

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.04.022

# 基于有限元法的换流阀水路系统电场分析

吕茵<sup>1</sup>, 王慧泉<sup>1</sup>, 周文青<sup>2</sup>, 梁伟炜<sup>2</sup>, 胡传良<sup>2</sup>, 刘刚<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广东 广州 510507;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**在高压直流输电工程中,换流站阀塔内冷水系统会出现漏水故障,严重影响特高压直流输电的稳定性。针对该类漏水故障问题,从阀塔内冷水回路场强因素考虑,采用有限元仿真和实验的方法,搭建了仿真所需的阀塔内冷水回路三维模型和水路局部模型,根据阀塔运行条件对内冷水系统作了电场仿真分析,同时设计了验证实验进行探究。仿真结果表明,内冷水系统回路的冷却水管表面场强部分大于空气击穿场强,等电位线会影响冷却水管周围电场。实验验证在一定条件下等电位线与冷却水管间会有明显放电现象,研究内容为阀塔漏水事故原因分析提供了参考依据。

**关键词:**阀冷却系统;均压电极;电场分布;有限元分析

中图分类号:TM723

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)04-0145-07

## 0 引言

阀冷系统是保障换流阀运行的重要系统之一,阀塔内冷水系统发生漏水故障会给换流阀安全运行带来极大隐患<sup>[1-6]</sup>。以云广直流输电工程穗东换流站2015年发生的阀塔S型冷却水管均压电极线附近损伤漏水停运事故作为研究对象展开分析,经事后检查发现均压电极线紧靠冷却水管,聚氯乙烯(PVC)绝缘层包被的均压电极线无损伤<sup>[7]</sup>。

由于冷却回路空间布置与电场分布的复杂性,漏水事故原因分析应考虑存在水路时电场的影响。文献[8-11]主要研究了由均压电极腐蚀导致的漏水事故,通过电化学原理分析了腐蚀过程,但未涉及除均压电极外其他位置发生相关事故的分析;文献[12]综合介绍了水冷系统发生故障时的保护系统配置及动作原理,未对故障原因进行分析;文献[13]对水冷系统各支路流量分布进行了仿真和试验分析,但未考虑漏水情况时的结果;文献[14-16]主要进行了换流阀全域方面的电场有限元仿真工作,通过仿真研究了换流阀的绝缘特性,但未考虑水路影响;文献[17-19]讨论了有无水路下的仿真对比结果,但其水路模型较为粗糙,没有考虑均压电极在水路中均压作用的影响,而且缺少局部细致模型分析。总的来说,现有文献大多对单一冷却系统或单一的电场仿真作分析,建模及分析过程中

没有对两者耦合结果进行详细研究,亦没有对除均压电极部位外漏水事故的相关分析。

为综合分析阀塔内冷水回路的电场分布,探究冷却水管漏水与电场影响的内在联系,基于有限元仿真软件COMSOL Multiphysics搭建了含均压电极的内冷水回路三维阀塔模型,首先通过换流阀换流过程的运行状态确定仿真的边界条件,得到阀塔全域下的电场仿真结果;其次为进一步分析等电位线对电场的影响,构建了受损水管局部模型进行场强分析;最后通过设计验证实验观察等电位线与冷却水管在不同施加电压下的实验结果,结合仿真与实验结果分析了冷却水管损伤与场强之间的关系。

## 1 内冷水回路建模

### 1.1 冷却水管及均压电极位置分布

换流阀内冷水回路中在不同位置安装了不同数量的均压电极,同时均压电极与内冷水直接连接,因此水回路的整体电位分布也受均压电极安装位置影响。均压电极的主要作用是维持阀段之间电势相等,避免在水路出现电压差<sup>[10]</sup>。在穗东换流站中,每座阀塔内冷水系统的冷却水管中共有52处安装均压电极,具体安装位置描述如下:阀塔顶部S形进出水管处,每座阀塔4个;阀塔第一层进出水管处,每座阀塔4个;各层(共四层)阀模块连接管处,每座阀塔8个;各层(共四层)阀模块的进出水汇流管处,每座阀塔32个;阀塔底部端管处,每座阀塔2个;阀塔第二层与第三层阀模块间S形冷却水管处的均压电极由一个半球形均压罩覆盖,每座阀塔2个,以上总共52个均压电极。

