

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221495

# 500 kV 避雷器受潮情况下温升计算及影响因素分析

沈 越<sup>1,2</sup>, 彭劲樟<sup>3</sup>, 张再华<sup>3</sup>, 刘 波<sup>4</sup>, 黎 鹏<sup>1,2</sup>, 吴 田<sup>1,2</sup>

(1. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网湖北省电力有限公司黄石供电公司, 湖北 黄石 435000; 4. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对避雷器温升计算过程对流换热系数依靠经验确定的问题, 提出了对流换热系数计算方法, 研究了避雷器内部温度场分布, 分析了污秽、风速、日照三种因素对不同受潮程度、不同受潮位置下避雷器温升的影响。结果表明, 不同影响因素下, 避雷器表面对流换热系数取值范围分别为 5~31、27~35、19~34 W/(m<sup>2</sup>·℃); 污秽位置会影响 MOA 表面温升分布, 且受潮程度越大, 对温升影响越显著; 随着风速的增加, 阀片上的温度下降较小, 表面的温度下降较大; 日照对受潮时的避雷器温升影响明显增大, 但较于污秽和风速影响偏小。

**关键词:** 避雷器; 温升; 受潮; 对流换热系数; 污秽; 风速

**中图分类号:** TM854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)06-0211-05

## 1 引言

金属氧化物避雷器(MOA)以其优异的非线性伏安特性和高能量吸收能力被广泛应用于电力系统,但在长期运行中 MOA 阀片会由于老化、受潮或过热等原因发生热崩溃故障<sup>[1]</sup>,其中,MOA 故障中由受潮引起的约占 70%<sup>[2]</sup>。MOA 受潮后其温度分布会发生改变,通过红外检测表面温度的变化从而反映 MOA 内部受潮故障已得到了应用,因此研究 MOA 受潮条件下的温升特性对提升其受潮故障检测效果具有重要意义。常见的避雷器温升计算方法包括网络法、有限元法<sup>[3,4]</sup>、热电耦合<sup>[5]</sup>等,其中有限元法求解精度较高。刘家豪<sup>[6]</sup>利用有限元法建立避雷器表面污秽二维轴对称模型,获得了瓷套表面清洁、均匀污秽及出现局部干燥带时的电场分布情况;史晓航等<sup>[7]</sup>基于有限元法建立避雷器三维温度场模型,获得了不同风速和光照影响下的避雷器温度分布。但已有研究在计算 MOA 温升时,MOA 表面对流换热系数的选取大部分依靠经验,可能导致计算结果不准确,同时,针对日照、污秽等环境因素对 MOA 温度分布的影响也缺乏系统研究。因此,本文提出一种基于有限元法的避雷器外流场模型

确定对流换热系数的方法,并系统分析了污秽、风速、日照三种环境因素对不同受潮程度、不同受潮位置下避雷器温升的影响,获得的避雷器内外部温度分布规律,可为红外检测提供参考。

## 2 温升计算方法

### 2.1 计算模型及参数

某 500 kV 站用避雷器型号为 Y20W-444/1106,主要包含阀片(ZnO)、环氧管、瓷套、法兰和均压环,具体见图 1。

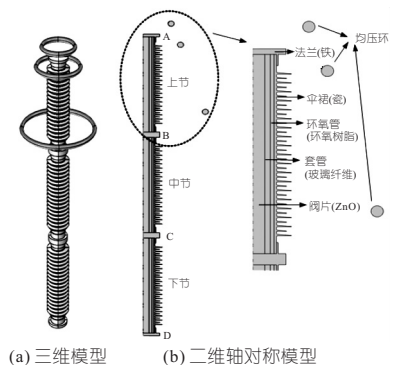


图 1 避雷器模型

Fig. 1 Arrester model

由于 MOA 发生受潮故障的主要原因是呼吸作用导致内部出现水膜,故在阀片的外表面设置

收稿日期: 2022-07-20, 修回日期: 2022-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51807110)

作者简介: 沈越(1997-),女,硕士研究生,研究方向为电工装备电磁多物理场, E-mail: 18638581561@163.com

通讯作者: 黎鹏(1989-),男,博士、副教授,研究方向为电工装备电磁多物理场、外绝缘, E-mail: lipeng\_ctgu@163.com

一层水膜模拟受潮前期,后期阀片电阻率会大幅下降。根据文献[8],将轻度受潮时水膜厚度设置为 3 mm,电阻率为  $1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$ ,重度受潮时阀片电阻率降低为  $10^6\ \Omega \cdot \text{m}$ 。

