

文章编号: 2095-2163(2020)02-0250-06

中图分类号: TM591

文献标志码: A

基于 ANSYS 的中压开关柜电磁-温度场耦合仿真分析

李汉伟, 曾国辉, 刘瑾

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 为研究中压开关柜在正常运行工况下的温升情况,以 12 KV 开关柜为例,首先利用三维绘图软件 Proe 对开关柜进行三维建模,其次利用有限元软件 ANSYS 对开关柜进行电磁、温度场仿真分析,得到开关柜壳体和导体上的欧姆损耗分布云图及主回路导体上的温度场分布云图。对该型号开关柜进行温升试验,并将试验结果与计算结果相对比,结果表明,仿真计算误差在 10% 以内,满足工程实际精度要求。

关键词: 中压开关柜; ANSYS; 温升; 欧姆损耗; 温度场; 分布云图

Electromagnetic-temperature field coupling simulation analysis of medium voltage switchgear based on ANSYS

LI Hanwei, ZENG Guohui, LIU Jin

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In order to study the temperature raising of medium voltage switchgear under normal operating conditions, taking 12 KV switch cabinet as an example, firstly the paper uses the 3D drawing software Proe to construct 3D model of the switchgear. Secondly, the finite element software ANSYS is used to simulate and analyze the electromagnetic and temperature fields of the switchgear. Finally, the paper obtains the ohmic loss distribution cloud diagram on the switch cabinet shell and the conductor and the temperature field distribution cloud diagram on the main circuit conductor. A temperature raising test is conducted on this type of switchgear, and the test results are compared with the calculated results. The results show that the simulation calculation error is within 10%, which meets the actual accuracy requirements of the project.

[Key words] medium voltage switchgear; ANSYS; temperature raising; ohmic loss; temperature field; cloud map

0 引言

随着近年来中国电力行业的发展,电网的发电量和电能消耗的持续增长,中压配电开关设备的产量不断增加。同时,电力系统的迅速发展也对中压开关设备小型化、模块化提出了新的要求^[1]。

作为重要的电气设备,开关柜的主要作用是接受和分配电能,其能否正常运行直接关系到电能供应的稳定性和可靠性。当开关柜尺寸变小时,由于其柜体设计紧凑且内部间隔防护等级较高等原因,开关柜的散热环境不容乐观。开关柜内部局部区域的温度比较高,严重时可能会影响到开关柜的稳定运行,危害电网的安全。因此,有必要对开关柜内部整体的温升情况做出相关的研究,并进行温升优化设计。

针对开关柜内部的温升情况,学界已经做了大量的研究工作。陈炎亮^[2]针对中压开关柜温升问题,提出了从减少发热量和提高散热效果方面的降

低温升的措施。陈孟^[3]针对自然对流换热系数比较难求解的情形,提出了结合自然对流换热系数经验计算公式和 ANSYS 有限元软件结构稳态热分析,通过 APDL 语言编程进行迭代计算,从而求得自然对流换热系数的方法。徐立群等人^[4]从限制发热和改善散热两个方面对 KYN28A-12kV/4000A 开关柜进行结构完善,对开关柜进行简化建模,并分析了温度场。最后的结果表明结构改进方案是合理的,但是模拟结果与实际试验不太一致。

本文在前述研究的基础上,以 KYN28A-12(Z) 型开关柜为研究对象,利用 ANSYS 有限元软件对其进行涡流、温度场耦合仿真分析,并结合温升试验^[5]验证仿真结果的合理性。

1 开关柜三维建模

1.1 开关柜基本结构

KYN28A-12(Z) 基本结构如图 1 所示,开关柜的结构尺寸为 1 450 mm (长) × 800 mm (宽) ×

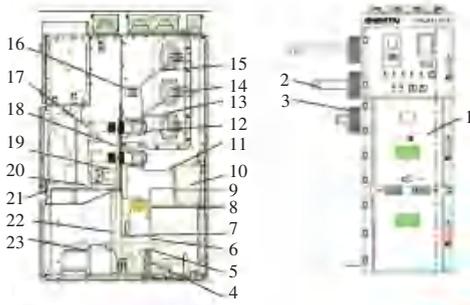
基金项目: 国家自然科学基金(61701296,U1831133);上海市自然科学基金(17ZR1443500)。

