

[仿真模拟]

低压大电流线圈热点的仿真计算

文/中山ABB变压器有限公司 李春先 叶小胜 鄢克勤

通过仿真分析模拟大电流低压线圈在实际运行中的电流分布，以及谐波电流对绕组热点的影响，并提出了相应的解决方法。

目前在电炉或整流等特种变压器中，由于应用需要低压提供几十到上百千安的电流输出，对于这么大的电流输出，在变压器内部需要十几到五六十个低压线圈并联供电。由于这种线圈结构的特殊性，如果采用传统的方法计算线圈热点，并不能考虑到这类线圈存在电流分布不均匀和谐波电流对热点计算的影响，不能精确计算线圈热点。由于在工厂损耗测量和温升试验时使用的是近似正弦波的电压和电流，不能完全反映整流变压器现场运行时的实际损耗分布和温升热点。电流分布不均匀和谐波电流直接导致线圈局部温度升高，对变压器运行寿命产生极大影响，严重的甚至导致变压器故障。通过对电流分布不均匀度和谐波电流分布进行有限元分析仿真并计算出相对应的损耗分布，根据损耗分布结合传统方法计算线圈热点，在仿真分析的基础上提出解决热点问题的方法，并在实际产品中得到验证。

低压线圈电流分布的仿真分析

1. 大电流低压线圈布置

大电流低压线圈的绕组布置如图1所示。

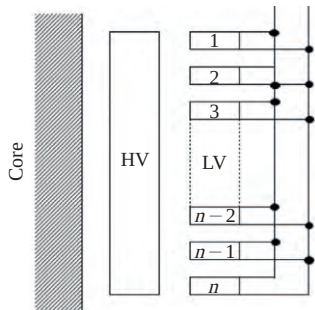


图1 大电流低压线圈的绕组布置

理论上，多个低压线圈（1, 2, 3... $n-2$, $n-1$, n ）是均匀供电的，即每个线圈的电流为总电流的 $1/n$ ，但是由于变压器内部漏磁场的影响，绕组各个部分的轴向和幅向漏磁分布不同，特别是端部磁场的弯曲，是导致各个并联线圈不均匀分布的主要原因。因此需要通过电磁场有限元分析法进行准确分析，介绍中采用ABB自行研发的有限元分析元件ACE进行分析。

2. 仿真分析

模型建立，由于高压线圈是一个电流串联的关系，将高压绕组整体作为一个绕组，而低压线圈是通过很多个线饼并联起来提供大电流，所以低压绕组每个回路单独作为一个绕组，并且变压器的漏磁场近似按二维似稳场考虑。低压大电流分布的仿真模型如图2所示。

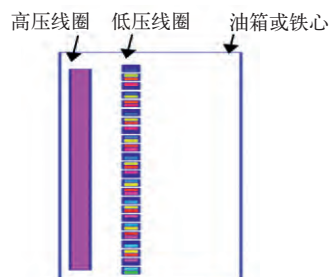


图2 低压大电流分布的仿真模型

1) 以铁心或者油箱做为分析结束边界。

2) 绕组部分材料设置为铜材料，电阻率需要按照75℃下的电阻率 $2.114 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，磁导率为1 H/m，其他部分设置为变压器油，磁导率为1 H/m。

3) 流源设置，按照实际运行情况，高压绕组

图5 母线螺栓支撑的应力云图

设置额定运行电流、匝数、线圈内部导线根数以及线圈大小。

4) 低压线圈按照每一个低压线圈单独设置一个电源, 设置电压为0 V, 线圈匝数、线圈内部导线根数以及线规大小都照实际设计尺寸进行设置。

5) 网格划分后, 进行仿真计算。

3. 结果分析

谐波电流漏磁分布如图3所示, 可以看出在线圈端部磁力线发生明显弯曲。由于低压线圈是由很多个线圈回路并联组成, 所以漏磁分布不均匀会导致低压线圈每个回路电流分布不均匀。