### 2.2 计算流程及控制方程

基于电-热耦合方法对避雷器进行多物理场仿真研究,计算流程见图 2。首先,为了减少计算量,采用二维轴对称模型进行计算,提取热功率作为热源代入时谐-温度场中;其次,作为边界条件的对流换热系数  $h$  的取值是计算准确与否的关键,目前主要依靠经验选取,缺乏理论依据,因此需对  $h$  进行求解;最后,设置边界条件  $h$  求解并获得 MOA 温度分布。

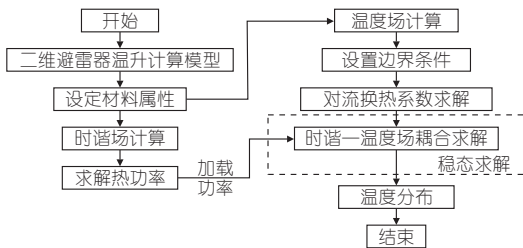


图 2 MOA 温度场计算流程

Fig. 2 Temperature field calculation process of MOA

在低频情况下,Maxwell 方程组中的位移电流密度和传导电流密度相比可忽略,即不考虑由变化电场产生的磁场。电磁场控制方程为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\nabla$  为哈密顿算子;  $\mathbf{H}$  为磁场强度矢量,  $\text{A}/\text{m}$ ;  $\mathbf{J}_s$  为传导电流密度矢量,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $\mathbf{E}$  为电场强度矢量,  $\text{V}/\text{m}$ ;  $\mathbf{B}$  为磁感应强度矢量,  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ;  $t$  为通电时间,  $\text{s}$ 。

避雷器中固体绝缘材料大部分是环氧树脂,其产生的介质损耗较小,可忽略不计。电阻损耗主要是电流通过阀片所产生的损耗,其功率损耗  $P$  计算公式为:

$$P = \int \frac{\mathbf{J}_s^2}{\sigma} dV \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  为避雷器阀片的电导率,  $\text{S}/\text{m}$ ;  $V$  为体积,  $\text{m}^3$ 。

热传导主要集中在避雷器内部固体之间,热对流主要集中在法兰、伞裙与空气之间,控制方程<sup>[1]</sup>分别为:

$$q^* = -\lambda dT/dn \quad (3)$$

$$q^* = h(T_f - T) \quad (4)$$

式中,  $q^*$  为热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $n$  为单位法向量;  $dT/dn$  为温度沿  $n$  方向的导数;  $h$  为对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ;

$T_f$ 、 $T$  分别为物体表面温度、周围环境温度,  $\text{C}$ 。

## 3 对流换热系数计算

### 3.1 计算方法

计算避雷器温度场时,对流换热系数的取值往往依靠经验,当避雷器受潮后阀片内部温度上升,会导致表面温度升高,引起对流换热系数发生改变,若继续依靠经验计算会产生较大误差,因此,根据式(4),提出了基于 MOA 外流场计算确定外壁面对流换热系数的方法,通过流体-温度场耦合求解出  $h$  并拟合,拟合公式可直接作为边界条件加载在二维热电耦合模型中,计算方法流程见图 3。具体步骤如下。

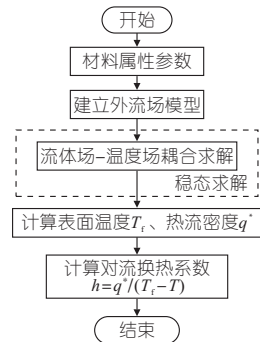


图 3 MOA 对流换热系数计算流程图

Fig. 3 Flow chart of MOA convection heat transfer coefficient calculation

步骤 1 建立外流场模型(图 4)。

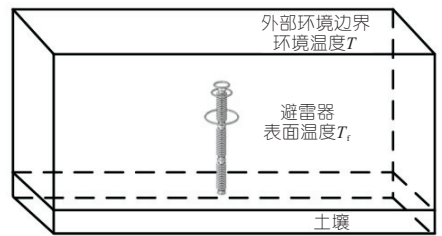


图 4 避雷器外流场计算模型

Fig. 4 Simulation model of external flow field of arrester

步骤 2 由式(4)可知,对流换热系数与避雷器表面-环境温度差有关,因此改变阀片和环境温度获取热流密度和表面温度。

步骤 3 当环境温度  $T$  分别固定为 0、15、30  $\text{C}$  时,相应改变阀片温度  $T^* = T + 10i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n, n$  为正整数),  $T^*$  不大于 120  $\text{C}$ <sup>[9]</sup>。

