

[变压器]

电力变压器结构件损耗及温度场研究

文/黄浩¹ 庾思黎¹ 杨立¹ 辛子元² 李通博¹

1. 中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司；2. 沈阳工业大学电气工程学院

以一台500 kV变压器为研究对象，采用电-磁-温度场耦合的方法，计算了高低额定分接下变压器各结构件的磁通密度分布，通过计算得到的结构件损耗为温度场的热源，进行了温度场的分析；对变压器产品进行空载、负载试验，用光纤对变压器内部热点温度测量，利用红外扫描仪对其外部热点温度测量。将实验数据与解析法、多物理场耦合法的计算结果对比分析，得出本多物理场耦合法的计算结果更接近实验值。

电力变压器、电抗器等电磁装置是电力系统中最重要的设备，是保证供电可靠性的基础。随着电力变压器电压等级和容量的不断提高，其电、磁、热、力等问题也愈发突出，如电力变压器负载损耗增加、电力变压器运行温度增高、电力变压器运行噪声增大等现象，会影响电力变压器的稳定运行。因此有必要对电力变压器的损耗、温升进行深入研究。

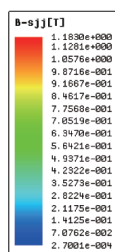
电力变压器的漏磁分析首先要掌握其结构件材料电磁特性，武汉大学的邓永清等人基于变压器瞬态热点温度计算模型，利用L-M算法对变压器的热特性参数进行寻优^[1]；河北交通职业技术学院的孔庆奕等人研究了运行多年后电工钢片的磁特性与新的电工钢片之间的差异，为分析电力变压器长期运行特性提供了基础数据^[2]；宝山钢铁股份有限公司的王晓燕工程师对立体卷铁心变压器的磁特性与空载损耗展开了分析研究，给出了不同服役状态下硅钢片、变压器铁心等的磁特性与损耗特性^[3]；V. M. Jimenez-Mondragon等人提出了一种基于二维笛卡尔和轴对称的有限元模型，采用改进节点分析法对三相电力变压器进行的分析^[4]；姜宇琦等人采用表面阻抗法对电力变压器夹件的涡流损耗进行了计算

与分析^[5]；Y. B. Zhang等人采用电-磁-热-流体有限元耦合方法，研究了油浸式电力变压器的热性能^[6]。本文采用电-磁-温度耦合的方法，以一台1 190 MV·A/500 kV电力变压器为研究对象，建立多物理场耦合的三维仿真模型，对电力变压器电场、磁场和温度场进行了耦合仿真，并对其在空载、负载条件下进行了试验研究，测量了电力变压器的热点温度，将实验数据与解析法、多物理场耦合法的计算结果对比分析，得出多物理场耦合计算结果更接近实验值，验证了本文采用方案的正确性。

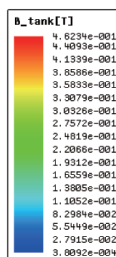
电力变压器磁热耦合分析

本文以一台SFP-1190 MV·A/500 kV三相五柱油浸式电力变压器产品为研究对象，按照产品的实际尺寸进行建模，仿真时采用场路耦合的方法，即先进行电场仿真，然后用电磁关系完成磁场仿真，再利用磁热关系完成温度场仿真。

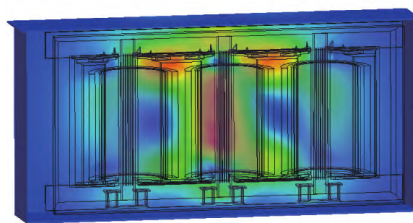
如图1所示为电力变压器夹件的磁通密度分布，可以看出，变压器夹件为普通钢材料时最大磁密为1.18 T，平均分布在0.2~0.4 T之间，为无磁钢材料时最大磁密为0.67 T，平均分布在0.2~0.4 T之间。



(1) 高压侧 (普通钢材料)



