

电压互感器温度场计算研究

徐龙彬 欧阳姬

(广东电网有限责任公司佛山供电局 佛山 528000)

摘要: 电压互感器是电力系统中重要的测量设备,温度是影响其测量精度的一个主要因素。为了分析电压互感器的温度场分布、提高电压互感器的散热能力,采用 ANSYS 软件与 CFX 软件进行电压互感器的温度场和流体场耦合仿真计算的方法,以 10 kV 电磁式电压互感器为研究对象,建立了简化的温度场仿真计算模型。通过仿真计算,在考虑空气对流散热,采用扫描剖分的条件下,获得电压互感器模型的温度分布及热点温度位置。分析了影响热点温度的因素。计算结果表明,低压顶部绕组是电压互感器温度最高的部位,是温度监测的关键;油的热导率与粘度在正常温度范围内对温度场计算影响不大,可以忽略,侧表面的对流换热系数对热点温度的影响较大。采用增加侧表面换热能力的方法,可以增强电压互感器的散热能力。

关键词: 电压互感器;空气对流散热;温度流体场计算;热点温度;对流换热系数

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Study on temperature field calculation of potential transformer

Xu Longbin Ouyang Ji

(Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co. Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: The potential transformer is an important measuring device in the power system, temperature is one of the main factors affecting the accuracy of its measurement. In order to analyse the temperature field distribution of voltage transformer and enhance the heat dissipation ability of potential transformer, the coupling of temperature field and fluid field are calculated and analyzed by ANSYS software and CFX software. this paper takes 10 kV electromagnetic potential transformer as the research object. A simplified simulation calculation model is established. The simulation is based on scanning and subdivision, and the air convection heat transfer was considered. Through simulation calculation, the cloud chart of the temperature distribution of the potential transformer and the location of hotspot temperature are obtained. The calculation results can provide basis for temperature correction and local temperature rise measurement. At last, the factors affecting the temperature characteristics are analyzed. The results show that, low voltage top winding is the most important part of voltage transformer, and is the key to temperature monitoring. And the thermal conductivity and viscosity of oil have little influence on the temperature field in normal temperature range, which can be ignored. The convective heat transfer coefficient of the side surface has a great influence on the hot spot temperature. The heat dissipation ability of the voltage transformer can be enhanced by increasing the heat transfer capacity of the side surface.

Keywords: potential transformer; air convection heat dissipation; temperature fluid field calculation; hot spot temperature; convective heat transfer coefficient

0 引言

电压互感器与比较特殊的变压器类似,主要是将一次侧高电压与二次侧的保护、控制及测量等设备隔离开来,也可作为电源给继电保护设备供电等^[1-3],是电力系统中电压参数的测量和电力系统控制,特别是在继电保护领域中非

常重要的设备^[4-5]。

近几年出现了许多新型电压互感器,具有符合绝缘要求、解决磁饱和问题和动态响应范围大等优点,但是新型互感器仍存在模数转换过程误差较大、二次电压异常及造价成本高等问题,因此目前的市场上电磁式互感器占主导地位^[6-8]。

电磁式电压互感器是目前应用最为广泛的一种电压互感器^[9-12], 不过随着电力系统的发展, 这类互感器的缺陷也逐渐显现, 研究发现影响测量准确度的因素主要是温度, 变化的温度会对电压互感器的铁芯产生一定的影响, 改变其磁导率使电压互感器产生一定的误差; 同时温度的变化还会使铜制绕组的电阻发生变化, 影响电流互感器的误差; 一次侧输电线路通过固定电流长时间运行产生大量的热传导至电压互感器的二次侧线圈后, 导致次级线圈温度升高, 这会导致电压互感器精度降低, 产生误差。因此对电压互感器的温度监控尤为重要^[13-14]。

目前对于高压设备比如电压互感器的发热研究较少, 主要集中在测温设备的开发^[15-16], 广泛使用的温度测量方法包括传统的温度传感器测温法、红外测温法和光纤光栅测温法。判断电压互感器是否过热一般也是直接采用手摸表面感知法。随着计算机技术的飞速发展, 通过多物理场耦合计算的有限元分析等数值模拟算法^[17-20]逐渐成为主流。

因此, 本文基于电磁感应定律考虑空气的对流散热对 10 kV 电压互感器模型进行合理简化, 仿真计算电磁式电压互感器的电磁温度流体场, 确定电压互感器整体的温度分布特性。最后分析影响电压互感器温度的相关因素, 得到各个物理参数对热电温升的影响规律, 对互感器的散热提出合理建议。