步骤 4 通过流体-温度场耦合求解获得 MOA 热流密度  $q^*$  和避雷器表面-环境温度差  $\Delta T = T_f - T$ , 分别计算出对流换热系数  $h = q^* / \Delta T$ , 考虑到避雷器表面温度并非均匀,为了反映空气域内平均对流散热作用,  $T_f$  选取表面平均温度。

### 3.2 影响因素及模拟方法

避雷器一般在室外,受周围工业污染和环境影响,避雷器表面温度分布会发生改变,主要影响因素包括污秽、风速和日照。仿真模拟方法为:①在 MOA 表面上、中、下三节分别设置污秽层,污秽层厚度设置为 1 mm,相对介电常数为 81,电阻率为  $35 \Omega \cdot \text{m}^{[6]}$ ;②风速会使避雷器表面流体发生强迫对流引起热量传递,根据标准中规定红外检测时环境风速不大于  $5 \text{ m/s}^{[10]}$ ,选取风速分别为  $0.2, 4 \text{ m/s}$ ;③日照是通过太阳辐射传递的能量引起避雷器表面温度变化<sup>[7]</sup>,选取日照强度分别为  $0, 100, 200, 300, 400, 500 \text{ W/m}^2$ 。

### 3.3 计算结果与分析

当环境温度分别为  $0, 15, 30 \text{ }^\circ\text{C}$  时,获得  $h$  与表面—环境温差  $\Delta T$  之间的关系见图 5。图 5 中实线为利用最小二乘法获得的拟合曲线,具体拟合关系式为  $h = 15.75\Delta T^{0.3433} - 3.631$ 。由图 5 可知,不同环境温度下拟合曲线与原始数据的一致性较好,对流换热系数取值范围为  $5 \sim 35 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ ,当  $\Delta T$  增大时,避雷器外部空气热对流加强,对流换热系数增大。

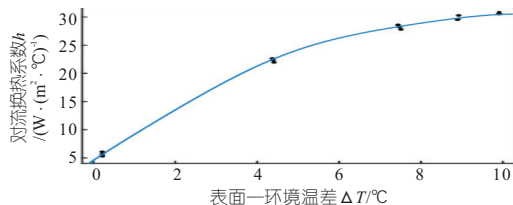


图 5 对流换热系数拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of convective heat transfer coefficient

为了验证拟合公式的有效性,将三维外流场模型与利用拟合公式的二维模型进行对比,当环境温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,上节避雷器轻度受潮时,得到三维和二维避雷器模型的温度分布见图 6。

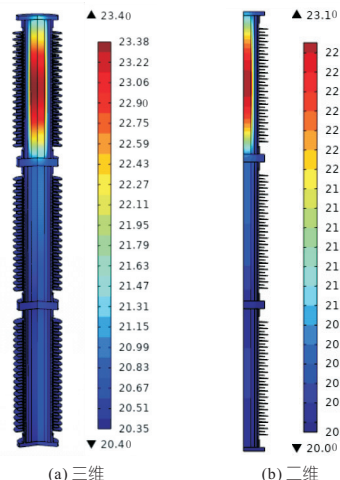


图 6 避雷器温度分布(单位:  $^\circ\text{C}$ )

Fig. 6 Temperature distribution of arrester

由图 6 可知,阀片上最大温度分别为  $23.4, 23.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,二者相差  $1.2\%$ ,验证了拟合公式的准确性。同时,利用本文计算方法,获得不同影响因素下的对流换热系数范围见表 1。由表 1 可知,对流换热系数随受潮程度增大而增大,而风速影响下的对流换热系数随受潮程度影响基本不变。

表 1 不同影响因素下的对流换热系数范围

Tab. 1 Convective heat transfer coefficient range under different influencing factors  $\text{W/(m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$

影响因素	轻度受潮		重度受潮	
	单节	双节	单节	双节
表面污秽	5~14	11~15	10~27	17~31
风速	27~34	32~34	27~35	27~34
日照	19~28	19~28	24~33	28~34

