

[变压器]

变压器三相对称电流引起法兰盘涡流损耗及温升的分析

文/保定天威集团（江苏）五洲变压器有限公司 张志刚

国家硅钢工程技术研究中心 王晓燕

保定天威保变电气股份有限公司 范亚娜

借助MAGNET 3D有限元分析软件，建立不同工况下的计算模型，对变压器三相对称电流通过低压法兰时产生的涡流分布进行计算和分析，探讨其涡流损耗密度分布和热点分布规律。

随着我国电力事业的不断发展，变压器容量的日益增大，其低压侧三相电流也相应增大。根据电磁感应定律，当电流通过引线时，会在引线周围产生磁场，该磁场会在其附近的法兰钢板中感应出电动势，并产生涡流，进而产生涡流损耗。当涡流损耗很大时会导致法兰某些部位温度升高，这样不但会影响变压器的效率，而且较高的局部温升会缩短密封垫圈寿命并会使得变压器油质量劣化，进而会影响变压器整体的安全运行。

本文通过MAGNET 3D软件对三相对称大电流垂直通过低压升高座法兰时产生的涡流分布进行计算，并给出涡流密度分布图、温升分布图及涡流损耗值；通过对涡流损耗密度图和温升分布图分析和涡流损耗值的对比，得出不同电流在不同技术方案下涡流损耗分布趋势，这对于变压器设计人员进行结构设计时采取恰当的措施降低设计成本和工艺加工成本，降低涡流损耗，提高变压器运行效率，避免局部过热保证变压器安全运行有一定的参考意义。

数学模型的建立

1. 数学模型

根据一台SFZ10-75000/110/10.5电力变压器

的低压升高座建立模型，其低压升高座盖板长1350 mm，宽900 mm，厚6 mm的Q235 A的钢板，在对称位置开3个 $\phi 100$ mm的孔（a, b, c），孔距为450 mm。模型如图1所示。

变压器的基本参数如下：

型号：SFZ10-75000/110/10.5

连接组别：YN, d11

电压比：110 $\pm$ 8 $\times$ 1.25%/10.5 kV

阻抗电压：10.5%，低压电流：4124 A

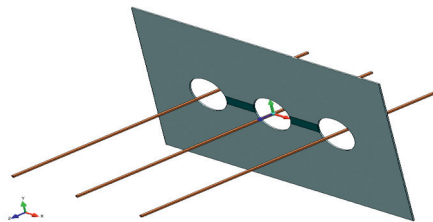


图1 数学模型

2. 数学模型计算

MAGNET软件采用标量磁位 $T-\Omega$ 法求解三维磁场方程计算，与其它方法相比这种方法具有占内存小，易收敛等优点，其原理如下：

磁场方程满足

$$H = T - \nabla \phi + H_s \quad (1)$$

式中， H_s 为源电流密度产生的磁场强度； ϕ 为标量磁位； T 为矢量电位。

在涡流区满足

$$\nabla \rho \nabla T - \nabla \rho \nabla T + \frac{\partial \mu (T - \nabla \varphi)}{\partial t} = - \frac{\partial \mu H_s}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \frac{\partial \mu (T - \nabla \varphi)}{\partial t} = - \nabla \frac{\partial \mu H_s}{\partial t} \quad (3)$$

在非涡流区满足

$$\nabla \frac{\partial \mu \nabla \varphi}{\partial t} = - \nabla \frac{\partial \mu H_s}{\partial t} \quad (4)$$

式中, μ 为相对磁导率。

热场问题求解方程

$$\nabla k \nabla T = - Q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

式中, k 为热传导系数; Q 为热源密度; ρ 为质量密度; c 为比热容; T 为温度。

不同工况下涡流损耗和温升的计算

1. 工况分类

为了更加清晰叙述一系列计算结果, 现作如下工况分类:

a) 工况一: 整个低压法兰材料为厚6.0 mm的Q235A。

b) 工况二: 同样一块钢板, 三孔之间嵌入宽50 mm的低磁钢, 材料厚6.0 mm的Mn23Al。

c) 工况三: 低压法兰材料全部为厚6.0 mm的Mn23Al。

在上述三种工况下, 每种工况将通过不同的三相对称电流。

针对每种工况, 用MAGNET软件计算出分别通过不同电流值时法兰的磁通密度矢量、涡流分布和温升分布图。

由于上述组合方案较多, 计算结果占据空间大, 考虑到篇幅所限, 在这里只选择几个典型的计算方案进行分析和研究, 并不会影响对整套计算结果规律性走向的了解。通过计算出不同工况下法兰上温度分布、涡流分布和磁通密度矢量分布的结果, 揭示系列工况下计算结果的变化规律。

2. 计算结果与分析

1) 图2是在工况一情况下, 通过的三相对称电流为2 500 A时的法兰涡流密度分布图。从图中可以看出由于低压三相电流相互之间存在120° 矢量差, a、b相和b、c相互影响, 导致三相法兰开孔周围的最大涡流密度并不是均匀分布, 而是集中在 a相—b相和b相—c相的区域内, a相和c相的外侧区域涡流密度较低。

2) 图4是在工况二情况下, 当通过的三相对称电流为4 124 A时的涡流损耗密度分布图。从图5中

可以看出, 由于有低磁钢板的作用 (磁阻远大于导磁钢板), 导致钢板上涡流损耗密度最大值出现在a相和c相开孔的外侧区域。从这个方面也验证了变压器工程设计中, 当低压电流较大时, 在a~b和b~c三孔之间嵌入低磁钢的合理性。