(a) 高压侧



(b) 低压侧

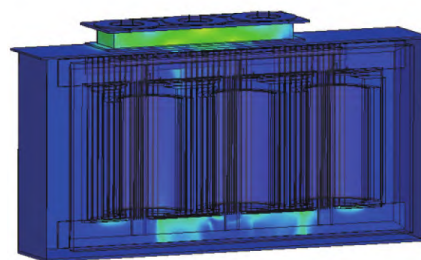
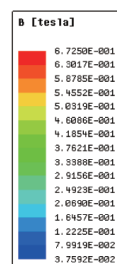


图1 变压器夹件磁通密度分布

图4 油箱磁通密度分布



(2) 低压侧 (无磁钢材料)

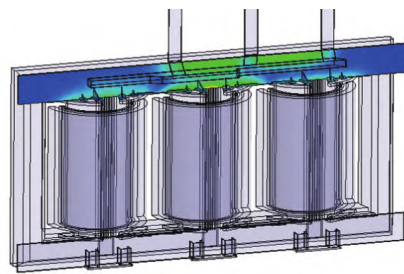
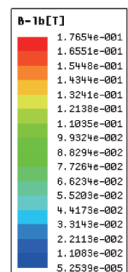
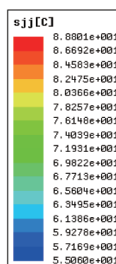
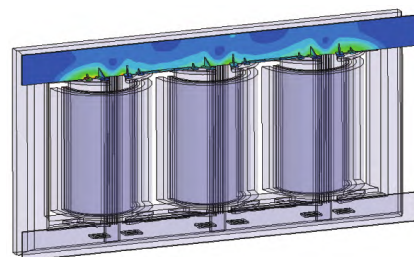


图2 变压器拉板磁通密度分布



(a) 高压侧



(b) 低压侧

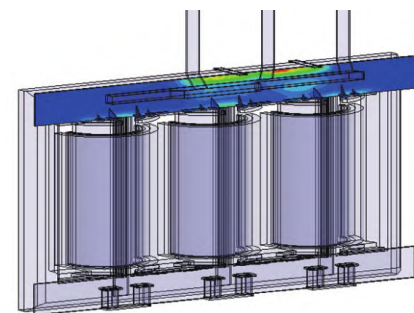


图5 变压器夹件温度分布

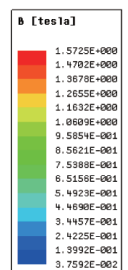
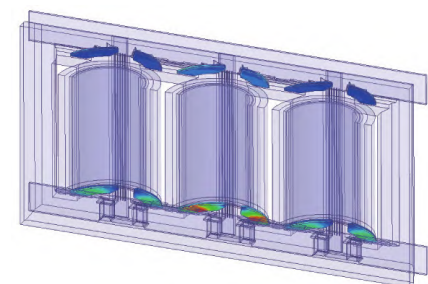
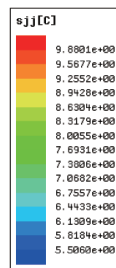


