

干式空心电抗器结构件发热研究

陈海龙^[1] 王宇威^[1] 刘晓春^[2]

(1. 特变电工沈阳变压器集团有限公司, 辽宁 沈阳 110144;

2. 特变电工智慧能源有限公司, 辽宁 沈阳 110144)

摘要 干式空心电抗器一般包括干式空心并联电抗器、干式空心串联电抗器、干式空心平波电抗器、干式空心桥臂电抗器、干式空心阻塞滤波电抗器以及干式空心限流电抗器。这些干式空心电抗器中,除干式空心平波电抗器和干式空心阻塞滤波电抗器的电流成分以直流电流为主外,其余干式空心电抗器的电流成分均以交流电流为主。本文要研究的就是干式空心电抗器在通入交变电流后,影响结构件的发热量因素,从而为以交流电流为主的干式空心电抗器的结构件设计提供依据。

关键词 干式空心电抗器 交变电流 发热量

中图分类号: TM4

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)11-0013-03

干式空心电抗器由多层线圈并联,每层线圈为一个包封,每层线圈的端部引线焊接在铝合金汇流排上,通过汇流排引出与系统中其他设备连接。

由于干式空心电抗器的磁路部分只有空气,交变电流通过线圈,在线圈周围空气中会产生磁通量,交变电流越大,频率越高,产生的磁通量越大,磁场强度越强,由于没有铁心提供磁路,进入空气的磁通量在线圈周围的金属结构件中会产生涡流损耗,使结构件发热。在磁路中的所有结构件均会产生涡流损耗,从而发热,本文主要研究受线圈磁场影响最严重的汇流排的温升的影响因素。

1 干式空心电抗器磁场理论计算分析

当线圈中通过交流电流时,在线圈端部就会产生交变的磁场,处于交变磁场中的金属件会产生涡流现象,涡流本质上就是电流,闭合回路中的电流将会产生焦耳热。设闭合回路中的总电动势为 e , 总阻抗为 R , 则该回路在时间 dt 内因涡流损耗放出的焦耳热为 $dQ=I^2Rdt=(e/R)2Rdt=(e^2/R)dt$ 。设闭合回路磁通量为 Φ , 则感应电动势 $e=-d\Phi/dt$ 。设闭合回路中磁感应强度为 B , 回路面积为 S , 则 $\Phi=BS$ 。设通过金属件的交变电流为 I , 设汇流排的磁导率为 μ_0 , 汇流排与线圈端部的距离为 r , 设汇流排处的磁场强度为 H , 则由毕奥-萨伐尔定律可得, 汇流排处的磁感应强度。^[1]

$$\vec{B}=\int_L \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \times \vec{e}_r}{r^2}$$

结构件的总损耗为涡流损耗与电阻耗之和,一般情况下,铝合金汇流排的电阻耗约为涡流损耗的十分之一。

结构件的温升 $T=P/S$, 其中 P 为结构件损耗, S 为结构件的散热面积。

通过以上分析可知汇流排的温升与通电导体距汇流排的距离、汇流排的电阻率、汇流排的磁导率以及感应磁通通过的有效截面有关^[2]。

1. 线圈与金属件的距离越大,磁感应强度越小,涡流损耗越小,金属件的温升越低。
2. 金属件的电阻率越大,涡流损耗越小,金属件的温升越低。
3. 金属件的磁导率越大,磁感应强度越大,涡流损耗越大,金属件的温升越高。
4. 感应磁场通过的有效截面越小,磁通量越小,涡流损耗越小,金属件的温升越低。

2 建立有限元分析模型

为了研究电抗器的漏磁分布,我们利用美国 ANSYS 公司的大型电磁场仿真软件包 Maxwell 对电抗器开展三维建模仿真计算。

采用此种方法可计算出线圈的涡流损耗以及汇流排的磁场分布情况,并进一步计算,求得电抗器汇流排总损耗。将计算的汇流排中的总损耗作为温度场计算的励磁加载到温度场中进行计算,可得到汇流排的热点温升^[3]。

3 磁场下结构件的温升研究

经过前面的分析,汇流排的材料一般都选用导电性能良好的铝合金材料,汇流排的电阻率、磁导率为材料固有属性,这里不对电阻率及磁导率进行研究。汇流排包括汇流臂和集电环,两者通过焊接连成一个

