

电力设备载流连接板温升研究

吴冬文, 曾晗, 吴花
(江西省电力公司检修分公司, 南昌 330096)

摘要: 针对电力设备载流故障与接触电阻、设备载流、外部环境温度及其结构尺寸之间的关系, 研究建立了高压电气设备载流连接板温升故障的有限元计算方法, 借助传热学理论, 建立温升模型。并针对一起 35 kV 电流互感器载流连接板仿真发热故障进行了 ANSYS 计算分析, 重点研究了载流连接板通过的电流大小、外部环境温度及连接板尺寸对其温度升高的影响。该分析结果可以用于对红外测温过程中电气设备电流型致热故障进行参考分析, 并对实际设计中生产厂家选用高压电气设备一次电流连接板尺寸大小有一定的指导意义。

关键词: 载流故障; 电流型致热; 载流连接板; 传热; 有限元计算; ANSYS 仿真

中图分类号: TM506

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0071-05

Temperature Rise Studies on Electrical Equipment Current-carrying Patch Board

WU Dongwen, ZENG Han, WU Hua

(Maintenance Branch, Jiangxi Electric Power Corporation, Nanchang 330029, China)

Abstract: According to the relationship between the electrical equipment current-carrying fault and contact resistance, loaded-current, surface environmental temperature and board dimension, this paper study and set up high-voltage electrical equipment current-carrying patch board fault temperature rise fault finite element approach, by means of heat transfer theory, build temperature rise model. According to a 35 kV current transformer loaded-current patch board heating-fault, this paper analysis by the ANSYS simulation calculation way, and research focus on current-carrying temperature rise effect of current size, surface environmental temperature and board dimension. Analytic result has important references for the current-heating fault judgment of the electrical equipment, and has important references for the manufactures selecting board dimension on high-voltage electrical equipment.

Key words: current-carrying fault; current-heating; current-carrying patch board; heat transfer; finite element approach; ANSYS simulation

在电力系统运行中, 输变电设备担负着电力输送功能, 高电压大电流输变电设备长期运行, 即使导电良好的导体也会出现不可预期发热故障导致设备停电事故。在变电设备的各类缺陷中, 载流连接板发热缺陷普遍存在, 如图 1 所示。如果能够准确掌握载流连接板温度升高规律, 对掌握设备缺陷的并预防电力设备故障的发生具有极其重要的意义。

电力设备主要有两种发热故障, 一种是电流致热型故障, 主要原因是长期运行的设备载流接头裸露在空气环境中因导体接触不良造成接触电阻过大, 通流大电流后引起接触发热, 电气设备电流致热型故障一般集中于设备的金属连接点处; 另一种

是电压致热型故障, 是由于密封在固体绝缘、油绝缘及设备壳体内部的绝缘介质劣化引起的故障, 在高电压的作用下引起的设备内部发热。

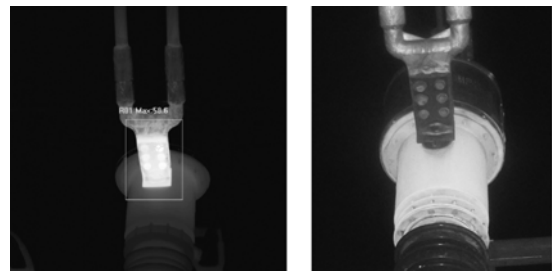


图 1 电力设备载流故障红外测温图谱与实物照片

Fig. 1 Infrared Temperature Measurement and Physical Picture of The Load Flow Fault in Electric Power Equipment

据统计, 电流致热型故障占设备发热故障的 80% 以上^[1-4]。目前, 红外热成像诊断技术在电力系统的应用日趋成熟, 其测量灵敏度高达 0.01 度, 无论是电力设备内部故障, 还是电力连接点的发热