## 4 避雷器温升影响因素分析

### 4.1 表面污秽对避雷器温升的影响

MOA 上节重度受潮阀片随污秽位置变化见图 7。由图 7 可知,避雷器外表面污秽位置会影响受潮节温度分布,污秽所在节的温度会降低,而其余两节的温度会升高,这是由于污秽层附着于伞裙表面,相当于并联电阻,会使其余两节阀片中的阻性电流增大,温度升高。同时,文献<sup>[11]</sup>通过相关试验,获得的实际受污时温度变化规律与本文一致,这也从侧面证实了本研究仿真模型的合理性及结论的正确性。

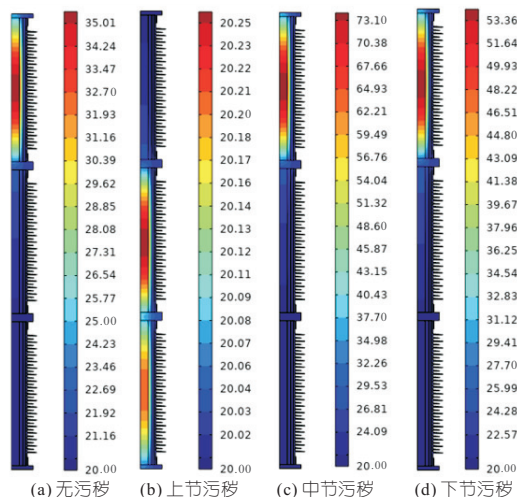


图 7 MOA 上节重度受潮温升随污秽位置变化

Fig. 7 Changes in temperature rise with pollution location during severe dampness in the upper section of MOA

污秽位于不同位置时,MOA 轻度、重度受潮情况下阀片和外表面的最高温升见表 2。由表 2 可知:①轻度受潮时,与无污秽相比,上、中、下三节积污时阀片的最大温度分别升高  $14.6\%、58.0\%、60.6\%$ ,其表面的最大温度分别升高  $2.5\%、8.4\%、8.8\%$ 。②重度受潮时,避雷器阀片

表 2 污秽位置对轻度、重度受潮避雷器温升的影响

Tab. 2 Influence of different contamination locations on temperature rise of lightly and heavily damp arrester °C

受潮位置	轻度受潮								重度受潮							
	无污秽		上节污秽		中节污秽		下节污秽		无污秽		上节污秽		中节污秽		下节污秽	
	阀片	表面	阀片	表面	阀片	表面	阀片	表面	阀片	表面	阀片	表面	阀片	表面	阀片	表面
上	3.1	0.39	0.3	0.04	16.50	2.10	17.10	2.18	15.0	1.70	0.3	0.04	54.0	6.90	34.2	4.30
中	2.2	0.28	4.9	0.52	0.24	0.03	4.30	0.46	9.2	1.16	40.0	4.30	0.2	0.03	38.0	4.05
下	1.4	0.17	3.7	0.46	3.62	0.46	0.23	0.04	8.0	0.85	28.0	3.55	40.5	5.11	0.2	0.04
上中	3.3	0.41	4.9	0.53	4.60	0.58	4.50	0.84	22.0	3.80	20.0	2.21	54.0	6.80	55.0	10.70
上下	2.2	0.27	3.4	0.43	4.60	0.58	3.80	0.47	16.0	2.00	14.0	1.76	53.0	6.70	34.3	4.34
中下	1.9	0.34	5.1	0.85	3.70	0.46	4.10	0.45	18.0	3.50	57.0	10.70	21.7	2.70	18.6	2.02

的最大温度分别升高 105.4%、116.0%、98.6%，其表面的最大温度分别升高 30.6%、23.9%、28.9%。可看出污秽位置会影响 MOA 表面温升分布，且受潮程度越大，对温升影响越显著。因此在红外检测时应选择晴天、湿度较小等天气进行。同时，轻度受潮时下节受污对避雷器阀片和表面温升影响更明显，故在避雷器前期维护时可着重对下节进行防污处理，避免污秽引起局部温度升高，对红外检测避雷器运行状态造成影响。