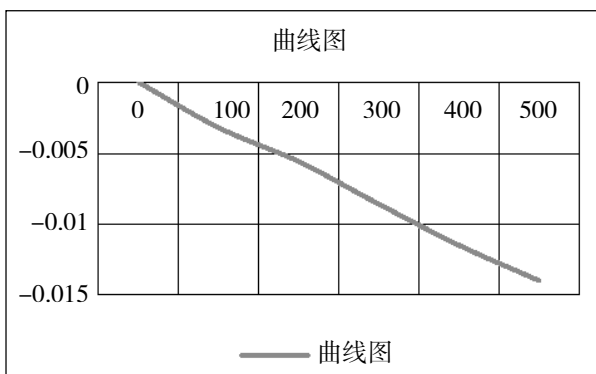


图1 距线圈100mm处径向磁感应强度

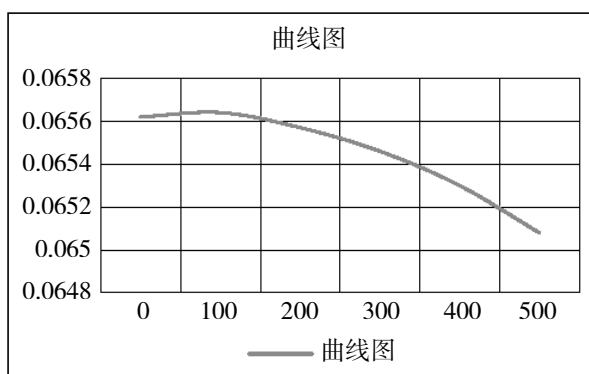


图2 距线圈100mm处轴向磁感应强度

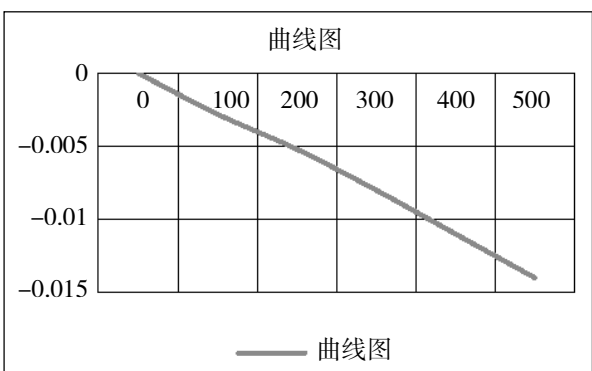


图3 距线圈200mm处径向磁感应强度

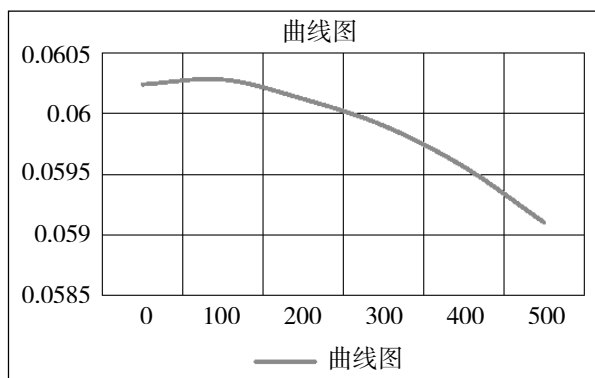


图4 距线圈200mm处轴向磁感应强度

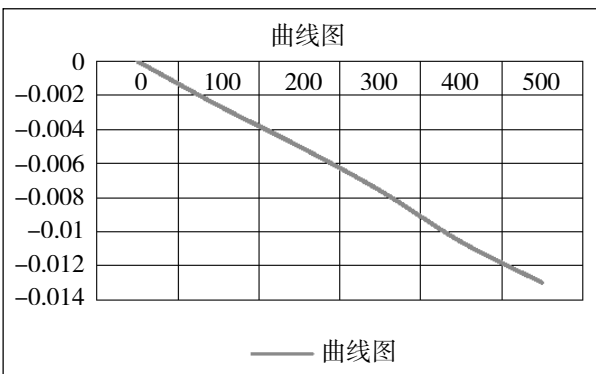


图5 距线圈300mm处径向磁感应强度

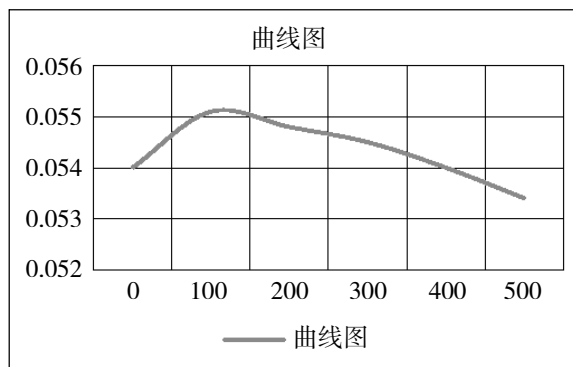


图6 距线圈300mm处轴向磁感应强度

整体即汇流排。本文主要研究线圈与汇流排的距离，汇流臂厚度及集电环直径对汇流排温升的影响。

3.1 影响因素的确定

1. 厚度影响：线圈距离汇流排200mm，集电环外径200mm，汇流排厚度分别为10mm，15mm，20mm。

2. 距离影响：集电环外径200mm，汇流排厚度15mm，线圈与汇流排的分别为100mm，200mm，300mm。

3. 直径影响：线圈距离汇流排200mm，汇流排厚度

15mm，集电环直径分别为100mm，200mm，300mm。

3.2 厚度对汇流排的温升影响

设定线圈距离汇流排200mm，集电环外径200mm，通过改变汇流排厚度，计算汇流排的温升，厚度分别为10mm，15mm，20mm。

汇流排厚度为10mm时，汇流排的热点温升仅40K；汇流排的厚度为15mm时，汇流排的热点温升约70K；汇流排的厚度为20mm时，汇流排的厚度可达97K。当

表1 不同位置磁感应强度对比表

| 距线圈端部距离 (mm) | 距中心 100mm 处磁感应 强度 (mT) | | 距中心 200mm 处磁感应 强度 (mT) | | 距中心 300mm 处磁感应 强度 (mT) | |
|-----------------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | 径向 | 轴向 | 径向 | 轴向 | 径向 | 轴向 |
| 100 | 3.2 | 65.64 | 5.6 | 65.57 | 8.7 | 65.46 |
| 200 | 2.5 | 60.28 | 5.4 | 60.12 | 8.1 | 59.88 |
| 300 | 2.4 | 55.08 | 5.1 | 54.85 | 7.8 | 54.52 |

汇流排与线圈距离和汇流排集电环直径相同的情况下, 汇流排的厚度越厚, 汇流排温升越高。

3.3 汇流排与线圈距离对汇流排温升的影响

设定集电环外直径 200mm, 汇流排厚度 15mm 的情况下, 通过改变汇流排与线圈距离, 计算汇流排的温升, 距离分别为 100mm, 200mm, 300mm。