收稿日期: 2015-11-01

作者简介: 吴冬文(1977), 男, 江西南城人, 高级工程师, 博士, 主要从事变电设备检修管理工作。khanzeng@foxmail.com。

故障, 都能清晰显示, 对掌握设备的运行状况发挥了巨大的作用。

参考《带电设备红外诊断技术应用导则》(DL/T 664—1999), 电器设备的金属部件表面温度热点温度 $>90^{\circ}\text{C}$ 即可判断设备过热, 程度较重, 定义为设备严重缺陷, 应尽快安排处理。排除红外检测仪器本身测量精度与测量人员因素外, 电气设备电流致热型故障还与设备的载流大小、外界环境温度及载流体的结构形状有关, 详细掌握载流板温度与电流和外界环境温度之间的关系, 对设备运行管理单位对红外检测周期安排及对设备缺陷发展趋势预测有十分重要的理论及实践意义^[4-8]。

本文针对载流连接板电流致热型故障, 根据其电气连接结构, 依据传热学理论, 分析金属连接板导电回路的热传导过程。建立了载流连接板热分析模型, 采用 ANSYS 有限元仿真计算对影响载流板发热温度的主要因素进行详细理论分析, 得出载流连接板温度升高与通过的电流的大小、与周围环境温度及几何结构等条件之间的关系。

1 高压电气设备载流连接板结构特点

对于高电压、大电流电气一次设备, 其连接点一般通过足够截面积连接金具板进行电气连接, 其几何结构如图 2 所示。为保证载流连接板足够的热稳定性, 利用金具平板相叠并用螺栓进行紧固, 减小接触电阻。如果两金具连接板接触表面粗糙、锈蚀或螺栓压紧力过小, 则易造成连接金具板接触电阻增大, 载流过大时产生较高的电阻发热使得金具温度升高, 长期接点发热将导金属材质电气性能下降, 引发设备停电故障。

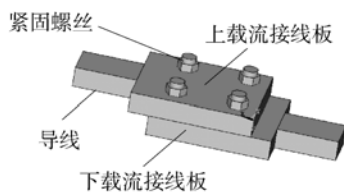


图 2 电气载流连接板结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of the Structure of the Connection Plate of the Electric Current

2 载流连接板温度求解

在温度分析计算过程中, 热源密度的确定是十分重要的, 载流连接板的热源主要由接触电阻发热产生, 忽略载流连接板本身电阻产生的热量。众所

周知, 在电气设备运行条件下, 载流连接板求解区域内, 由于金属传热系数较大, 根据载流连接板的几何结构, 可不考虑金属内部热传递过程, 认为载流连接板内部各点热源密度相等, 并不随时间变化而变化, 为一稳态定求解过程:

$$q_v = I^2 R / V \quad (1)$$

式中: q_v 为材料热源密度, W/m^3 ; I —载流体通过电流, A ; R —载流体电阻, Ω ; V —载流体体积, m^3 。

以图 2 载流连接板几何模型为例, 取模型的几何中心为坐标原点, 根据载流连接板结构特点, 可以认为连接板的温度场是关于 x 轴(前、后)和 y 轴(左、右)对称。因此, 为简化连接板表面温度计算, 可取 1/4 原模型为计算模型, 并忽略连接板压紧螺栓与连接板因金属材质不同带来的复杂耦合计算过程, 计算模型不考虑螺栓结构, 则载流连接板温度求解域如图 3 所示^[9-13]。

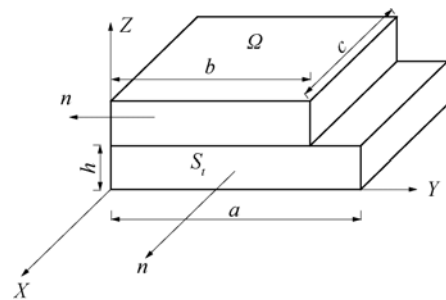


图 3 载流连接板温升求解域

Fig. 3 The Solution of the Temperature Rise of the Current Carrying Connection Plate