收稿日期:2019-02-24;修回日期:2019-03-29

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050201);中国南方电网有限责任公司超高压广州局科技项目(CG YKJXM00000015)

图1中,左图黑点位置代表均压电极在阀塔内的安装位置,大致分布在每个阀段端部,起到均衡电位作用;右图为均压电极在冷却水管主管中的安置示意图。由于与主管水路连接的均压电极在结构分布上的对称性,图中将均压电极标记为8对。

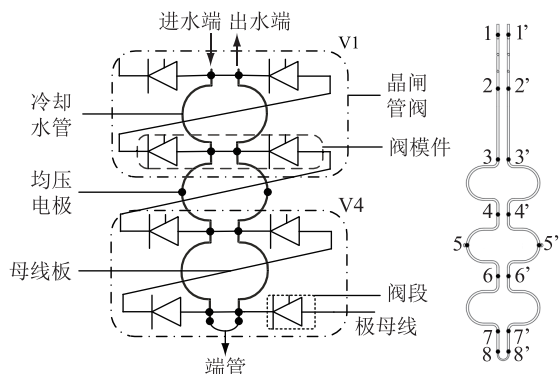


图1 阀塔均压电极位置分布

Fig.1 Placements of grading electrodes in the valve tower

## 1.2 基于 COMSOL Multiphysics 的内冷水回路建模

COMSOL Multiphysics 是一款多系统平台的有限元仿真软件,其仿真支持的几何模型维度涵盖了零维到三维,自身带有强大的几何建模功能。与使用第三方建模软件相比,直接基于 COMSOL Multiphysics 对冷却水管建模有以下优势:(1) 兼容性强。导入外部几何模型还需考虑模型尺寸的兼容性,设置容差以消除影响,如果直接在 COMSOL Multiphysics 建立参数化模型就不存在兼容性问题。(2) 模型修改便利。有限元仿真的几何模型一般是参数化建模,在 COMSOL Multiphysics 中对这些尺寸参数以变量形式存储,如果参数发生变动可以通过修改变量值来进行改动,相比从第三方建模软件导入模型,模型修改更加便利。

基于 COMSOL Multiphysics 建模的有限元分析流程如图2所示。构建后的换流阀冷却模型如图3所示,模型包括一个完整的内冷水回路(图3中深绿色部分,由偏聚氟乙烯(PVDF)材质冷却水管以及去离子水冷却介质构成,管壁外径 62.15 mm,内径 55.70 mm)以及周围主要元器件,整个模型长约 6 000 mm,宽约 4 000 mm,高约 10 680 mm。