3) 图3和图5分别是与图2和图4其相应的温升分布图, 从图中可以看出最高温升的区域与最大涡流密度分布趋势一致, 计算得出图3和图5的最高温升计算值为93.76℃和96.38℃, (计算环境温度20℃), 温升分别为73.76 K和76.38 K。借助1972年国际大电网推荐文献以及长期经验, 结合考虑一般耐油橡胶垫圈的耐受温度, 变压器漏磁场中金属结构件局部过热按温升来判断, 即: 当环境温度为40℃时, 金属件对空气温升超过75 K即金属温度超过115℃时即可判定为过热。由此可以判定在图3和图5中, 在各自通过不同的电流时, 其法兰温升限值都处在临界状态。

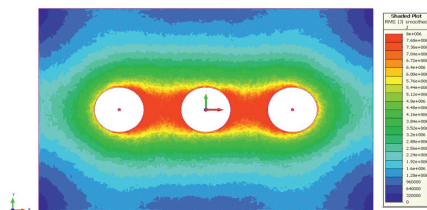


图2 三相对称电流为2 500 A时涡流密度分布图

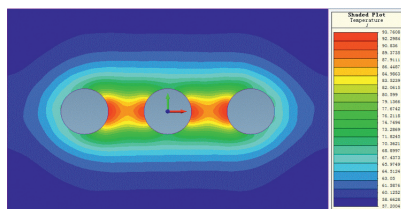


图3 三相对称电流为2 500 A时温升分布图

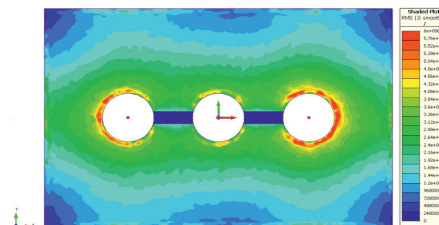


图4 三相对称电流为4 124 A时涡流损耗密度分布图 (低磁钢板嵌条宽度为50 mm)

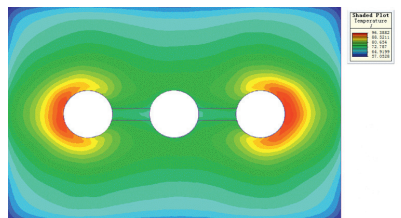


图5 三相对称电流为4 124 A时温升分布图 (低磁钢板嵌条宽度为50 mm)

4) 表1、表2和表3分别是在工况一、工况二、工况三的条件下, 法兰在分别通过8 00A、1 200 A、1 800 A、2 500 A、3 000 A、4 000 A、5 000 A、6 000 A三相对称电流时钢板法兰中的涡流损耗、磁滞损耗和总损耗的计算值。

比较表1和表2中的系列相对应的损耗值可以看出, 工况二的损耗总值约为工况一的损耗总值的1/4。因此在实际变压器设计中, 当低压电流

较大时, 采用嵌入低磁钢板条的措施, 不但成本低, 工艺简单, 而且非常有效地降低法兰钢板的涡流损耗, 避免局部过热的发生, 提高变压器的运行效率和安全。

5) 在工况三情况下, 涡流密度最大值降低了3个数量等级, 损耗总值降低了约4~5个数量级; 因此当通过电流超过一定数值时, 法兰要全部采用低磁钢板制造, 此时其涡流损耗很小, 无局部过热发生。

表1 工况一计算结果

电流/A	涡流损耗/W	磁滞损耗/W	总损耗/W
800	154.17	85.04	239.22
1 200	346.90	175.38	522.28
1 800	780.51	361.68	1142.19
2 500	1505.62	650.11	2155.73
3 000	2168.10	900.19	3068.28

表2 工况二计算结果

电流/A	涡流损耗/W	磁滞损耗/W	总损耗/W
800	38.44	25.24	63.67
1 200	87.52	49.76	137.29
1 800	201.76	93.87	295.63
2 500	400.03	149.64	549.67
3 000	584.54	189.81	774.34
4 000	1061.27	268.62	1329.89
5 000	1669.60	342.27	2011.87
6 000	2390.87	409.76	2800.62

表3 工况三计算结果

电流/A	涡流损耗/W	磁滞损耗/W	总损耗/W
800	0.0027	—	0.0027
1 200	0.0060	—	0.0060
1 800	0.0139	—	0.0139
2 500	0.0258	—	0.0258
3 000	0.0370	—	0.0370
4 000	0.0661	—	0.0661
5 000	0.1032	—	0.1032
6 000	0.1532	—	0.1532

结束语

1) 当在工况一的条件下, 法兰钢板上最大涡流密度分别出现在低压a相和b相以及低压 b相和c相之间的区域。

2) 嵌入低磁钢板条后, 区域的边界条件发生了变化, 导致法兰涡流密度分布也相应发生变化, 其涡流密度最大值分布会转移到低压a相和低压c相靠近开孔的外侧。

3) 在工况一条件下, 发生局部过热的临界电流大约2 500 A, 在工况二条件下大约4 000 A。

4) 实际工作中, 对于具体的技术方案, 建议设计者结合本公司的设计原则, 考虑到加工工艺、材料成本、损耗等综合指标, 参考本文的计算结果, 来确定优化方案。EA

(收稿日期: 2015.04.16)

(编辑: 白文亭)