参照图 2, 载流连接板温度定解问题的提法为公式 2, 因载流连接板裸露在空气环境中, 接触流体空气的温度和换热系数已知, 可利用传热学第三类边界条件列求解方程:

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -q_v & \text{在 } \Omega \text{ 内} \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 & \text{在 } S_1 \text{ 上} \\ K_n \frac{\partial T}{\partial n} + \lambda(T - \bar{T}) = 0 & \text{在 } (S_\Omega - S_1) \text{ 上} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_u 为材料传热系数 ($u = x, y, z, n$), ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$); λ 为空气散热系数, ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$); \bar{T} —环境温度, $^{\circ}\text{C}$; T —局部特征温度, $^{\circ}\text{C}$; q_v —材料热源密度, W/m^3 。

发热体求解域是由两块相同材质的金属连接板叠加而成, 因此可以认为计算模型内部各方向传热系数 $K_u (u = x, y, z \text{ 或 } n)$ 相同, 统一用 K 代替。另外载流板计算模型完全裸露在冷却介质大气中, 流体散热系数也即是空气散热系数 λ 为已知参数, 大气环境温度 \bar{T} 也为已知条件。

由变分原理, 上述热传导问题等价于下列泛函数的极值问题:

$$J(T) = \int_{\Omega} K \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - q_v T \, d\Omega - \int_{\Gamma} \frac{\lambda}{2} (T^2 - 2T\bar{T}) \, d\Gamma = \min \quad (3)$$

式中: $J(T)$ 为载流体泛函数; K —材料传热系数, $(\text{w/m} \cdot \text{°C})$ 。

采用 6 面体 8 节点等参元对场域 V 进行离散, 在每个离散单元内采用等参元插值函数, 场变量模型近似为:

$$T = \sum_{i=1}^8 N_i T_i \quad (4)$$

式中: $N_i(\xi, \eta, \zeta)$ 为形函数。自然坐标 $\{x, y, z\}$ 到局部坐标 ξ, η, ζ 的变换关系式为:

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) x_i \\ y = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) y_i \\ z = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) z_i \end{cases} \quad (5)$$

则式(3)泛函数的极值条件可表示为:

$$\frac{\partial J(T)}{\partial T_i} = \sum \frac{\partial J_e}{\partial T_i} \quad (6)$$

$$\frac{\partial J_e(T)}{\partial T_i} = \int_{\Omega_e} \sum_{j=1}^8 \left\{ K \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] T_j - q_v N_i \right\} d\Omega - \int_{\Gamma} \lambda (T - \bar{T}) N_i \, d\Gamma = 0 \quad (7)$$

式中: $J_e(T)$ 为载流体单元泛函数。

整理后得求解稳定温度场的矩阵方程为:

$$[H][T] = [Q] \quad (8)$$

式中: $[T] = [T_1, T_2, T_3, \dots, T_n]^T$, 即可求出各节点的温度值 T , 减去大气环境温度即可计算出载流连接板的温升。

3 载流连接板温度场仿真计算

根据载流连接板的实际尺寸, 利用有限元分析

软件 ANSYS 建立 1:1 仿真计算模型, 详细参数见表 1。以一起 35 kV 电流互感器载流连接板发热分析为例, 载流板通过电流为 872 A, 外部环境温度为 18°C, 用直流电阻测试仪测量载流连接板接触电阻为 120 $\mu\Omega$ 。在求解区域内, 导流金属材质为铝合金, 传热系数较大, 不考虑内部热传导过程, 设置内部各点热源密度相等。合理设置计算边界条件是应用有限元方法计算开域问题的关键^[14-15]。计算开域温度场时, 认为当计算边界取为模型实际尺寸的 3~5 倍时, 即可满足计算精度的要求, 因此设置边界远边条件为 360 mm。