### 1.3 阀塔模型简化策略

由于整个包含水路的换流阀三维模型规模较大,为保证有限元模型能被有效计算,图3所示模型已经经过简化处理,主要从下面3个方面进行介绍。

#### 1.3.1 简化母线板、电抗器、阀模块等几何形状

冷却回路通过等电位线连接母线板、阀模块等

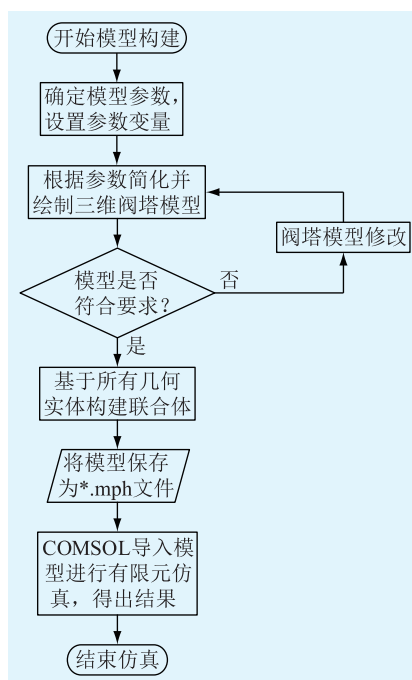


图2 COMSOL Multiphysics 建模流程

Fig.2 Process of modeling using COMSOL Multiphysics

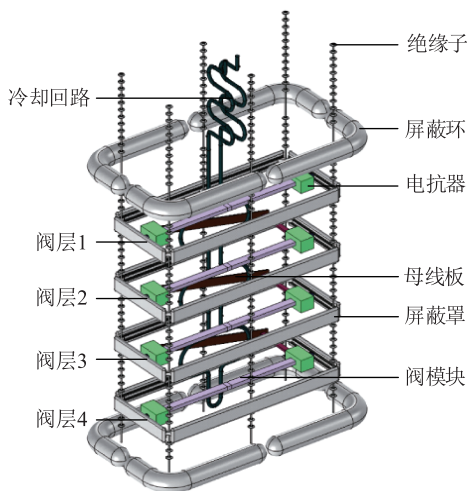


图3 三维仿真模型结构

Fig.3 Structure of 3D simulation model

部位,金属体在设置边界条件的时候可以通过三维域设置,为此简化了相关元件的几何形状,同时模型在处理屏蔽罩、屏蔽环时采用了圆角处理<sup>[19-20]</sup>。

#### 1.3.2 简化均压电极形状

相比于整个冷却回路,均压电极部分尺寸太小而且形状不均匀,在网格增长速率一定的情况下,对模型划分网格时其网格质量会严重下降甚至导致划分网格失败,为此对均压电极的简化做法是以规则圆柱体替代原始电极形状。

#### 1.3.3 合并部分均压电极

整座阀塔共有 52 个均压电极,这些电极安装位

置大多相近,图4展示了汇流管处均压电极的实际安装情形(红框处为电极安装位置),可以看出2条等电位线连接到同一个端子,为此根模型中简化为对称分布的8对电极。图3中每个阀层的阀模块之间都单独设置了域,可以同均压电极设置相同的狄利克雷边界条件,以此简化实际中通过等电位线连接的方式。

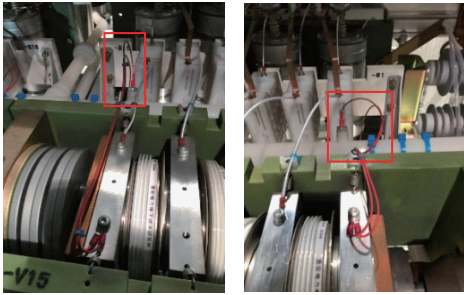


图4 汇流管均压电极安装位置

Fig.4 Installation location of grading electrodes connected with manifold in the thyristor module

## 2 仿真计算方法及模型参数设定

### 2.1 仿真计算方法

为了研究阀塔冷却水管的整体电势分布,所用仿真模型采用静电场模型,求解变量为电势 $V$ ,其数学模型遵从电介质中麦克斯韦方程:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V - \mathbf{P}) = \rho \quad (1)$$

式中: $\mathbf{P}$ 为电极化强度; $\varepsilon$ 为材料介电常数; $\rho$ 为控件电荷密度; $\nabla$ 为微分算子,定义为:

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2)$$

有限单元法将求解的模型划分为众多离散单元,对于三维物理场问题,需要求解的是求解变量与空间三个维度组成的偏微分方程,COMSOL Multiphysics将求解偏微分问题转化为求解高阶代数方程组问题,因此在COMSOL Multiphysics求解器中可以设置不同的求解算法以适应不同的计算模型。同时在仿真实践中可以发现,如果仿真模型不理想或者仿真边界条件、材料参数等设置有误,导致求解的方程组系数矩阵奇异,仿真过程的误差收敛曲线会震荡不收敛,因此可以根据误差收敛曲线来判断模型求解设置是否合理。

### 2.2 边界条件及材料参数设定

穗东换流站在 $\pm 800$  kV云广直流输电工程中起逆变作用,2个晶闸管阀构成一座阀塔,1个阀厅陈列6座换流阀塔,每座阀塔组成逆变电路的上下桥臂,如图5所示。