图3 肺叶磁屏蔽磁通密度分布



如图4所示为油箱的磁通密度分布，油箱最大磁通密度可以达到1.56 T。



如图6所示为电力变压器拉板的温度场分布，变压器拉板最大温度可以达到90 °C。

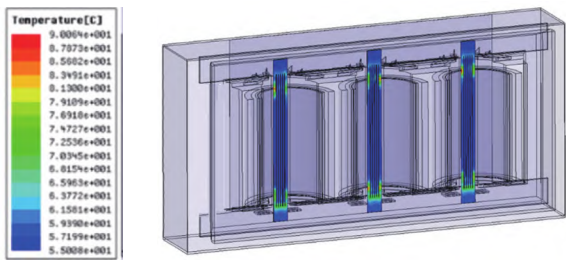
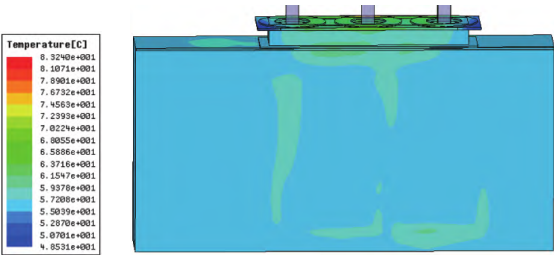
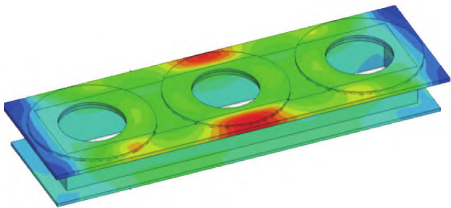


图6 变压器拉板温度分布

如图7所示为油箱的温度场分布，油箱最大温度可以达到83.2℃。



(a) 油箱外表面温度场分布



(b) 顶部温度场分布

图7 油箱温度分布

电力变压器损耗与温升实验研究

1. 电力变压器损耗实验研究

图8所示为SFP-1190 MV·A/500 kV三相五柱油浸式电力变压器产品样机。

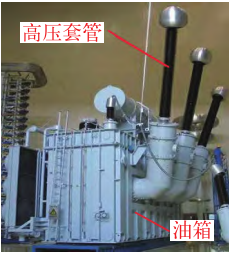


图8 SFP-1190 MV·A/500 kV电力变压器样机

依据标准IEC 60076-7，用三瓦特表方法对SFP-1190 MV·A/500 kV三相五柱油浸式电力变

器进行了空载损耗和负载损耗的测量，得到了最大、最小和额定分接情况下的空载损耗和负载损耗。

由于结构件损耗无法实际测量，本文应用实际测量的负载损耗减去实际测量的直阻损耗，认为该差值为结构件损耗。

电力变压器损耗测量值与计算值对比见表1，其中“1”“2”代表同一型号两台不同产品，基准测量值取两种产品的平均值。如图9所示为解析法与有限元方法结构件损耗计算值与实测值对比。

表1 电力变压器结构件损耗不同方法计算值与实测值对比

分接方式	测量值/kW		计算值/kW		计算误差/kW	
	1	2	解析法	场路耦合	解析法	场路耦合
最大	624.59	676.09	707.87	678.21	8.85	4.29
额定	652.98	711.28	755.63	720.69	10.78	5.65
最小	758.78	795.39	849.83	749.85	9.36	-3.50

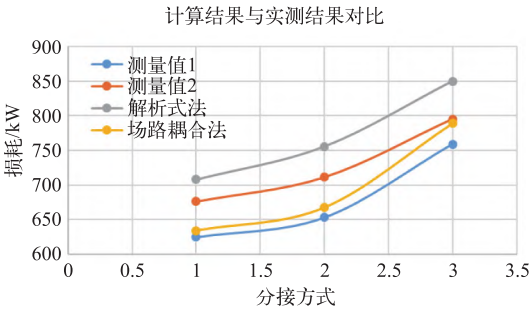


图9 不同方法结构件损耗计算值与实测值对比

从表1及图9可以看出加工的工艺对负载损耗的影响较大，两台产品的损耗偏差为8%；解析法计算结果偏差趋于同一方向，大于实测值；场路耦合法计算结果偏差在两个方向，偏差值接近于测量结果，误差在6%以内。

2. 电力变压器温度实验研究

为了准确利用多物理场耦合分析电力变压器的电磁热特性，在前述电力变压器场路耦合温度场计算结果的基础上，采用光纤测温方法对电力变压器的温度开展测量研究，以确定电力变压器温度较高的位置。

如图10所示为变压器内部测温光纤位置分布，其中高低压侧上夹件肺叶磁屏蔽对应位置放置了4个光纤（高低压侧个2个，位置1~4），线圈端部对应的拉板位置放置2个（拉板边缘位置6和拉板中部位置5），磁屏蔽放置2个光纤（下部磁屏蔽位置7和上部磁屏蔽位置8）。

