

电气制动开关大电流下的涡流发热及抑制措施的研究

张震锋, 陈 蕾, 吕军玲, 常治国

(西安西电开关电气有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 结合电气制动开关箱体在温升研究性试验中的异常发热现象, 对工频大电流下铁磁性材料中的涡流损耗问题进行了深入的机理分析、数值计算和仿真研究, 并提出了抑制涡流发热的有效措施。结果表明, 降低箱体材料的磁导率及增大通流铜排与箱体的间距均可抑制箱体中的涡流发热, 显著改善电气制动开关的温升性能。研究结果为大电流电气设备中的涡流抑制提供了思路和建议。

关键词: 电气制动开关; 大电流; 温升; 涡流发热; 抑制措施

Study on eddy current heating of electric brake switch under high current and its restraining measures

ZHANG Zhenfeng, CHEN Lei, LV Junling, CHANG Zhiguo

(Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: For the abnormal heating phenomenon of the electrical braking switch box in the temperature-rise test, this paper makes an in-depth mechanism analysis, numerical calculation and simulation study on the eddy current loss in ferromagnetic materials under the power-frequency and large current. Furthermore, the effective measures to suppress eddy current heating are proposed. The results show that decreasing the magnetic permeability of the box material and increasing the space between the flow copper bar and the box can restrain the eddy current heating in the box. The temperature-rise performance of the electric braking switch can be significantly improved. The results provide ideas and suggestions for eddy current suppression in large current electrical equipment.

Key words: electric braking switch; large current; temperature rise; eddy current heating; suppression measures

0 引言

根据抽水蓄能电站的运行特点, 每台发电机必须配置一台电气制动开关。电气制动开关有利于发电机在停机时快速通过低转速区, 减少推力瓦磨损, 从而减少机械制动设备的磨损, 延长其使用寿命, 是大型水力发电站的重要组成部分。

电气制动开关产品由三相灭弧室、操动机构、短接端子、箱体和出线端子等组成, 其中三相灭弧室竖直安装在固定支架上, 均封闭在金属

箱体内。电气制动开关是利用同步电动机的电枢反应, 在发电机转子灭磁后将定子三相短路, 同时给转子线圈提供励磁电流, 使其产生与惯性方向相反的制动转矩, 迫使机组迅速降至低速区, 再投入机械制动, 直至机组停稳。根据上述工作原理, 制动开关工作时需承载1~1.2倍的空载励磁电流, 同时, 在水轮发电机短路干燥试验过程中, 也要求制动开关持续运行。因此, 电气制动开关既要具有承载短时大电流的能力, 也需要承

载长期的额定电流，这对其温升性能提出了较高的要求。

本文在进行电气制动开关的温升研究性试验（见图1）时，发现设备整体温度上升很快。额定电流通流3 h，大部分位置的温升已经超过标准规定的65 K的要求，最高达到了114 K，同时箱体在试验过程中的振动、噪声也非常明显。



图1 电气制动开关的温升研究试验

Fig. 1 Temperature rise research test of electric brake switch

1 异常发热源的排查

为了确定电气制动开关在温升试验时发热异常及振动、噪声明显等问题的原因，针对试验设备展开了一系列排查工作，具体如下：

1) 将制动开关的箱体去除，仅对本体进行额定电流下的温升试验。试验结果表明，设备本体的温升值符合标准要求且有一定裕度。

2) 在箱体上增加多个测温点，再次进行温升研究试验。图2为额定电流通流3 h箱体的温升值。由图2可以看出，箱体发热最严重的部位为顶部靠近进线一侧的支撑方钢及侧板顶部。同时还发现，通流过程中箱体的温度上升速度明显快于本体。

由以上排查结果可知，制动开关的温升异常主要是由箱体引起的。对箱体的发热原因进行综合分析：由于温升试验时制动开关箱体本身并不通流，首先可排除传导发热的因素，同时考虑到箱体材料主要为碳钢，其磁导率较大，感应涡流效应较为明显，由此可推测，箱体的异常发热主要是由铁磁性材料在大电流下的涡流损耗引起

的。箱体靠近进线一侧的支撑方钢附近温升值最高，是因为这个位置距离通流铜排最近，因此感应涡流最为严重。箱体的振动和噪声也是由于涡流产生的电动力引起的。

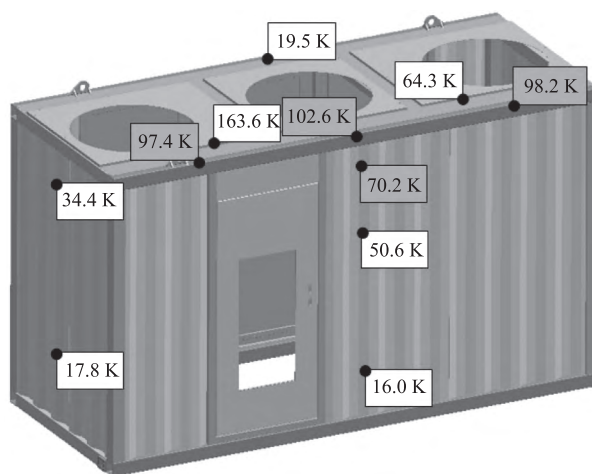


图2 额定电流通流3 h箱体的温升值

Fig. 2 Temperature rise of box with rated current for 3 h

2 箱体涡流抑制措施的分析研究

通过查找相关文献，发现箱体的涡流发热在发电机^[1]、变压器^[2-4]等设备中均有发生，尤其在各种大容量电气设备的封闭柜^[5-8]中，此现象非常普遍。这些文献通过对比研究提出了多种消除涡流发热的措施，如更换非导磁材料、对铁磁材料进行隔磁处理及增大通流导体与铁磁材料的距离等。