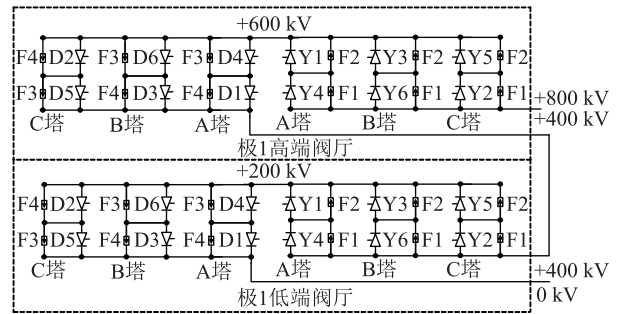


图5 极1换流阀塔接线

Fig.5 Schematic diagram of pole1 in converter station

根据12脉波逆变原理可知,在逆变的任一时刻一座阀塔的状态可以分为3种:(1) V1和V4均截止;(2) V1截止,V4导通;(3) V1导通,V4截止(正常状态不可能出现上下桥臂同时导通的情况)。其中V1、V4对应图1中的2个阀臂,以上3种状态分别标记为C1、C2、C3。

在这3种不同状态下可以确定均压电极第一类边界条件(狄利克雷边界条件),按照表1电位值设置,根据图1结构图同时确定母线板、电抗器和阀模块的边界条件,整个求解域为 $10\,000\text{ mm} \times 6\,000\text{ mm} \times 20\,000\text{ mm}$ 大小的长方体空气域,空气域外围接地。

表1 有限元仿真均压电极的狄利克雷边界条件

Table 1 Grading electrodes' Dirichlet boundary conditions of FEA simulation kV

阀塔状态	1,1'	2,2'	3,3'	4,4'	5,5'	6,6'	7,7'	8,8'
C1	0	0	25	75	100	125	175	175
C2	0	0	50	150	200	0	0	0
C3	0	0	0	0	0	50	150	150

有限元电场仿真材料参数根据美国材料和试验协会(ASTM)提供的数据进行设置,绝缘支柱相对介电常数为4.8,空气为1,水路为81,阀塔中悬浮导体相对介电常数取 $3 \times 10^4$ 进行计算<sup>[16-17]</sup>,避免病态的有限元系数矩阵影响收敛结果。

## 3 仿真计算结果及分析

针对3种阀塔状态构建了3种不同边界条件的模型,设置完成材料参数及相应的边界条件之后便划分网格进行计算,有限元求解转化成为代数方程组求解,求解自由度约 $10^7$ ,经过500多次迭代运算误差收敛到设定值时计算停止,得到以下计算结果。

### 3.1 换流周期内阀塔电位分布

计算得到了一座阀塔在3种不同状态下的电位分布图,如图6所示。

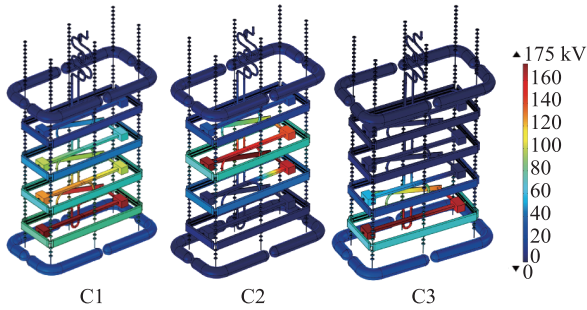


图6 电场有限元仿真结果

Fig.6 Simulation result of FEM in electric field

C1 情况下阀塔 2 个桥臂同时截止,整座阀塔承受直流 200 kV 截止电压,由于均压电极的作用水路电位分布和阀塔整体电位分布一致,V1、V4 桥臂分别截止时由一个桥臂承受截止电压,如图 6 中 C2 和 C3 所示。

3.2 水路电场强度分析

进一步分析水路的场强分布情况,可以得到水路内部靠近均压电极处的最大场强值,水路内部场强如表 2 所示。

表 2 水路内部场强值

Table 2 Electric field strength inside cooling water

电极对	最大电场强度/(kV·cm <sup>-1</sup> )		
	C1 状态	C2 状态	C3 状态
1,1'	0.00	0.00	0.00
2,2'	1.27	1.52	0.08
3,3'	0.36	3.11	0.34
4,4'	1.42	7.25	0.68
5,5'	1.38	<b>13.51</b>	3.31
6,6'	2.81	8.73	0.60
7,7'	5.47	0.71	8.41
8,8'	<b>5.85</b>	0.32	<b>8.44</b>