表 1 载流连接板仿真计算模型参数数据

Table 1 The Simulation Parameter of Electrical Current-carrying Patch Board

计算模型参数	数值
连接板长度 2 a/mm	120
连接板宽度 2 c/mm	100
连接板厚度 h/mm	20
通流电流 I/A	872
对接电阻 R/ $\mu\Omega$	120
载流对接板总生热量/W	91.24
载流对接板发热体体积 V/m^3	4.8×10^{-4}
热源强度 $q_v(\text{W}/\text{m}^3)$	1.9×10^5
空间散热系数 $K_u(\text{w}/\text{m} \cdot \text{°C})$	202
周围大气温度 $\bar{T}/\text{°C}$	18
空气散热系数 $\lambda(\text{w}/\text{m} \cdot \text{°C})$	0.024

应用 ANSYS 软件仿真对载流连接板温度分布进行分析, 并采用三维热传导模型 solid70 单元对计算模型进行离散分解。程序前处理及荷载中代入上述数据可求得连接板温度分布云图。根据计算结果, 载流板最高温度为 86.7°C, 温升为 69.7 K。

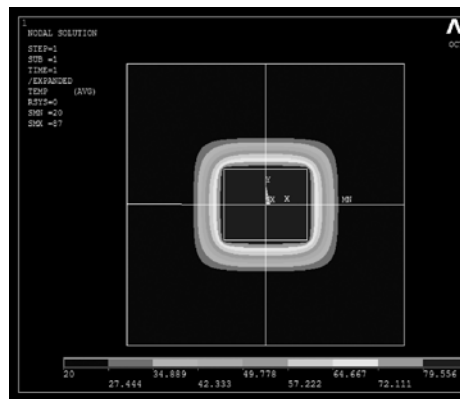


图 4 载流连接板温度仿真图

Fig. 4 Temperature Simulation Diagram of Current Carrying Connection Plate

4 载流连接板发热温度影响因素分析

4.1 载流电流对连接板发热温度的影响

由计算公式(7)可知,载流连接板热源密度 q_v 是影响其温度的主要因素,它来源于连接板之间的接触电阻发热。连接板材质、安装工艺及螺栓紧固程度是影响连接板接之间接触电阻大小的主要因素,而连接板长期高温发热产生的热胀冷缩影响又会进一步使得接触电阻增长趋势加快。还是以上述35 kV 电流互感器载流连接板发热温度分析为例,假设接触电阻 R 不变,外界环境温度 \bar{T} 及散热系数 λ 保持不变,则载流板的发热温度随电流 I 变换而变化,也就是说电气设备的载流连接板在负荷高峰期与负荷低谷期的发热温度有明显的变化。代入表1相关数据,通过有限元仿真计算可以得出不同电流值条件下的连接板发热温度,如图5所示。

4.2 外部环境温度对连接板温升影响

由计算公式(7)可知,载流连接板环境外界环境温度 \bar{T} 及其散热系数 λ 也是影响其温升的主要因素,不同的测温环境连接板温度不同,夏季高温期连接板发热温度与冬季低温期发热温度相差会非常明显。以上述35 kV 电流互感器载流连接板发热温度分析为例,假设接触电阻 R 不变,外界空气散热系数 λ 不变,载流电流 I 保持不变,分析外界环境温度对连接板发热温度的影响。代入表1相关数据,通过有限元仿真计算可以得出不同环境温度条件下的连接板发热温度,如图6所示。当环境温度从 -20°C 上升到 40°C 时,连接板发热温度从 37.8°C 上升到 115.4°C 。

4.3 载流连接板结构对温度影响

如不考虑连接板几何结构产生的电晕对设备的影响,载流连接板表面积大小也是连接板温度重要因素。设备生产厂家对电气设备载流连接板安装尺寸设计上应充分考虑系统断流电流对其温升的影响。从热源密度公式 $q_v = I^2 R/V$ 可知,载流连接板的接触面积大小与计算模型的几何体积 V 和接触电阻 R 都有关,因此热源密度 q_v 受载流连接板的接触面积影响。假设仿真计算模型其它参数保持不变,即通过的电流值 I 、外界环境温度 \bar{T} 及散热系数 λ 保持不变,代入表1相关数据,可通过有限元仿真计算连接板不同接触面积(以实际接触面积为标幺参考值)条件下的发热温度,如图6所示。