作者简介: 李汉伟(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:高压电力设备绝缘仿真。

通讯作者: 曾国辉 Email: zenggh@sues.edu.cn

收稿日期: 2019-10-27

2 360 mm(高)。



1-柜体装配;2-主母线;3-套管;4-避雷器;5-电压互感器排;6-避雷器排;7-接地开关接地排;8-接地开关;9-下分支排;10-电流互感器;11-触头盒到互感器排;12-触头盒;13-上分支排 C;14-上分支排 B;15-上分支排 A;16-绝缘子 140 mm;17-真空断路器手车;18-一次静触头;19-活门及连锁装配;20-手车接地排;21-接地开关操作联锁装置;22-手车接地排;23-熔管夹

图 1 KYN28A-12(Z) 开关柜结构图

Fig. 1 KYN28A-12(Z) switchgear structure

KYN28A-12(Z) 型中压开关柜外壳防护等级为 IP4X, 其各部件的温升要求见表 1。

表 1 开关柜各部件温升要求

Tab. 1 Temperature rise requirements of various components of the switchgear

参数/K	数值
固定连接(镀银)	75
弹簧连接(镀银)	65
壳体(可触及)	30
壳体(不可触及)	40

1.2 开关柜模型简化

本文分析的中压开关柜的整体设计模型较为复杂, 三维模型中包含很多形状复杂的钣金结构及细小零部件^[6]。如果对原始模型不加以简化就直接进行仿真计算, 就会浪费大量的计算时间, 同时得到的结果也不一定精确。因此在简化模型的过程中, 主要考虑发热严重的部分, 对于发热量很小的部位进行忽略, 如一些微小的电气元器件、螺母等。这样做的话, 会大大加快仿真速度, 同时对仿真的精度也不会有很大的影响。简化前后的开关柜整体模型及简化后的三相导体部分如图 2 所示。

在对导体简化过程中, 应遵循简化后的导体模拟回路电阻值与实际测量值一致的原则进行简化。其中断路器导体部分的梅花触头结构比较复杂, 采用等效电阻圆柱体进行替代。简化后导体及断路器部分的模拟回路电阻值与实际测量值见表 2。由表 2 分析可知, 简化后的模型回路电阻值与实测值非常接近。

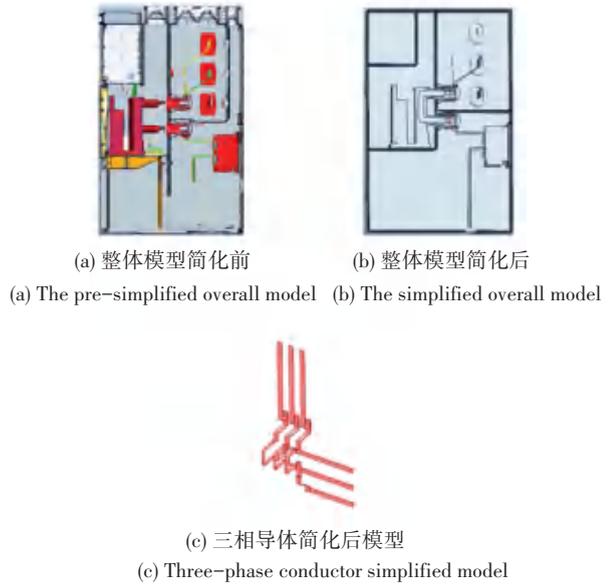


图 2 开关柜模型简化前后对比图
Fig. 2 Comparison of the switchgear model before and after simplification

表 2 三相导体的电阻值

Tab. 2 Resistance values of three-phase conductors

相位		A	B	C
主回路电阻值/ $\mu\Omega$	实际值	88.42	84.97	90.55
	模拟值	93.20	80.51	95.22
断路器电阻值/ $\mu\Omega$	实际值	18.16	17.56	17.68
	模拟值	20.10	15.73	19.15

2 计算理论

2.1 电磁场计算理论

在交变电流通过导体时会产生变化的磁场, 原始的电流流动会被产生的磁场所影响, 这一系列的过程可以用 Maxwell 方程去描述, 包括: 安培定律、法拉第电磁感应定律、高斯电通量定律, 高斯磁通量定律。这里将用到如下数学公式:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (3)$$

其中, \vec{H} 表示磁场强度矢量(A/m); \vec{J} 表示电流密度矢量(A/m²); \vec{E} 表示电场强度矢量(V/m); \vec{B} 表示磁感应强度矢量(Wb/m²); t 表示时间(s)。