纵向分析表 2 数据可知,在 C1 情况下水路内部场强较强位置分布在电极对 7,7' 与 8,8' 附近,即阀层 3 与阀层 4 之间;C2 情况下跨越阀层 2 和阀层 3 之间水路的内部场强大于其他位置;C3 情况下阀层 3 与阀层 4 之间场强值最大。

很多换流阀漏水事故发生在外部水管表面,同样根据仿真结果可以获得水路外部的场强分布情况,如图 7 所示。

由空气的绝缘特性可知,在稍不均压或极不均压电场条件下空气击穿场强要低于均压电场下的击穿场强 30 kV/cm,对于距离较大的极不均匀电场情形,空气击穿场强范围在 4.5~10 kV/cm,整个换流阀由于结构复杂,即使模型已经经过了简化处理,但图 7 结果也表明在部分水路表面场强值较大,

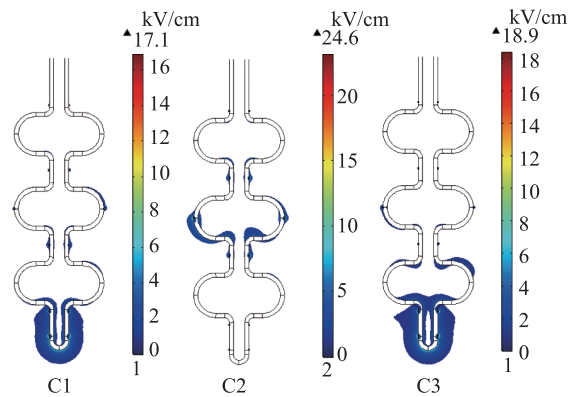


图7 水路外部场强分布

Fig.7 Distribution of electric field strength along cooling water system

从而有可能在运行过程产生放电现象,甚至损坏整个阀冷系统。

3.3 局部等电位线影响分析

考虑到在水路系统中均压电极与水管之间连接是通过等电位线连接,等电位线与水管表面不同距离也会影响电场分布,为此在前面大模型的结果下,针对均压电极附近的水管构建了更为细致的模型,冷却水管局部三维模型如图 8 所示。

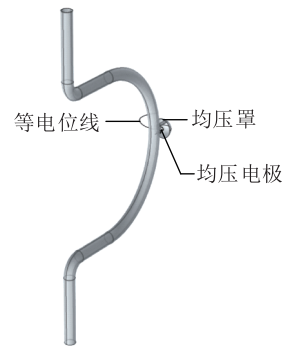


图8 冷却水管局部三维模型

Fig.8 Local 3D model of cooling water pipe

求解域为包被该模型的半径为 3 000 mm 的空气域,边界条件设置与前面一致,等电位线为 PVC 绝缘层包被,其相对介电常数设置为 5.0<sup>[21]</sup>,仿真结果如图 9 所示。

为了便于显示结果,图 9 中已经滤除了场强值低于 5 kV/cm 部分。从该仿真结果可以看出在等电位线周围以及均压电极部分场强较大,最大场强值在均压电极水管内部的针尖处,最大值为 75.2 kV/cm,查找文献[20]可知去离子水中的击穿场强在 650~700 kV/cm 之间,因此在冷却回路内部不会有影响,而处在空气域的等电位线场强已超过 5 kV/cm,根据极不均匀电场下空气介质的击穿特性可知在此情况下可能会发生电晕放电。