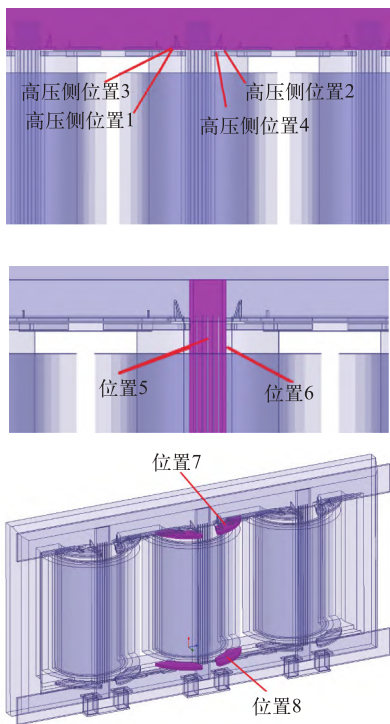


图10 光纤位置分布

(1) 环境温度测量分析

计算电力变压器结构件热点温升时，要考虑到环境温度，因此进行了不同位置环境温度的测量。位置1~4的环境温度实测结果如图11所示，可以看出不同位置的环境温度相差较大，最大差值为10℃，其余相差2℃以内，温度较低的离电力变压器距离较远，因此环境温度较低。环境温度随时间的增加开始是显著增加，3 h左右环境温度增加缓慢，呈稳定趋势。

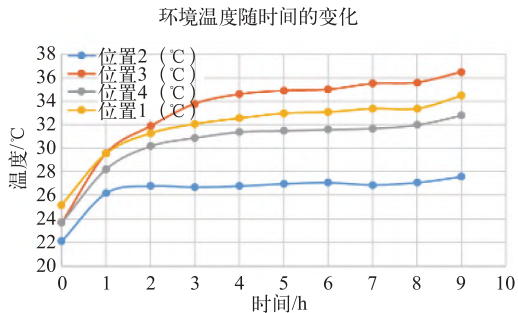


图11 不同位置环境温度对比图

(2) 油面温度测量分析

电力变压器油面温度的实测结果如图12所示，可以看出2个位置的实测值基本重合，随时间的变化，油面温度变化逐渐稳定。

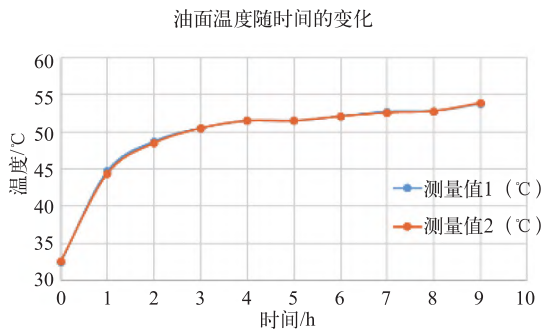


图12 油面温度实测值

(3) 结构件温度测量分析

电力变压器结构件温度测量结果如图13所示，可以看出，随着时间的增加，结构件的温度增加，2 h以后温度趋于稳定，温度从高到低依次为位置4（低压侧上夹件），位置7（肺叶磁屏蔽内部），位置1（低压侧上夹件），位置5（拉板内部），位置2（高压侧上夹件），位置8（肺叶磁屏蔽表面），位置3（高压侧上夹件），位置6（拉板外侧），最高与最低温度相差18.8℃。