辅助方程可表示为:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (5)$$

其中, μ 为磁导率, H/m; σ 为电导率, $1/\Omega\text{m}$ 。

电磁场部分采用的是 Maxwell eddy current 求解器模块, 分析由于导体中时变电流而引起的时变磁场或者外部交变的磁场源^[7]。在定义了电流源以及必要的边界条件后, Maxwell eddy current 求解器模块会采用结合 2 种方法的模式计算磁场。在导体内部存在涡流的情况下, 会采用直接法去求解磁场强度^[8]。运算时需参考如下数学公式:

$$\vec{N} \times \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \vec{N} \times H = j\omega\mu H, \quad (6)$$

磁标矢量法计算磁场强度:

$$\vec{N} \cdot (\mu \vec{N} \phi) = 0, \quad (7)$$

对于未指定涡流的对象, 求解器将采用磁标势法进行磁场计算。如果需要涡流计算, 则求解器采用直接法计算涡流。在边界侧, 求解器强制 H 连续, 在模型中, 进行连续磁场计算, 因为 Maxwell 软件采用自适应网格技术, 计算错误可以减少到任何指定值。能量计算误差小于 1%。

通过计算电磁场, 能够运算求得开关柜内部导体的欧姆损耗, 对应数学公式可写为:

$$P = \frac{1}{2\sigma} \int J \cdot J^* dv. \quad (8)$$

使用 Ansys 磁场分析模块 Maxwell eddy current 求解器对开关柜进行损耗计算。磁场分析模型如图 3 所示。

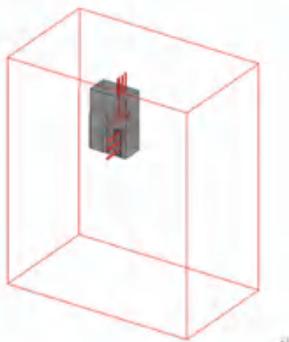


图 3 开关柜磁场分析模型

Fig. 3 Magnetic field analysis model of the switchgear

2.2 温度场计算理论

热能传递有 3 种基本方式: 热传导、热对流和热辐射^[9-10]。由于开关柜内部相对密闭的环境, 导体部分的主要散热方式是热传导, 并存在一些热对流和热辐射。三维稳态热传导方程如下所示:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -q. \quad (9)$$

其中, T 表示温度(K); λ 表示热导率(W/m·k); q 表示单位体积的热流量(W/m³)。

在稳态热场计算中, 通过对材料设置导热系数来计算传导方程。但对于热对流和辐射, 在材料表面设置对流系数和热辐射系数相当于对流和辐射过程。实际上, 这两个系数对计算中的温升有重要影响。

由于开关柜内部不同部位散热环境的差异, 真空断路器导体梅花触头部位以及上下分支排部位的对流换热系数各不相同, 在本文中上分支排的对流换热系数设为 3, 下分支排对流换热系数设为 6, 断路器梅花触头部位由于散热条件较差, 设为 1, 导体辐射散热系数设为 2, 断路器部件由于有绝缘件包覆, 散热系数设为 0.5。

3 仿真结果分析

3.1 电磁场计算结果分析

本文首先在 ANSYS Maxwell 中采用 eddy current(涡流场)求解器进行分析, 在计算中设定开关柜的电流为额定电流的 1.1 倍, 即 1 375 A(温升实验时的电流), 频率为 50 Hz, 三相之间的相位差为 120°。计算出导体和壳体的欧姆损耗功率, 接着将损耗数据导入稳态热分析模块, 最后求解出导体的温度场分布情况。在 ANSYS 中建立的耦合工程如图 4 所示。



图 4 ANSYS 中建立热电耦合工程图

Fig. 4 Hermoelectric coupling engineering diagram established in ANSYS

开关柜导体欧姆损耗如图 5 所示。图 5 表明, 导体欧姆损耗最大的地方在动静触头部位, 原因在于此处结构复杂, 接触电阻比较大。开关柜壳体欧姆损耗如图 6 所示。由图 6 可以看出, 在导体通过壳体的部位, 壳体的欧姆损耗比较大, 在离导体较远的部分, 壳体的欧姆损耗较小; 这表明壳体上的欧姆损耗与壳体和导体之间的相对距离有关。