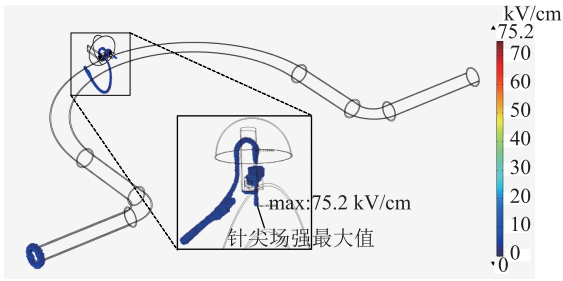


图9 冷却水管局部场强分布

Fig.9 Distribution of electric strength around the local cooling water pipe

## 4 仿真模型验证

### 4.1 原理设计

利用换流站实际运行使用的冷却水管及等电位线作为实验材料,设计了以下相关验证实验,实验原理接线如图 10 所示。

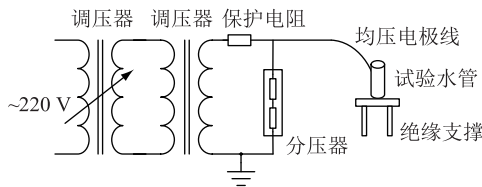


图 10 高压实验原理

Fig.10 Principle of high voltage experiment

为了加速模拟实验,等电位线与冷却水管缠绕后在等电位线上施加电压,使用紫外成像仪观察实验现象,观测距离为 2 m,光子增益为 200。

### 4.2 结果及分析

通过调节调压器,对等电位线施加电压至 20 kV,并且通过分压器和紫外成像仪记录实时电压和紫外成像图,如图 11 所示。

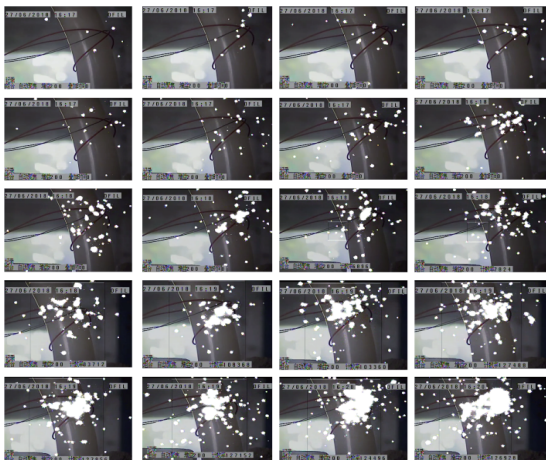


图 11 1~20 kV 各电压紫外成像(从左至右,从上至下)

Fig.11 UV detection image under 1~20 kV applied voltage (from left to right, top to bottom)

为了量化对比放电强度,将图像二值化处理后再计算紫外光斑面积与图像总面积的占比,基本流程如图 12 所示。在实际中二值化选择的阈值为 250,二值化前后对比效果如图 13 所示。根据二值化处理后计算得到图 14 所示的各电压下紫外成像仪所记录的光斑占比。

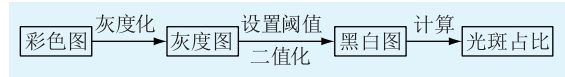


图 12 紫外光斑计算流程

Fig.12 Calculating flow chart of UV spot area

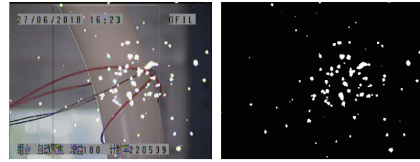


图 13 紫外图像处理前后对比

Fig.13 Comparison of UV image processing

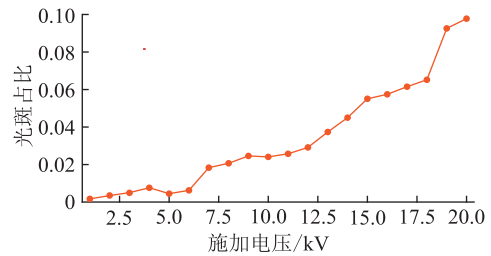


图 14 各电压下紫外光斑占比

Fig.14 The proportion of UV spot area in different applied voltage

在此验证实验中,等电位线与冷却水管形成了类似棒-板电极结构,电压施加到 7 kV 时开始能听到放电产生的可听噪声,图 11 观测到的光斑数量明显增大;电压值施加至 20 kV 时,可听噪声已经非常明显,并且肉眼能观测到明显的放电现象,此时紫外放电光斑占比已经接近 10%。

此实验结果验证了等电位线会影响水管表面电场,进而影响高分子材料结构,严重时破坏水管结构,使得管壁无法承受水路内部径向压力而漏水。观察换流站检修时更换的故障水管,可以看到其表面损伤部位呈现局部聚缩现象,周围有炭黑状物质。该证据也进一步说明了水管表面损伤与场强值过大造成电晕有关。