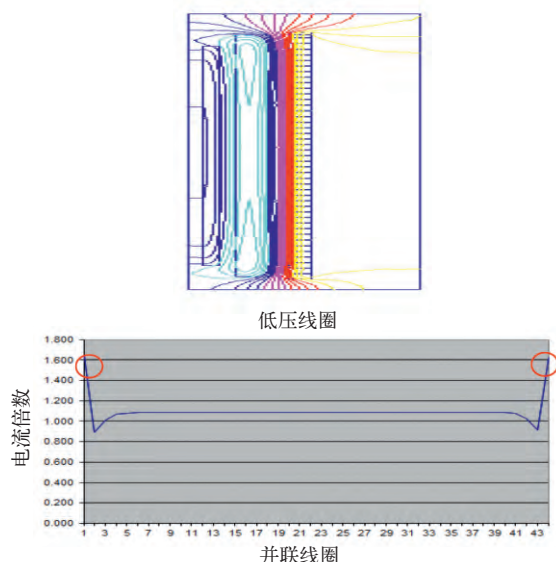


图3 变压器漏磁分布以及低压线圈的电流分布

从图3可以看出在低压线圈端部的并联线圈达到了1.6倍的平均电流, 在相同的散热条件下, 由于线圈端部的油温较高, 而1.6倍的平均电流导致了2.56倍的损耗, 从而导致端部过热, 绝缘寿命大幅度下降, 最终导致低压线圈损耗而引起变压器故障。

谐波电流产生的损耗在低压线圈的分布

在IEC 61378中, 有关于谐波电流在线圈中产生附加损耗的数学计算方法。单纯依靠这种方法进行计算, 并不能准确计算出线圈热点。在电流分布仿真分析的基础上, 依靠有限元分析计算主要的谐波电流(如5次、7次和11次谐波电流)引起的损耗再结合其他谐波的数学计算损耗, 可以准确计算线圈热点。

以工厂生产的一台54.7 MV·A整流变压器为

例, 谐波电流大小如表1所示, 按照传统的IEC 61378-1方法计算的线圈热点为60.2 K, 而按照有限元仿真分析和传统方法相结合的计算方法, 计算出来的线圈热点为65.8 K。传统计算热点方法与有限元计算热点方法比较如图4所示。

表1 各次谐波电流的含量

谐波阶数	六脉波系统中的谐波电流含量		
	谐波含量百分比 (%)	一次侧谐波电流/A	二次侧谐波电流/A
1	100.0	526.32	21 450
2	1.2	6.3	257.4
3	2.0	10.5	429
4	1.3	6.8	278.9
5	28.0	147.4	6 006
6	1.4	7.4	300.3
7	9.0	47.4	1 930.5
11	5.0	26.3	1 072.5
13	2.2	11.6	471.9
17	2.2	11.6	471.9
19	2.2	11.6	471.9
23	1.5	7.9	321.8
25	1.0	5.3	214.5
29	1.0	5.3	214.5
31	0.8	4.2	171.6
35	0.5	2.6	107.3
37	0.5	2.6	107.3

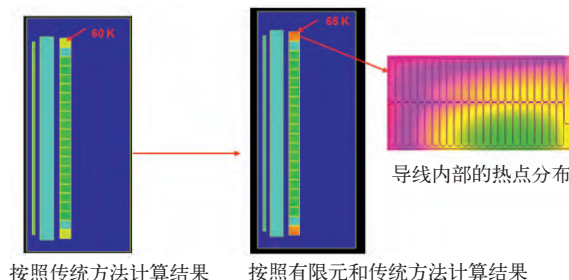


图4 传统计算热点方法与有限元计算热点方法相比较

产品验证结果如表2所示。

表2 产品验证结果

低压线圈热点 / K	
IEC传统方法计算结果	60.2
仿真分析计算结果	65.8
试验结果	63.7 (A相光纤测点1)
	64.1 (B相光纤测点2)
	63.8 (B相光纤测点3)
	63.5 (C相光纤测点4)

偏差分析: 光纤测点埋在低压线圈末饼, 光纤测点与仿真计算结果之间存在差距是由于温升过程中, 变压器不带整流器进行联合温升的试验条件下, 谐波含量只能通过等效电流进行模拟, 不能满足规定谐波电流的条件。这种方法只能满足整个线圈损耗达到了谐波电流下的损耗, 对于绕组平均温升的模拟不存在问题, 但不能满足谐