通过仿真计算, 可以分别得到导体和壳体上的欧姆损耗功率值, 见表 3。

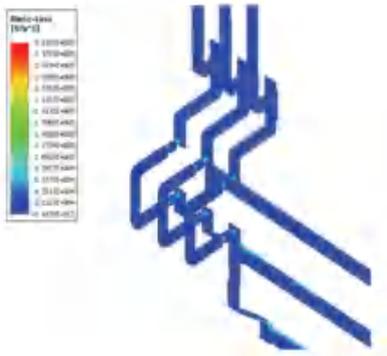


图 5 开关柜导体欧姆损耗图

Fig. 5 Ohmic loss diagram of the switchgear conductor

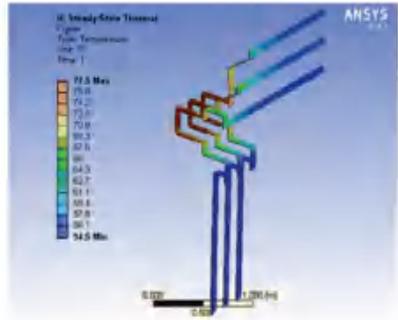
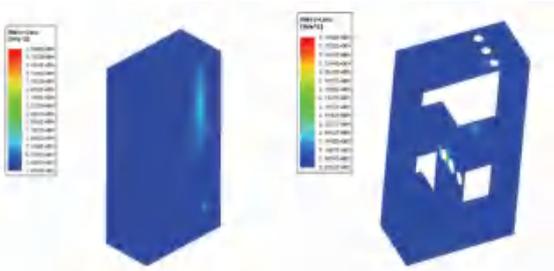


图 7 导体的温度场分布图

Fig. 7 Temperature field distribution of the conductor



(a) 壳体外欧姆损耗分布 (b) 壳体内部欧姆损耗分布
 (a) Ohmic loss distribution outside the casing (b) Ohmic loss distribution inside the casing

图 6 开关柜壳体欧姆损耗

Fig. 6 Ohmic losses of the switchgear cabinet

表 3 开关柜整体欧姆损耗功率

Tab. 3 Overall ohmic loss power of the switchgear

类别	欧姆损耗	
	导体	壳体
功率 p/w	360.28	100.56

3.2 温度场计算结果分析

在对开关柜进行电磁场计算后,将得到的损耗数据作为热源进行温度场计算,得到导体温度场分布如图 7 所示。由于中间 B 相的散热性比 A、C 相的差,所以 B 相母排的温度高于两边的母排,温度最高点在 B 相的断路器动静触头部分,为 77.5 °C,因为动静触头附近连接点较多,导致导体的接触电阻较大,所以温度值较高。同时由于柜内壳体结构的阻挡,所以导体部位有比较显著的高低温度之分。温度最高的部位在断路器室,其次为仪表室,母线室。

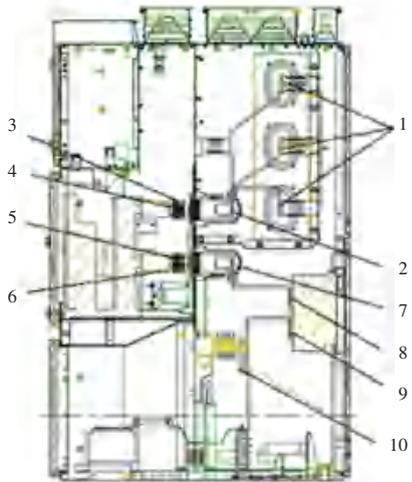
依据国标 GB/T11022-1999 将该型号的开关柜

样机进行温升试验,试验电流为开关柜额定电流 1 250 A 的 1.1 倍,即为 1 375 A。温升试验状态见图 8,图 9 是温升布点示意图。



图 8 温升试验状态图

Fig. 8 Temperature rise test state diagram



1-母线排连接点;2-母线与上静触头连接点;3-上梅花触头点位;
 4-上触壁点位;5-下触壁点位;6-下梅花触头点位;7-下静触头连接点;
 8-互感器进线连接点;9-互感器出线;10-短接排连接点

图 9 温升点位布置图

Fig. 9 Temperature rise point layout

在实验完成后将得到的布置点位实际数值与仿真数值进行汇总对比,数据见表 4。图 10 是三相仿真值与实测值对比图。

表4 三相仿真与实测温升数据对比表

Tab. 4 Comparison table of three-phase simulation and measured temperature rise data