1 温度流体场计算理论

1.1 温度场控制方程

电压互感器内的热量传递有 3 种基本方式: 热传导、热对流与热辐射。3 种传热方式的方程分别如下所示:

$$Q_1 = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

$$Q_2 = h_c A (T_w - T_f) \quad (2)$$

$$Q_3 = \delta_0 A \varepsilon_0 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为热传导热量、热对流换热量和热辐射换热量; A 为换热面积; λ 为导热系数; h_c 为对流换热系数; T_w 为固体表面温度; T_f 为周围空气温度; δ_0 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 其值为 $5.669 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_0 为系统发射率; T_1 为物体表面热力学温度; T_2 为环境温度的热力学温度。

1.2 流体场控制方程

流体问题的求解主要依赖于计算流体力学的建立, 而流体场内散热介质流动及传热的数学模型主要基于三大定律^[21], 即质量守恒定律、牛顿第二定律(动量守恒定律)和热力学第一定律(能量守恒定律)。质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v = 0 \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度, v_x 、 v_y 、 v_z 分别是流体流速 v 沿 x 、 y 、 z 3 个方向的分量, 满足 $v = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k}$ 。

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (5)$$

式中: u 、 v 、 w 为流速在 x 、 y 、 z 方向上的分量; U 为流体速度; ρ 为流体密度; μ 为流体动力粘度; p 为流体压力; S_u 、 S_v 、 S_w 为动量守恒方程广义源项。能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i U) = \text{div}(k \cdot \text{grad} T) - p \cdot \text{div}(U) + \Phi + S_T \quad (6)$$

式中: i 为流体内能; k 为导热系数; T 为流体温度; p 为流体压力; S_T 为热源。

2 仿真计算与分析

本文所研究的 10 kV 电磁式电压互感器为闭式的电压互感器, 其结构与变压器模型基本相同。

2.1 仿真模型

电磁式电压互感器包括密闭箱、绝缘油、铁芯和高低压绕组等。电压互感器的模型如图 1 所示。互感器外壳尺寸为 $230 \text{ mm} \times 190 \text{ mm} \times 257.5 \text{ mm}$, 铁心为“日”字形结构, 高低压绕组通过围屏和撑条绕组在铁心中柱上, 同时高压绕组分为 9 层。

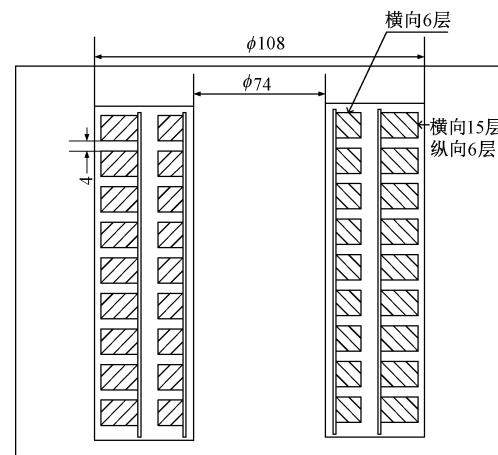


图 1 电压互感器模型示意图

互感器绕组的各结构具体尺寸如表 1 所示。其中, 高压绕组与低压绕组都分为 9 饼, 每饼高度为 10 mm, 饼间间隔 4 mm。根据表 1 建立了互感器简化模型, 忽略绕组表面绝缘纸与撑条垫块的影响, 绕组紧贴油屏。互感器仿真模型如图 2 所示, 图 2 中只显示互感器的高压绕组、低压绕组与铁芯。