### 4.2 风速对避雷器温升的影响

不同风速情况下，MOA 上节轻度和重度受潮时阀片和表面温升变化见图 8。

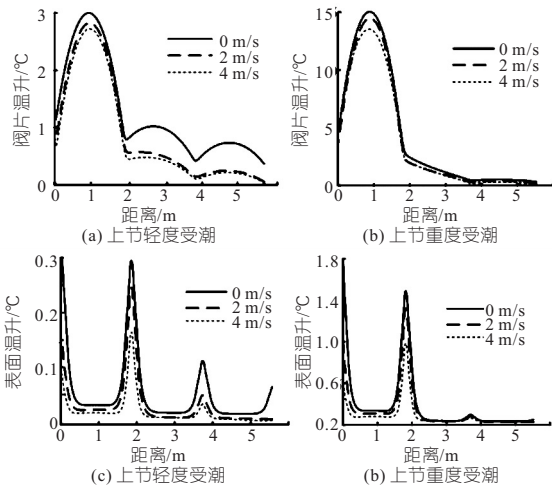


图 8 不同风速下 MOA 上节轻、重度受潮时温升变化  
Fig. 8 Temperature rise changes of MOA upper section under light and severe damp at different wind speeds

由图 8 可知，随着风速的增大，阀片和表面上的温升均随之减小，这是由于风速增大加强了空气对流散热，导致表面最高温度有所下降，温升减小。

轻度、重度受潮时，MOA 温升随风速的变化见表 3。由表 3 可知：①当风速为 0~4 m/s 时，阀片上的最大温升可减少 34%，伞裙迎风面和背风面上的最大温升分别可减少 60%、42%；②当风速为 0~4 m/s 时，MOA 阀片上的最大温升减少 17%，伞裙迎风面和背风面上的最大温升分别可减少 55%、32%；随着风速增大，阀片上的温度降低较小，表面的温度下降较大，且迎风面比背风面下降更多。当风速达到 4 m/s 时，上节重度受潮表面温升由 1.7 K 减至 0.96 K，低于 1 K，不在红外检测范围内，由此可见，风速的增大会对避雷器缺陷检测产生不利的影响，应挑选无风或风速不超过 4 m/s 天气下进行红外检测。

### 4.3 日照对避雷器温升的影响

环境温度为 20 °C，正常、上节轻度和重度受潮情况下，阀片和表面最大温升随日照强度的变化规律见图 9。由图 9 可知，阀片最大温升与日照辐射强度呈正比，日照辐射强度每升高 100 W/m<sup>2</sup>，温度约升高 3 °C。在日照强度为 500 W/m<sup>2</sup> 时，与正常情况相比，上节轻度、重度受潮时，阀片温升分别增长为 13.50、13.96 °C，表面温升分别增长为 2.01、2.70 °C，可见，日照强度越大，对避雷器内外部温升影响越大，但相较于污秽和风速对温升的影响较小。

表 3 风速对轻度、重度受潮避雷器温升的影响

Tab. 3 Influence of wind speed on temperature rise of lightly and heavily damp arrester °C

受潮位置	轻度受潮						重度受潮					
	2 m/s			4 m/s			2 m/s			4 m/s		
	阀片温升	表面温升		阀片温升	表面温升		阀片温升	表面温升		阀片温升	表面温升	
	迎风面	背风面	迎风面	背风面	迎风面	背风面	迎风面	背风面	迎风面	背风面	迎风面	背风面
上	2.30	0.24	0.33	2.23	0.16	0.25	14.76	1.39	1.50	14.31	0.96	1.47
中	1.46	0.15	0.22	1.45	0.11	0.16	8.26	0.82	0.88	8.16	0.57	0.74
下	1.29	0.14	0.17	1.27	0.09	0.11	7.85	0.75	1.04	7.67	0.52	0.78
上中	2.23	0.36	0.45	2.18	0.39	0.38	21.64	3.39	3.67	20.84	2.33	3.63
上下	2.10	0.21	0.26	2.08	0.14	0.22	14.42	1.42	1.96	13.97	0.98	1.49
中下	1.88	0.30	0.32	1.82	0.20	0.26	15.66	2.64	3.22	15.34	2.60	3.20