## 5 结语

文中主要对换流阀冷却水路系统进行了有限元电场仿真分析并设计了相关实验对仿真结果进行了验证,得到以下结论:

(1) 水路内部的场强分布在不同换流状态下分布不同,在 V1 截止,V4 导通情况时的场强值比另 2 种情况大;水路外部场强值在部分水管表面偏大;进一步细致仿真发现,等电位线会影响水管表面场强。

(2) 实验结果表明由等电位线与冷却水管构成的电极形状在 20 kV 施加电压下已经出现明显放电现象。

综合仿真与实验结果,换流站运行中阀冷系统漏水事故原因可以从场强因素分析考虑,结合故障发生部位进行进一步电场分析,同时对于等电位线与水管损伤的具体作用机制有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 王同森.  $\pm 800$  kV 云广直流换流阀及阀控系统结构及原理分析[J]. 广东输电与变电技术,2009,11(6):8-10,14.  
WANG Tongsen. The analysis of valve architecture and VBE control principle of  $\pm 800$  kV Yunnan-Guangdong UHVDC transmission[J]. Guangdong Power Transmission Technology,2009,11(6):8-10,14.
- [2] 罗永金,杨垒,马根坡,等. 复合式换流阀冷却系统的设计与试验[J]. 自动化仪表,2018,39(7):11-15.  
LUO Yongjin, YANG Lei, MA Genpo, et al. Design and test of compound cooling system of converter valve[J]. Process Automation Instrumentation,2018,39(7):11-15.
- [3] 刘重强,张恩龙,陈绪胜,等. 高温缺水地区换流阀冷却系统的研究[J]. 电力工程技术,2017,36(4):54-58.  
LIU Chongqiang, ZHANG Enlong, CHEN Xusheng, et al. Converter valve cooling system for high temperature water shortage area[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(4):54-58.
- [4] 马为民,樊纪超. 特高压直流输电系统规划设计[J]. 高电压技术,2015,41(8):2545-2549.  
MA Weimin, FAN Jichao. Planning and design of UHVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2545-2549.
- [5] 张俊玮,王民慧,邓文斌,等.  $\pm 500$  kV 换流站换流阀结构分析[J]. 高压电器,2012,48(7):22-26,30.  
ZHANG Junwei, WANG Minhui, DENG Wenbin, et al. Analysis on the thyristor valve structure  $\pm 500$  kV converter station[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(7):22-26,30.
- [6] 莫文斌,张文,徐攀滕,等. 特高压换流站阀冷系统隐患分析及整改措施[J]. 电力科学与工程,2015,31(3):29-32.  
MO Wenbin, ZHANG Wen, XU Panteng, et al. Hidden danger analysis and improvement measures in the valve cooling system of UHVDC converter station[J]. Electric Power Science and Engineering,2015,31(3):29-32.
- [7] WANG Huiquan, LYU Yin, ZHOU Wenqing, et al. Study on the damage of cooling water pipes in UHVDC thyristor valve based on thermal effect of current[C]//International Conference on Power System Technology,2018:2880-2883.
- [8] 王萌. 换流阀水路冷却系统腐蚀实验及腐蚀机理研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.  
WANG Meng. Research and experiment of water cooling system of converter valve[D]. Beijing:North China Electric Power University,2018.
- [9] 何运华,冯雪玉,何潇,等. 直流输电换流阀腐蚀机理研究进展[J]. 广东化工,2016,43(22):116-117.  
HE Yunhua, FENG Xueyu, HE Xiao, et al. A review on the corrosion mechanism of HVDC converter valve[J]. Guangdong Chemical Industry,2016,43(22):116-117.
- [10] 卢斌先,葛东阳,周建辉,等. 换流阀水路冷却系统电极反应的等效电路建模[J]. 高电压技术,2016,42(7):2199-2206.  
LU Binxian, GE Dongyang, ZHOU Jianhui, et al. Equivalent electric circuit modeling for electrode reaction in valve cooling water system[J]. High Voltage Engineering,2016,42(7):2199-2206.
- [11] 葛东阳. 换流阀冷却系统腐蚀与沉积分析模型与影响因素研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.  
GE Dongyang. Research on electrochemical corrosion and deposition analysis model and influencing factors of converter valve cooling systems[D]. Beijing:North China Electric Power University,2016.
- [12] 黄晨. 换流站阀水冷系统保护分析及优化[D]. 广州:华南理工大学,2015.  
HUANG Chen. Analysis and optimization for the protection of converter[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2015.
- [13] 樊阳文,恽强龙,张广泰,等. 特高压换流阀冷却系统配水仿真及试验研究[J]. 电力电子技术,2017,51(10):33-35.  
FAN Yangwen, YUN Qianglong, ZHANG Guangtai, et al. Numerical simulation and experimental research on water distribution for ultra high voltage converter valve cooling system[J]. Power Electronics,2017,51(10):33-35.
- [14] 范彩云,胡秋玲,陶颖军,等.  $\pm 500$  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  $\pm 500$  kV VSC-HVDC converter valve[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(10):183-189,197.
- [15] 张福轩,陈东,余军,等.  $\pm 1100$  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  $\pm 1100$  kV indoor DC yard[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(20):5873-5880.
- [16] 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. Elec-