表 1 电压互感器绕组结构尺寸

绕组	内径/mm	外径/mm
高压	绕组	56
	油屏	52
低压	绕组	39
	油屏	35

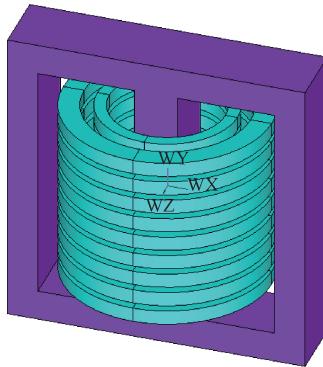


图 2 电压互感器仿真模型

2.2 材料参数

各部件材料的选取均与实际的电磁式电压互感器一致。其计算材料参数如表 2 所示。

表 2 材料参数

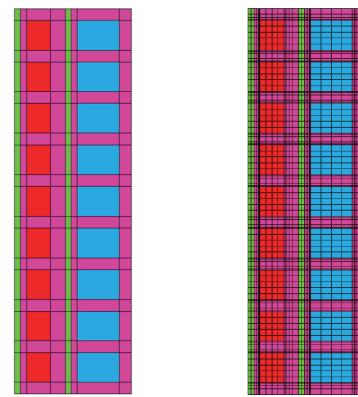
项目	电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	比热率/ ($J \cdot G^{-1} \cdot K^{-1}$)	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	热导率/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
铁芯	2.7×10^{-6}	6 000	7.87	46.52
绕组	2.135×10^{-8}	1	8.9	392
绝缘油	—	1	0.895	0.16

2.3 仿真计算

1) 网格划分与边界条件确定

为了得到程序化的网格划分方法,利用 ANSYS 软件提出了扫描剖分的方法,对本模型进行六面体网格划分时,需要先建立仿真模型的二分之一截面模型,如图 3 (a) 所示。为了保证计算结果的合理性,有必要对油道的网格进行精确控制,确保油道上的计算能够达到较高的精度。但是对于局部网格精确势必会增加整体网格的数量,而网格数量直接决定了计算的时间。因此应当选择合适的剖分网格。先对该截面进行剖分预处理,确定需要加密的部位、尺寸等。对于本模型而言,传热介质为油,因此油流的流动对于最终温度分布的结果有很大影响,在本模型中对水平油道、竖直油道和上下端部油流都进行了加密处理。然后对该仿真截面进行加密网格划分,划分的网格如图 3 (b) 所示。

二分之一截面剖分完成后,选取柱坐标系,Z 方向为竖直方向,R 方向为水平方向,进行整体旋转即得绕组及油道



(a) 线圈部分轴对称模型 (b) 轴对称模型网格分布

图 3 电压互感器二维轴对称模型

的六面体网格,旋转时每 90° 分为 15 段。然后单独对铁心及外壳进行网格划分,由于铁心、外壳为固体域,网格质量对计算结果影响不大因而采用四面体网格。最终得到电压互感器内部的网格剖分如图 4 所示。

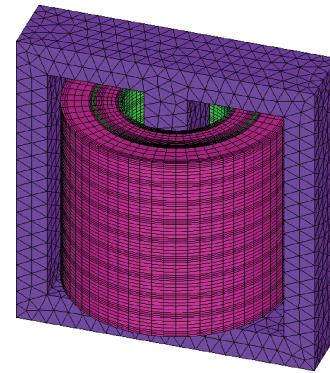
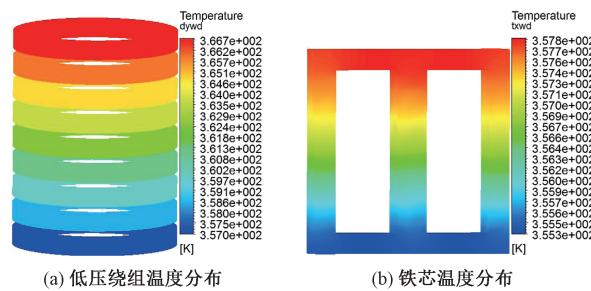


图 4 网格划分

2) 仿真结果分析

实际条件下,互感器高低压绕组均为热源,且各个面对流换热系数由于摆放位置等原因均不相同,在高低压绕组均加载热源 40 W,上表面换热系数为 $10 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 、下表面换热系数为 $4 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 、侧表面换热系数为 $14 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。仿真计算的结果如图 5 所示。