由以上计算结果可以发现, 距离线圈 100mm 时, 汇流排热点温升为 120.8K, 距离线圈 200mm 时, 汇流排热点温升为 70.5K, 距离线圈 300mm 时, 汇流排热点温升为 47K, 可见, 汇流排与线圈的距离越大, 汇流排温升越低, 而且随距离变化明显。

3.4 集电环直径对汇流排温升影响

设定汇流排距离线圈 200mm, 汇流排厚度 15mm 的情况下, 通过改变集电环外直径, 计算汇流排的温升, 集电环外直径分别为 100mm, 200mm, 300mm。

由以上计算结果可以发现, 集电环直径 100mm 时, 热点温升为 73K, 集电环直径为 200mm 时, 热点温升为 70.5K, 集电环直径为 300mm 时, 热点温升为 68.8K, 可见, 集电环直径越大, 热点温升越低, 但变化不大, 说明, 集电环直径对热点温升影响很小。

3.5 通过仿真计算, 分析线圈端部磁感应强度

下面通过仿真计算进一步分析在线圈端部不同位置的磁感应强度如何变化。

由以上图表可以发现, 磁感应强度的轴向分量随距线圈端部距离的变化明显, 径向分量变化不明显, 且轴向分量约为径向分量的 20.5 倍至 23 倍之间, 说明在距离线圈端部 300mm 以内, 磁感应强度主要以轴向分量为主, 距离的改变主要改变的是磁感应强度的轴向分量。距线圈端部距离一致时, 在距线圈中心 100mm 至 300mm 之间的范围内, 磁感应强度的径向分量变化明显, 轴向分量变化不明显, 但此范围内, 磁

感应强度主要以轴向分量为主, 所以, 在此范围内, 随距线圈中心距离的变化, 总的磁感应强度变化不大。

4 结论

本文介绍了交流干式电抗器汇流排的热点温升的影响因素, 通过仿真计算分析, 可以得到如下结论:

1. 干式空心电抗器汇流排的厚度是汇流排温升的最大影响因素, 汇流排越厚, 汇流排的温升越高。汇流排的厚度需要结合产品电流大小, 合理设计。

2. 干式空心电抗器汇流排与线圈的距离也是影响汇流排温升的关键因素, 汇流排与线圈距离越大, 汇流排温升越低。加大汇流排与线圈距离的方式就是加高线圈端封。

3. 干式空心电抗器汇流排的最热点在集电环上, 集电环的直径大小是集电环的温升的影响因素, 通过以上分析, 集电环直径在 100mm 到 300mm 以内变化, 集电环的温升变化不会很明显, 当直径超过 400mm 后, 集电环的温升会有较大变化, 如果从加大集电环直径的角度降低温升, 需要将集电环直径增加至足够大, 才会有明显效果。

参考文献:

- [1] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [2] 汪泉弟, 张艳, 李永明. 干式空心电抗器周围工频磁场分布 [J]. 电工技术学报, 2009(01):8-13.
- [3] 徐勇, 周腊吾, 朱英浩, 等. 变压器漏磁场的分析 [J]. 变压器, 2003, 40(09):1-4.