不同位置光纤温度随时间的变化

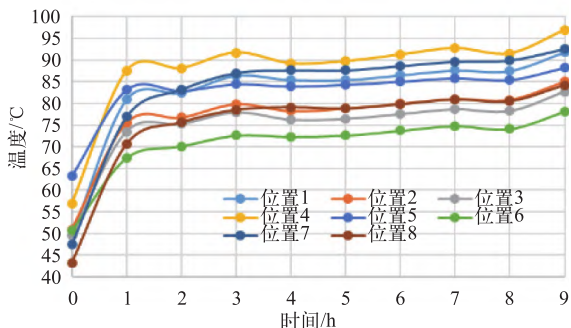


图13 不同位置的温度随时间的变化图

如图14所示为不同位置下试验值与仿真值对比，不同方法计算值与测量数据的对比见表2。

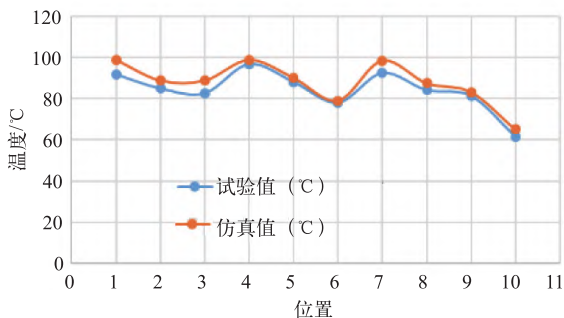


图14 不同位置的实测值与仿真值对比图

表2 试验数据与仿真结果对比

光纤位置	试验值/℃	仿真值/℃	误差 (%)	差值/K
位置1	91.8	98.8	7.63	7
位置2	85	88.8	4.47	3.8
位置3	82.7	88.8	7.38	6.1
位置4	96.9	98.8	1.96	1.9
位置5	88.2	90.1	2.15	1.9
位置6	78.1	79.1	1.28	1
位置7	92.5	98.4	6.38	5.9
位置8	84.2	87.5	3.92	3.3
低压油箱	81.4	83.2	2.21	1.8
高压油箱	61.6	65.1	5.68	3.5

从表2及图14可以看出，电力变压器多物理场耦合的计算方法与测量值的误差在8%以内，满足工程需求。

结束语

鉴于大容量电力变压器内部结构件温升研究的重要性及相关实验的缺乏性，本文基于多物理场耦合仿真的方法，完成了一台SFP-1190 MV·A/500 kV电力变压器的电磁热的仿真分析及实验对比研究，研究结果如下。

- 1) 同一型号两台产品的负载损耗实测结果有一定的差异，相差8%，可以看出加工工艺对负载损耗的影响较大，在设计时要予以考虑。
- 2) 采用场路耦合法可以准确计算出电力变压器结构件损耗，其计算结果与实际测量结果误差在6%以内。
- 3) 采用多物理场耦合法计算变压器结构件温升的结果与实际测量结果偏差在7 K以内，误差百分比在8 %以内。

通过以上结果可以看出：多物理场耦合的分析方法更接近于实际，所得的计算结果和测量结果相吻合。本文所得到的测量数据和分析结果可为提高电力变压器结构件损耗、温升的准确性提供参考。**EA**

(收稿日期：2024-07-12)

参考文献

[1] 邓永清，牛曙，晋涛，等．66 kV油浸式变压器瞬态热点温度计算[J]．变压器2020，57(7)：7-11．

[2] 孔庆奕，容焯，程志光，等．长期服役变压器用电工硅钢片磁性能研究[J]．变压器，2018，11(55)：29-34．

[3] 王晓燕，李国保，梁庆宁，等．立体卷铁心变压器的磁特性与空载损耗分析[J]．变压器，2020，57(11)：1-9．

[4] JIMENEZ-MONDRAGON V M，Escarela-Perez R，Melgoza E，et al．Quasi-3D finite element modeling of a power transformer[C]．IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)，2016．

[5] 姜宇琦，林育艺．电力变压器铁芯夹件涡流损耗计算[J]．电工技术，2017(8)：25-26．

[6] ZHANG Y B，XIN Y L，QIAN T，et al．2-D coupled uid-thermal analysis of oil-immersed power transformers based on finite element method[J]．IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)，2016．