从温度分布图可以得出随着绕组高度的上升,温度逐渐升高,这主要是由于油流在浮升力的作用下向上流动,将绕组中产生的热量依次带入互感器的上部,导致互感器上



(a) 低压绕组温度分布

(b) 铁芯温度分布

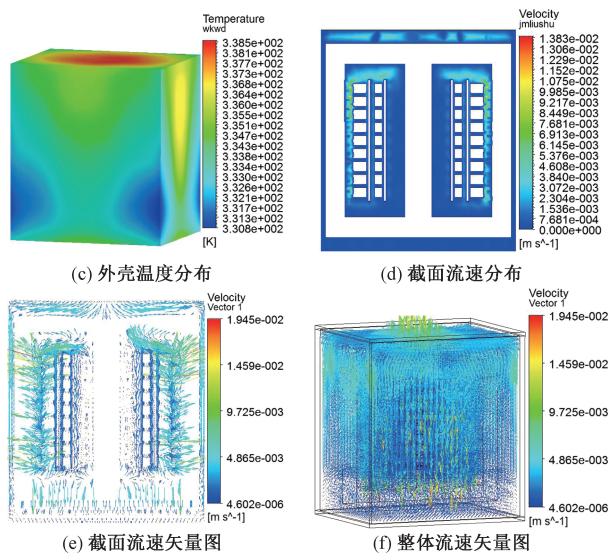


图 5 温度场、流体场结果

部温度较高。最高温度处于低压顶部绕组,这是由于低压绕组位于高压绕组和铁心之间,产生的热量都会向低压绕组传递。针对本模型来说是全封闭,顶部的流速也不是很高,因此热点温度的分布是合理的。

从流速图可以看出,油流在浮升力作用下向上流动到达顶部后,在从靠近壁面处向下流动。靠近热源处流速较大,整体流速不高,而对于水平油道而言,流速非常小,近乎于静止状态,在油流上升的过程中基本不会流过水平油道,因此可以通过采取措施来合理控制油流流向,均匀分配油流流过水平油道,来有效控制电压互感器各绕组和热点的温升。

3 散热因素分析

3.1 油热导率对热点温度的影响

根据油的热导率随温度变化曲线可知,油热导率在正常温度范围内的变化很小,选取 5 个热导率,考虑曲线的两个端点和极端的情况,热导率数值分别为 0.1、0.12、0.14、0.16 和 0.3。参照前文的计算方法选取上节计算工况,得出了各个热导率下互感器的热点温度如表 3 所示。

表 3 不同热导率结果对比表

热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热点温度/K		
	低压绕组	高压绕组	外壳
0.1	382.5	380.2	340.6
0.12	374.1	371.0	339.8
0.14	371.7	369.6	339.7
0.16	366.7	364.8	338.5
0.3	356.6	355.0	338.3

响比较大。互感器热点温度随着热导率的增加而降低,这是因为热导率增加,通过热传导散出的热量也增加,热点温度随之降低。

一般来讲,互感器油温升不会超过温度变化曲线中给出的限值,在这个温度范围内油的热导率变化非常小,对热点温度的影响也较小。因此在下文计算中将热导率设置成常数。

3.2 油粘度对热点温度的影响

考虑油粘度对温度变化的曲线的两个端点和极端的情况,选取粘度 0.004、0.008、0.016、100 和固体域(该固体域热导率、比热容等物性参数与油相同),同时为了比较油和空气两种不同散热介质对热点温度的影响,计算中也考虑了传热介质为空气的情况。参照前文的计算方法,每种粘度下互感器的热点温度如表 4 所示。

表 4 不同热导率结果对比表

粘度/ (Pa·s)	热点温度/K		
	低压绕组	高压绕组	外壳
1.85×10^{-5} (空气)	601.7	602.4	349.3
0.004	365.7	364.2	339.2
0.008	366.7	364.8	338.5
0.016	368.6	366.2	338.8
100	474.6	464.9	349.4
固体域	536.4	523.9	352.2

计算结果表明,随着粘度的增加,高低压绕组的热点温度逐渐降低,粘度的增加影响了油流的对流散热能力。但是当粘度在限值范围内变化时,热点温度变化非常小,说明计算中油粘度随温度变化的因素对于热点温度的影响较小。这有两方面的原因,首先在正常油温变化范围内,粘度的变化本身就很小;其次由于油的流速很低,粘度的变化对于油流流速产生的影响不明显。因而在仿真计算中也可以考虑将粘度设为一个常数。

3.3 外壳对流换热系数对热点温度的影响

分别改变外壳各侧的对流换热系数,分析它们对热点温度的影响。当改变某个面的对流换热系数时,其他面的换热系数保持不变,即与上节计算工况相同,热点温度如表 5 所示。

计算结果表明,当上表面对流换热系数从 5 W/(m²·K)变化至 20 W/(m²·K)时,最高热点温度仅下降了 7.3 °C,当下表面对流换热系数从 2 W/(m²·K)变化至 8 W/(m²·K)时,最高热点温度仅下降了 3 °C,当侧表面对流换热系数从 7 W/(m²·K)变化至 28 W/(m²·K)时,最高热点温度下降了 40.4 °C,同样是将对流换热系数增大 2 倍至 4 倍,上下表面换热系数对热点温度的影响不大,而侧面换热系数对热点温度的影响较大。由于侧面表面积大,换热面积大,换热能力强,因此对模型整体温升的影响较强。说明在考虑