(下转第80页)

拉环获得更大的力矩。在携带气瓶攀爬楼梯时还可以两人合力操作。

(6) 特别加固的底板和轴承抗气瓶冲击

旧式小车仅仅考虑小车在平地运动的情况设计,底板轴承不够坚固。

新型搬运小车不锈钢底板使用钢片牢固焊接,6225深沟球轴承可以承受小车极端颠簸时气瓶对地板的冲击,如图15所示。



图15 新型搬运小车底板牢固焊接

项目应用前景及效益

1. 项目应用前景及效益

该搬运装置成本低,安装方便,灵活性高,应用前景良好,可在相关高压、检修专业推广使用。该方法操作方便,使用方便,安全可靠,装置制作成本0.4万元,应用推广前景良好。

2. 效益分析

本成果经济效益的计算依据主要为安全、便

捷搬运SF₆气体带来的经济效益和社会效益,主要从直接经济效益和间接经济效益两方面分析。

(1) 直接经济效益

本成果经济效益的计算主要以安全、便捷搬运瓶装SF₆气体带来的直接经济价值为依据。

突出施工安全性、缩短作业时间,有效降低经济成本,提高工作效率。据统计,2015年珠海局涉及SF₆气体补充工作32项,如沿用老方法每项工作需时为0.5天×4人。使用本成果后,单次工作节省工时为0.5天×2人,按员工日工资500元计算,使用此搬运装置全年能节省 $32 \times 0.5 \times 2 \times 500 = 16\,000$ 元,如推广应用产生的经济价值将十分庞大。

(2) 间接经济效益

从节约的检修资源的角度出发,小车的应用有助于减少工作时间,可以及时恢复供电,减少平均停电时间,提升设备的可靠性,降低因设备停电带来的电网风险,更好地维护电网的安全稳定,提升电能质量,提高客户满意度。仅这一点带来的社会和经济效益巨大,无法估量。目前,该装置已经在220 kV某站实际补气工作中得到应用,效果良好。EA

(收稿日期:2016.02.28)

(编辑:刘群立)

(上接第75页)

波电流分布在线圈局部产生过热的条件,所以导致光纤测点的温升小于仿真分析结果。

解决线圈热点的方法

基于以上仿真分析的结果,由于在设计阶段已经意识到了线圈热点的问题,可以采取如下两种比较经济可行的措施进行解决。

1) 通过调整线圈的相对位置,降低低压线

圈电流不均匀系数,如图5所示,同样的设计通过改变高低线圈的相对位置,低压线圈电流不均匀系数从1.6倍降低到了1.16倍,再结合局部加大冷却油道等措施,从设计上消除线圈过热的可能性。

2) 在负荷系数较高的线圈加大冷却油道,绝缘纸或者垫块采用热改进纸等措施来提高变压器的耐热能力。

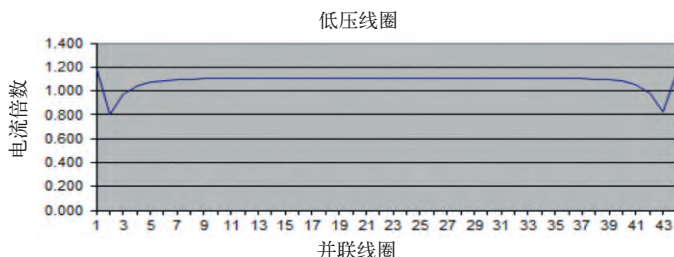


图5 调整线圈相对位置后的低压线圈电流分布

结束语

综上所述,大电流低压线圈在变压器运行时,由于电流分布的不均匀分布和谐波电流的影响,必然会导致局部损耗过高,从而产生局部热点。通过二维场的有限元分析,采取一些必要的措

施,完全可以解决此问题,走出传统计算方法的误区,避免由此带来的变压器寿命锐减甚至发生故障等问题。EA

(收稿日期:2016.05.17)

(编辑:刘群立)