- tric field simulation and calculation of voltage sourced converter valve in insulation type test[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 76-81.
- [17] 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 Apparatus, 2014, 40(11): 3537-3543.
- [18] 齐磊,王星星,李超,等.  $\pm 1$  100 kV 特高压直流换流阀绝缘型式试验下的电场仿真及优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1262-1271.
- QI Lei, WANG Xingxing, LI Chao, et al. Electric field simulation and optimization of 1 100 kV HVDC converter valve in insulation type test[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 41(4): 1262-1271.
- [19] 王加龙,彭宗仁,乐波,等. 典型特高压换流阀塔屏蔽装置电场仿真及对比分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4123-4131.
- WANG Jialong, PENG Zongren, YUE Bo, et al. Electric field simulation and comparison of shielding apparatus on typical types of UHVDC converter valve units control and protection strategies for MMC-HVDC under dc faults[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(12): 4123-4131.
- [20] 黄守道,王海宁,荣飞,等. 考虑系统损耗的 MMC 换流阀冗余配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 1-8.
- HUANG Shoudao, WANG Haining, RONG Fei, et al. Redundant configuration strategy of MCC converter valves considering system losses [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 1-8.
- [21] LIDE D R. CRC handbook of chemistry and physics : a ready-reference book of chemical and physical data[M]. CRC Handbook of Chemistry and Physics: A Ready Reference Book of Chemical and Physical Data, 1989.

#### 作者简介:



吕茵

吕茵(1985),女,硕士,工程师,从事高压直流输电换流站运维工作(E-mail: eoeslv\_lv\_17@163.com);

王慧泉(1984),男,学士,工程师,从事高压直流输电设备换流阀及控制保护设备检修维护工作;

周文青(1996),男,硕士在读,研究方向为高电压技术仿真、电磁场数值分析。

## Electric field of valve cooling system in thyristor valve based on finite element method

LYU Yin<sup>1</sup>, WANG Huiquan<sup>1</sup>, ZHOU Wenqing<sup>2</sup>, LIANG Weiwei<sup>2</sup>, HU Chuanliang<sup>2</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd. Extra High Voltage Transmission Company, Guangzhou 510507, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In the HVDC transmission project, the problem of water leakage in the valve cooling system of the converter station will seriously affect the stability of the HVDC transmission. To study the problems like above, it will consider the factor of electric field strength around the cooling system in valve tower, and the method of finite element analysis is used to construct the three-dimensional model of the cooling system in the valve tower and a detailed model of S-type pipe. The electric field simulation is performed according to the operating conditions of the valve tower. In the end, an experiment is designed to verify the FEA model. The results of simulation show that the electric field strength of some parts of cooling water pipe is greater than the air breakdown field strength and the grading wire will reflect on the electric field around cooling water pipes. The experiment proves that there will be obvious discharge between the electric grading wire and the cooling water pipe under certain conditions. The research provides a reference for the analysis of the cause of water leakage accidents in valve towers.

**Keywords:** valve cooling system; grading electrode; distribution of electric field; finite element analysis

(编辑 钱悦)