计算结果表明,改变油热导率对互感器热点温度的影

表 5 不同表面对流换热系数结果对比表

互感器 外壳	对流换热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	热点温度/K		
		低压绕组	高压绕组	外壳
上表面	5	369.9	367.9	346.8
	10	366.7	364.8	338.5
	20	362.6	360.8	335.9
下表面	2	367.9	366.0	342.5
	4	366.7	364.8	338.5
	8	364.9	368.8	337.2
侧表面	7	391.6	389.5	363.6
	14	366.7	364.8	338.5
	28	351.2	349.4	356.7

增加互感器散热能力时,通过增加侧表面的对流换热系数比如在互感器侧面增加风冷设备或水冷设备是比较简单有效的方法。

4 结 论

本文在考虑空气的对流散热的基础上,简化了电压互感器模型,计算了电磁式电压互感器的温度流体场,得到了电压互感器的温度分布。给出了以下结论。

1)建立了电磁式电压互感器的有限元分析三维模型,对电压互感器的温度场和流体场进行了数值计算。计算结果表明,低压顶部绕组是电压互感器温度最高的部位,是温度监测的关键。

2)研究了油的热导率、粘度与外壳对流换热系数对温度场计算的影响。结果表明,侧表面对流换热系数对热点温度的影响比较大,可以通过增加侧表面的换热能力比如增大散热面积来增强互感器的散热能力。

参考文献

- 陈慈萱. 电气工程基础 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- 岳国义. 电力互感器 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- 牟道槐, 李玉盛, 马良玉. 发电厂变电站电气部分 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006.
- 陈建民, 邱智勇, 韩学军. 大电网继电保护技术应用与发展 [J]. 华东电力, 2007(11): 7-14.
- 林莉, 王军兵, 唐凤英, 等. 10 kV 电压互感器损坏的仿真计算研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 51-55.
- 董永波. 传统互感器状态监测系统的设计 [D]. 济南: 济南大学, 2016.

- 赵柯明. 嵌入式电流互感器温度特性及其补偿方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- 乔立凤, 高敬更, 温定筠, 等. 电容式电压互感器二次电压异常分析处理 [J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 116-118.
- GOLLEE R, GERLACH G. FEM-based method for analysis of the dynamic behavior of AC contactors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000(41): 1337-1340.
- 高艳丰, 苏秀萍, 同红艳, 等. 电磁式电压互感器的电磁场分析及优化设计 [J]. 江苏电器, 2007(1): 16-18, 44.
- 索保锋, 王洪峰, 同志勇. 电压互感器开口三角接线的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 130-132.
- 茅雷, 姚衡宇. 一起电压互感器烧毁事故分析及反思 [J]. 电力安全技术, 2006(10): 27-28.
- 苏凤飞, 高鹏, 周浩. 几种电压互感器典型故障类型分析 [J]. 陕西电力, 2014, 42(1): 65-68.
- 张丰, 郭碧媛. 10 kV 三相电磁式电压互感器并列运行时烧毁原因分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 108-111.
- 时斌. 光纤传感器在高压设备在线测温系统中的应用 [J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 169-173.
- 韩耀振, 周风余, 马荣琳. 基于 CAN 总线与射频技术的高压开关柜温度监测系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2009(11): 55-58.
- 廖才波, 阮江军, 刘超, 等. 油浸式变压器三维电磁-流体-温度场耦合分析方法 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 150-155.
- 马成廉, 王乐天, 李波, 等. 基于 ANSYS 的陕北换流站直流接地极地电位分布计算 [J]. 中国电力, 2018, 51(5): 52-60.
- 温志伟, 傅德平, 顾国彪. 浸润式混合强迫内冷的蒸发冷却汽轮发电机定子三维温度场的仿真分析 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(3): 13-17.
- 邹斌. 基于有限元法的配电柜温度场研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2009.
- 陈荆洲, 杜志叶, 王栋, 等. 高压开关柜温度场数值分析 [J]. 电工电能新技术, 2018, 37(1): 38-44.

作者简介

- 徐龙彬, 工程师, 主要从事电网建设、配网规划计划工作。
E-mail: xulongbin007@qq.com;
- 欧阳姬, 工程师, 主要从事电网建设、电力造价工作。
E-mail: 47501920@qq.com