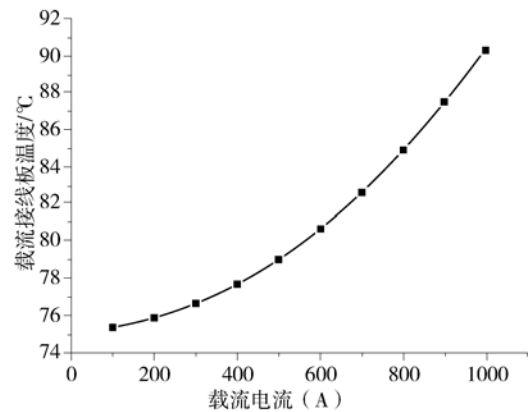


图5 载流连接板温度与电流之间的关系

Fig. 5 Relationship Between Temperature and Current of Current Carrying Connection Plate

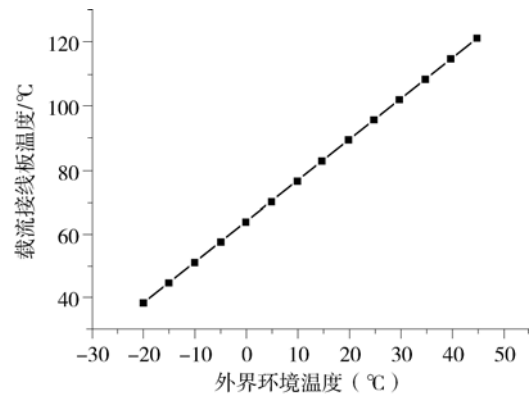


图6 载流连接板温度与环境温度之间的关系

Fig. 6 Relationship Between Temperature and Environment Temperature of Current Carrying Connection Plate

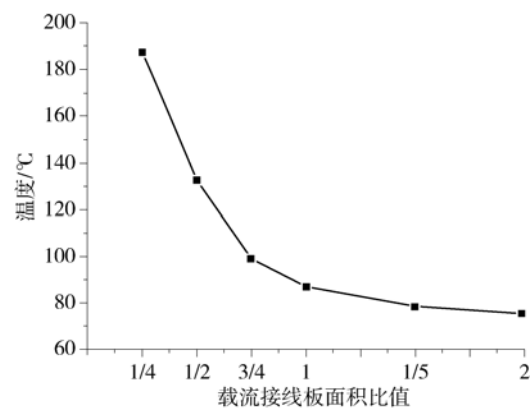


图7 载流连接板温度与接触面积之间的关系

Fig. 7 Relationship Between Temperature and Contact Area of Current Carrying Connection Plate

5 结论

1) 本文提出了高压电气设备载流连接板通过大电流后其发热温度的有限元计算方法,并针对一起35 kV 电流互感器载流连接板发热故障采用 ANSYS

仿真进行了计算分析。重点研究了载流连接板通过的电流大小、外部环境温度及连接板尺寸对其发热温度的影响。

2) 电气设备载流连接板通过的电流大小和外部环境温度是影响其发热温度的主要因素,对红外测温过程中电气设备电流型致热故障判断具有重要的指导意义。

3) 对载流连接板接触面积与发热温度进行了分析,这对实际设计中生产厂家选用高压电气设备一次电流连接板尺寸大小有一定的指导意义。

4) 为保证载流连接板足够的载热稳定性,应减小连接板接触面之间的接触电阻,通过减小金具连接板接触表面粗糙、锈蚀程度或螺栓压紧力度来保证接触电阻在合格范围内。

参考文献:

- [1] 黄正丹,丁建谊,胡建文,等. 变电站电力设备线夹及接头发热原因分析[J]. 科技创业月刊, 2013, 26(8): 11-13.
HUANG Zhengdan, DING Jianyi, HU Jianwen, et al. The Anglicising About Wire Clip and Joint Warming of Electric Power Equipment in Substation [J]. Pioneering with Science & Technology Monthly, 2013, 26(8): 11-13.
- [2] 白玉新. 关于电力设备接点发热的危害及防治[J]. 科学之友, 2011(6): 23-24.
BAI Yuxin. About the Power Equipment Contact Gives Off Heat and Prevention [J]. Friend of Science Amateurs, 2011(6): 23-24.
- [3] 杨曦,李志强. 电力设备热故障分析及对策[J]. 湖南水利水电, 2007(3): 15-17.
YANG Xi, LI Zhiqiang. Analysis and Countermeasures for Hot Failures in Electric Devices [J]. Hunan Hydro & Power, 2007(3): 15-17.
- [4] 夏飞. 母排连接松动的分析和处理[J]. 四川水力发电, 2010, 29(5): 30-32.
XIA Fei. Analysis on Busbar Connection Loosing and Treatment [J]. Sichuan Water Power, 2010, 29(5): 30-32.
- [5] 周密. 变电站红外检测诊断技术的应用[J]. 广西电力, 2007, 30(5): 76-79.
ZHOU Mi. Application of Infrared Detection and Diagnosing Technique in Substations [J]. Guangxi Electric Power, 2007, 30(5): 76-79.
- [6] 吴继平,李跃年. 红外热成像仪应用于电力设备故障诊断[J]. 电力设备, 2006, 7(9): 23-25.
WU Juping, LI Yaonian. Application of Infrared Thermal Imaging Instrument in Power Equipment Fault Diagnosis [J]. Electrical Equipment, 2006, 7(9): 23-25.
- [7] 孙萍,魏立明. 基于红外热像技术的电接触故障诊断[J]. 电气应用, 2008, 27(6): 43-46.
SUN Ping, WEI Liming. Fault Diagnosis of Electrical Connector Contacts Based on Infrared Thermal Imaging Technology [J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(6): 43-46.
- [8] 叶建泗. 红外技术在电力设备发热诊断中的应用[J]. 江苏电机工程, 2001, 20(2): 81-84.
YE Jiansi. The Application of Infrared Technique in Heating Diagnosis of Electric Apparatus [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2001, 20(2): 81-84.
- [9] 张慧源,沈军达,许力. 电力设备温升模型及其在载流故障预测的应用[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 1435-1438.
ZHANG Huiyuan, SHEN Junda, XU Li. Temperature Model of Electrical Equipment and Its Application in Trend Forecast for Current-carrying Fault [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(7): 1435-1438.
- [10] 纽春萍,陈德桂,刘颖异. 交流接触器温度场仿真及影响因素的分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 1826-1830.
NIU Chunping, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Temperature Field Simulation of AC Contactor and Analysis of Its Influence Factors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 1826-1830.
- [11] 何建刚. 论变电设备发热原因及监控诊断方法[J]. 广东科技, 2011(20): 139-140.
HE Jiangan. Analysis of Influence Factors on Electrical Equipment's Temperature and Its Monitoring Diagnosis Methods [J]. GD Science & Technology, 2011(20): 139-140.
- [12] 孙斌,王艳武,杨立. 基于红外测温的异步电机轴承故障诊断[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(1): 50-55.
SUN Bin, WANG Yanwu, YANG Li. Study of Fault Diagnosis of Induction Motor Bearing Based on Infrared Inspection [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(1): 50-55.
- [13] 孙彩华. 传热学中的有限元法数值分析[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2013, 29(1): 67-71.
CUN Caihua. Numerical Analysis of the Finite Element Method in Heat Transfer [J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Science Edition), 2013, 29(1): 67-71.
- [14] 许国良. 工程传热学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 204-223.
- [15] 孔祥谦,王传溥. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 78-125.

(责任编辑 黄肇和)