试验布置点位	A相温升数据对比			B相温升数据对比			C相温升数据对比		
	仿真值/℃	实际值/℃	误差/%	仿真值/℃	实际值/℃	误差/%	仿真值/℃	实际值/℃	误差/%
1	60.3	61.7	2.3	62.4	62.5	0.2	61.1	61.8	1.1
2	71.4	70.7	1.0	70.7	71.5	1.1	70.2	70.8	0.8
3	77.4	72.0	7.5	75.0	72.5	6.2	74.0	72.5	2.0
4	77.3	73.9	4.6	75.5	73.6	2.6	74.4	70.1	6.1
5	75.6	70.9	6.6	74.7	69.6	7.3	73.7	69.7	5.2
6	74.5	71.3	4.5	74.0	69.6	6.3	73.1	69.3	5.5
7	62.1	60.8	2.1	63.2	61.7	2.4	62.5	62.0	0.8
8	58.7	56.9	3.2	59.0	57.3	3.0	58.0	56.7	2.3
9	55.4	52.9	4.9	56.0	52.8	6.1	55.0	52.7	4.4
10	54.7	52.2	4.8	56.2	52.9	6.2	54.6	51.0	5.9

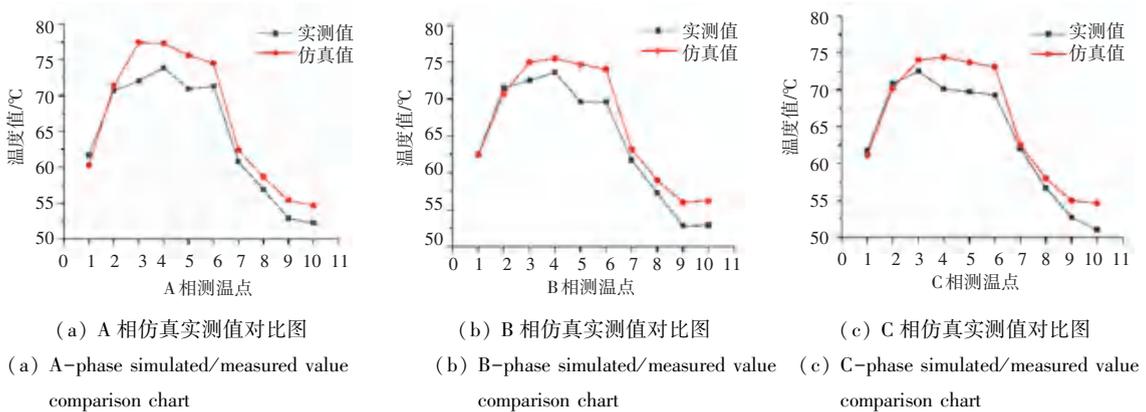


图10 各相实测值与仿真值对比图

Fig. 10 Comparison of measured values and simulated values of each phase

从表4中可以看出,仿真与实际值误差最大的地方在点位3,即A相上梅花触处,大小为7.5%。究其原因在于梅花触头结构复杂,模型等效简化过程中存在的误差较大。从图10中可以看出,误差较大的地方主要集中在3-6点,即为断路器部分的点位。总体上仿真与实际值误差控制在7%左右,符合工程标准。该仿真方法结果正确,误差较小,对该类型开关柜温升设计优化具有指导性作用。

4 结束语

(1)本文首先对中压开关柜进行建模、简化,在有限元软件ANSYS中仿真出其主回路温度场分布情况,并且与实测值进行对比,验证了仿真的准确程度。其中,使用Proe进行建模,然后将模型导入ANSYS中降低了工作复杂度,提高了工作效率。

(2)对于梅花触头等结构复杂的零部件,本文提出采用等效电阻法以轴对称圆柱体替代梅花触头结构。该方法简便,有利于仿真计算,大大简化了建

模过程和计算难度。

(3)文中提出的仿真方法计算出的结果与实验值对比总体误差控制在10%以内,表明仿真方法正确,满足工程实际精度要求。仿真结果中仍有部分点的误差较大,但是总体精度高,误差小,在后续的研究中还要继续完善。仿真得到的结果对开关柜的设计具有指导性作用,可以作为辅助研发的手段,缩短研发周期,也可以为其他型号的开关柜设计提供参考。

参考文献

- [1] 李晓英,赵中亭,刘洋. 固定绝缘环网柜的发展[J]. 电气制造, 2015(1):32.
- [2] 陈炎亮. 降低中压移开式开关柜温升的措施[J]. 电工技术, 2015(10):13.
- [3] 陈孟. 基于ANSYS的自然对流换热系数计算方法研究[J]. 现代计算机(专业版), 2016(11):24.
- [4] 徐立群,申亮,倪福生. KYN28A-12KV/4000A开关柜的结构改进与温度场分析[J]. 高压电器, 2017, 53(3):254.
- [5] 钱亮. 开关柜温升实验方法研究[J]. 科学技术创新, 2018(17): 154.