zhaoliang, WANG Xinying, et al. Research on valve-base control equipment of high voltage and large capacity VSC-HVDC and its dynamic simulation[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(5): 105-116.
- [5] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
XU Zheng, TU Qingrui, GUAN Minyuan. VSC-HVDC transmission system [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [6] 刘泽洪, 郭贤珊, 乐波, 等. ±1 100 kV/12 000 MW 特高压直流输电工程成套设计研究[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1023-1031.  
LIU Zehong, GUO Xianshan, YUE Bo, et al. System design of ±1 100 kV/12 000 MW UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1023-1031.
- [7] 张翔, 孙健, 张子敬, 等. ±1 100 kV 换流阀屏蔽罩结构改进及  $U_{50}$  试验[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3693-3699.  
ZHANG Xiang, SUN Jian, ZHANG Zijing, et al. Structure optimization of shield of ±1 100 kV converter valve and  $U_{50}$  test[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3693-3699.
- [8] 卞星明, 张福增, 王黎明, 等. 1 000 kV 交流复合绝缘子均压环参数设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 980-986.  
BIAN Xingming, ZHANG Fuzeng, WANG Liming, et al. Design of grading rings for 1 000 kV AC composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 980-986.
- [9] 姬大潜, 刘泽洪, 邓桃, 等. 特高压直流输电系统稳态运行时高端阀厅内部的电场分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3000-3008.  
JI Daqian, LIU Zehong, DENG Tao, et al. Analysis of overall electric field in high-voltage valve hall end on steady state of UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3000-3008.
- [10] 金硕, 甘艳, 阮江军, 等. 特高压直流输电系统阀厅金具表面电场精细求解[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1299-1305.  
JIN Shuo, GAN Yan, RUAN Jiangjun, et al. Accurate calculation method of electric field on the surface of converter valve fittings in UHVDC system [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1299-1305.
- [11] 张福轩, 陈东, 余军, 等. ±1 100 kV 户内直流场全域均压电极设计、仿真及优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5873-5880.  
ZHANG Fuxuan, CHEN Dong, YU Jun, et al. 3D simulation and optimization design of the electrode system of ±1 100 kV indoor DC yard[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5873-5880.
- [12] 张栋, 欧阳有鹏, 尚慧玉, 等. 电压源型换流阀在绝缘型式试验下电场仿真计算[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 76-81.  
ZHANG Dong, OUYANG Youpeng, SHANG Huiyu, et al. Electric field simulation and calculation of voltage sourced converter valve in insulation type test[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 76-81.
- [13] 齐磊, 李超, 王星星, 等. 柔性高压直流输电系统换流阀塔交流电场仿真计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3537-3543.  
QI Lei, LI Chao, WANG Xingxing, et al. Simulation calculation of AC electric field for valve tower of flexible HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3537-3543.
- [14] 李静怡, 沈弘, 刘珂鑫, 等. 柔性直流换流阀串联支撑绝缘子电压分配均衡方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(21): 5128-5135.  
LI Jingyi, SHEN Hong, LIU Kexin, et al. Improving the voltage distribution of the insulator string of flexible HVDC converter valve [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 5128-5135.
- [15] 杨晓平, 张艳梅, 赵朝伟. 柔性直流换流阀功率模块绝缘试验下的电场仿真分析[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 63-70.  
YANG Xiaoping, ZHANG Yanmei, ZHAO Chaowei. Electric field simulation under the insulation test for flexible HVDC converter valve power module [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 63-70.
- [16] 范彩云, 胡秋玲, 陶颖军, 等. ±500 kV 柔性直流换流阀电场分布及绝缘特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 183-189, 197.  
FAN Caiyun, HU Qiuling, TAO Yingjun, et al. Research of electric field distribution and insulation properties for ±500 kV VSC-HVDC converter valve [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 183-189, 197.
- [17] International Electrotechnical Commission. Voltage sourced converter (VSC) valves for highvoltage direct current (HVDC) power transmission-electrical testing; IEC 62501—2014 [S]. Switzerland: IEC Central Office, 2014: 8.
- [18] 张军, 吴金龙, 梁云丹, 等. 基于有限元的模块化多电平换流器绝缘结构分析[J]. 电力建设, 2014, 35(3): 31-35.  
ZHANG Jun, WU Jinlong, LIANG Yundan, et al. Finite element analysis on insulation structure of modular multi-level converter [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(3): 31-35.

- [19] JIN Jianming. The finite element method in electromagnetics [J]. Journal of the Japan Society of Applied Electro-magnetics, 2014(1):39-40.
- [20] 王栋,阮江军,杜志叶,等. 直流换流站阀厅内部场域电位和电场强度子模型法数值求解[J]. 电网技术, 2011, 35(9):158-163.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Numerical solution of potential and electric field intensity in field domain of valve hall of DC converter station by sub-model method [J]. Power System Technology, 2011, 35(9):158-163.

作者简介:



姚宏洋

姚宏洋(1988),男,博士,工程师,从事柔性直流输电系统电磁场仿真工作(E-mail: yaohy@nrec.com);

文卫兵(1965),男,硕士,教授级高级工程师,从事输变电工程设计咨询工作;

谢晔源(1978),男,硕士,教授级高级工程师,从事电力电子在电力系统中的应用工作。

## Optimization design of electric field distribution for $\pm 800$ kV VSC valve

YAO Hongyang<sup>1</sup>, WEN Weibing<sup>2</sup>, XIE Yeyuan<sup>1</sup>, YANG Yong<sup>2</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** The voltage source converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) project has entered the era of ultra-high voltage (UHV). Electric field equalizing design of the existing VSC valve cannot meet the requirement of UHV. In order to reduce the electric field density of the top tubular busbar of  $\pm 800$  kV VSC valve, the modeling technologies of PTC Creo and ANSYS are applied for the three-dimension complex valve tower modeling to analyze electrostatic field finite elements. By adding a top shield plate equalizing connected with the top tubular busbar, the peak electric field densities of the top sub-modules and tubular busbar are reduced obviously. The parasitic capacitance parameters of the valve tower are extracted. The influence of the top shield plate on the voltage distribution of sub-modules under the switching impulse is analyzed. The influence of distance among electric field equalizing parts on the distribution of peak electric field is studied. The optimal electric field equalizing design of  $\pm 800$  kV VSC valve is obtained, and the experiment of impulse voltage on valve tower prototype is tested. The proposed optimization measurement improves the stable operation of VSC valve in UHV application, and provides a design reference for the application of VSC valve in subsequent UHV VSC-HVDC projects.

**Keywords:** voltage source converter (VSC) valve; finite element analysis; electric field distribution; parasitic capacitance; electric field distribution of valve tower

(编辑 吴楠)