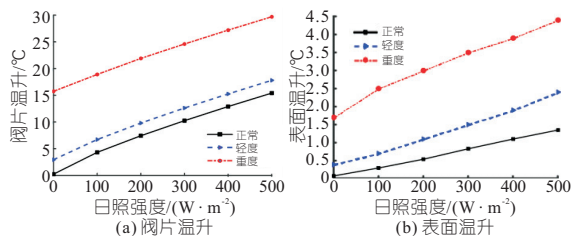


图 9 不同受潮程度下 MOA 温升随日照强度变化

Fig. 9 Changes of MOA temperature rise with sunshine intensity under different damp degree

## 5 结论

a. 相较于风速和日照,污秽影响下的对流换热系数随受潮程度影响增大约 1 倍,而风速影响下的对流换热系数随受潮程度增大基本不变,最大为  $35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

b. 随着风速的增加,阀片上的温度下降较小,表面的温度下降较大,阀片上的最大温升可减少 34%,迎风面最大温升可减少 60%,故风速较高时不利于红外检测避雷器缺陷。

c. 阀片最大温升与日照辐射强度呈正比,日照辐射强度每升高  $100 \text{ W}/\text{m}^2$ ,温度约升高  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。可见在夏季高温下,日照是影响避雷器温升过高的主要原因。

### 参考文献:

[1] 黎鹏,屈莹莹,方蓓贝,等. 不同故障条件下 500 kV 金属氧化物避雷器温度分布特性[J]. 科学技术与

工程,2021,21(9):3649-3655.

[2] 高峰,郭洁,徐欣,等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术,2009,35(11):2629-2633.

[3] 刘尉,肖集雄,金硕,等. 基于场路耦合的 500 kV 氧化锌避雷器受潮缺陷分析[J]. 电瓷避雷器,2022(1):118-125.

[4] 朱月亭,吴钰颖,郭洁. 基于 COMSOL 的 750 kV 避雷器电位分布优化研究[J]. 水电能源科学,2022,40(5):198-201.

[5] 杨雅倩,邓维,罗日成,等. 基于热电耦合模型的 500 kV 氧化锌避雷器温度分析[J]. 电瓷避雷器,2019(3):98-104.

[6] 刘家豪. 500 kV 避雷器不同污秽状况下径向电场及电压分布的仿真研究[J]. 电瓷避雷器,2021(1):45-50.

[7] 史晓航,袁海燕,余海,等. 考虑风速和光照影响的特高压避雷器温度分布研究[J]. 电瓷避雷器,2021(5):30-35.

[8] ZHANG PIPEI, SHI WEI, WANG HUI, et al. Simulation of potential distribution and leakage current of 800kV DC arrester under different degree of degradation[C]//ACPEE 2019. IOP conference series: materials science and engineering,2019,486(1):1-6.

[9] 苗发金. 金属氧化物电阻片电容特性的研究[J]. 电瓷避雷器,2016(5):102-105.

[10] 全国高电压试验技术标准化分技术委员会. 带电设备红外诊断应用规范:DL/T 664-2016[S]. 北京:中国电力出版社,2008.

[11] 张搏宇,李光范,张翠霞,等. 污秽条件下避雷器的内部温升研究[J]. 高电压技术,2011,37(8):2065-2072.

## Calculation of Temperature Rise of 500 kV Arrester Under Damp Condition and Analysis of Influencing Factors

SHEN Yue<sup>1,2</sup>, PENG Jin-zhang<sup>3</sup>, ZHANG Zai-hua<sup>3</sup>, LIU Bo<sup>4</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, WU Tian<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. State Grid Hubei Huangshi Power Supply Company, Huangshi 435000, China; 4. Wuhan NARI Limited Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the convective heat transfer coefficient depends on experience in the calculation process of arrester temperature rise, a method of determining convective heat transfer coefficient was proposed. The temperature field distribution inside the arrester was studied. The influences of pollution, wind speed and sunshine on the temperature rise of the arrester at different damp degree and different damp positions were analyzed. The results show that under different influencing factors, the convective heat transfer coefficient of the arrester ranges from 5 to 31, 27 to 35 and 19 to 34  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , respectively. The pollution location will affect the temperature rise distribution of MOA surface, and the greater the degree of moisture, the more significant the impact on temperature rise. With the increase of wind speed, the temperature on the valve plate decreases slightly. However, the surface temperature decreases greatly. The influence of sunshine on the temperature rise of lightning arrester is obviously increased, but it is smaller than that of pollution and wind speed.

**Key words:** arrester; temperature rise; damp; convection heat transfer coefficient; pollution; wind speed