考虑到时间、成本和可操作性等因素，决定对制动开关箱体进行隔磁处理来抑制涡流发热。文献[9-10]中提到，通过在封闭柜的铁磁材料上开槽进行隔磁处理，可以有效消除柜体中的涡流，其原理解释为：交变电流会在周围的铁磁材料中感应出磁场，形成封闭的铁磁回路，当材料开槽后，相当于在铁磁回路中加入了一段空气，由于空气的磁导率远小于铁磁材料，整个回路的磁阻显著增大，同样的电流产生的磁感应强度就会大幅减小，铁磁材料中产生的涡流也随之减小。对于三相共箱的封闭柜，如图3所示，在柜体相间部位的材料上开槽，即可同时增大三相铁磁回路的磁阻，达到抑制三相涡流的目的。

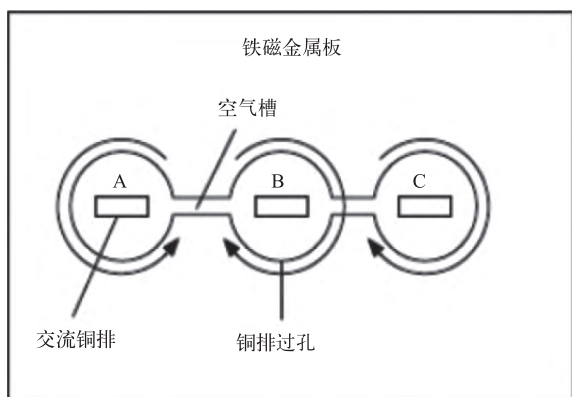


图3 封闭柜相间部位开槽的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of slotting at the interphase part of the closed cabinet

按照上述提到的操作方法，将制动开关箱体顶部相间位置的支撑方钢和顶板截断约10 cm（见图4），再次进行额定电流下的温升研究试验。从试验结果来看，箱体各个位置的温升情况与之前相比变化不大，相间位置开槽的方法并没有达到预期的效果。



图4 制动开关箱体相间开槽

Fig. 4 Interphase slotting of brake switch box

通过与隔磁处理的方法进行比对，确认开槽的细节包括位置、宽度等均没有问题，但其应用效果不理想，怀疑铁磁材料开槽的措施本身对抑制涡流是否有效，因此针对此措施的有效性进行了验证试验。如图5所示，在通流铜排的下方用白布带悬挂三根不同碳钢材料的长管，保持其各自独立并与箱体顶部支撑方钢等高，在此布置下进行温升研究试验。按照解释的原理，这三根

长管均未形成闭合回路，相当于其铁磁回路中串联有很长的空气，磁阻应该很大的，涡流损耗也应该很小。但从试验结果来看，三根长管均有明显的发热，通流30 min时最高温度达到了67℃。可见对于材料开槽增大磁阻进而减小涡流的原理解释并不合理，此措施的有效性也有待商榷。



图5 材料开槽抑制涡流有效性的验证试验

Fig. 5 Validation test of effectiveness of material slotting for eddy current suppression

3 涡流损耗的理论研究

为了进一步明确涡流损耗的影响因素，找到行之有效的抑制涡流的方法和措施，对涡流效应的基本原理进行了理论分析和仿真计算。

3.1 涡流产生的原理

由麦克斯韦电磁场理论可知，变化的电场会产生变化的磁场，而变化的磁场同时也会产生变化的电场，因此在如图6所示的模型中，当线圈中流过变化的电流时，就会在其内部的块状金属中产生变化的磁场，进而感应出自成闭合回路的感应电动势。在感应电动势的作用下，导体内部的自由电荷将发生运动，从而形成感应电流，这个呈旋涡状的电流就是涡流。由于金属材料的电阻率通常都比较小，因此一个不大的感应电动势即可产生较强的涡流，造成块状金属内部大量的损耗发热。

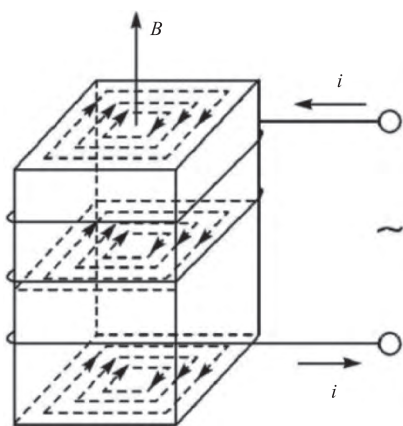


图6 涡流的产生

Fig. 6 Generation of eddy current

3.2 涡流损耗的计算

为了简化分析,以图7所示的简单模型为例,进行涡流损耗影响因素的分析计算。

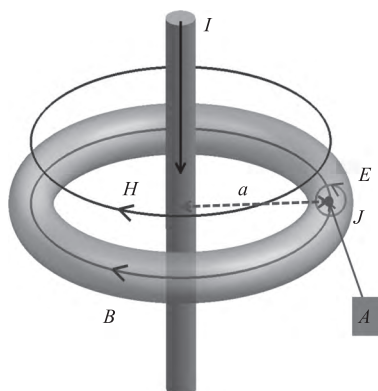


图7 涡流损耗的计算模型

Fig.7 Calculation model of eddy current loss

由麦克斯韦电磁方程组及物质结构方程^[11]可知

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (1)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (3)$$

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

式中, I 为中心导体中通入的电流; H 为此电流感应出的磁场强度; B 为环形介质内部的磁感应强度; E 为感应电场强度; J 为感应涡流密度; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为环形介质的相对磁导率; σ 为环形介质的电导率。

假设模型中各部分均为各向同性的均匀介

质,则由式(1)和式(3)可得到,在环形介质内部与通流导体中心距离为 a 的 A 点处,其磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi a} \quad (5)$$

假设研究的涡流回路半径 Δr 非常小,可近似认为回路内部穿过的磁感应强度 B 处处相等,则由式(2)可得

$$2\pi \Delta r \cdot \mathbf{E} = -\pi \Delta r^2 \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6)$$

将式(5)代入可得此回路上的感应电场强度为

$$\mathbf{E} = -\frac{\mu_0 \mu_r \Delta r}{4\pi a} \cdot \frac{\partial I}{\partial t} \quad (7)$$

将 $I = I_0 \sin(2\pi ft)$ 代入可得

$$\mathbf{E} = -\frac{\mu_0 \mu_r \Delta r f}{2a} I_0 \cos(2\pi ft) \quad (8)$$

式中, I_0 为正弦交变电流的幅值; f 为电流的频率。

由式(4)和式(8)可得,涡流密度为

$$\mathbf{J} = -\frac{\mu_0 \mu_r \sigma \Delta r f}{2a} I_0 \cos(2\pi ft) \quad (9)$$

可进一步算得此回路上的涡流损耗瞬时功率密度为

$$p = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} = \frac{\mu_0^2 \mu_r^2 f^2 \sigma}{4a^2} I_0^2 \cos^2(2\pi ft) \Delta r^2 \quad (10)$$

则一个正弦周期 T 内,涡流损耗的平均功率密度为

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt \\ &= \frac{\mu_0^2 \mu_r^2 f^2 \sigma I_0^2}{8a^2} \Delta r^2 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)易推断出,涡流损耗的主要影响因素包括介质的磁导率及电导率、介质与通流导体的距离、电流频率及电流幅值。其中,介质的磁导率、电导率、电流频率及幅值为正相关因素,介质与通流导体的距离为负相关因素。

同时也需注意,以上数值计算仅考虑了环形介质内部任意一点上一个较小的涡流回路对损耗的贡献,事实上,由于金属材料内部处处可形成

回路,因而在介质各个点上均存在多个涡流的相互抵消或叠加,实际结果会有一定偏差。在实际工程应用中,由于设备结构的复杂性以及构件材料的不均匀性,涡流损耗问题比上述分析复杂得多,要进行涡流损耗的大小及分布的精确计算是非常困难的,但上述理论计算结果对于实际问题的定性对比分析仍具有较强的参考性。

4 箱体涡流抑制的仿真研究

根据上节的理论分析,减小介质的磁导率和电导率、增大介质与通流导体的间距及降低电流幅值和频率均可抑制介质中的涡流损耗。对于本文研究的制动开关箱体,通入电流的幅值和频率为确定的技术参数,是无法改变的,因此可从箱体材料的磁导率、电导率及通流铜排与箱体的距离三个方面着手来抑制涡流。

为进一步验证以上措施的有效性,避免其实际应用时由于反复调整造成时间、人力和物力的浪费,本文首先利用有限元分析软件进行了电磁场与温度场的耦合仿真,分别研究了材料的磁导率、电导率及箱体与铜排的距离对箱体中涡流损耗发热的影响。考虑到试验中发热最严重的是箱体顶部的支撑方钢,为提高仿真效率,对制动开关模型进行了简化,如图8所示,其中三相铜排中分别通有相差 120° 相位的额定电流,通流时间为30 min。

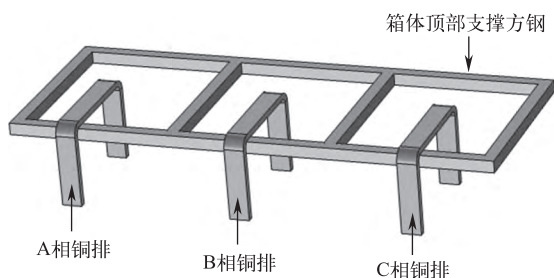


图8 制动开关涡流发热仿真的模型

Fig. 8 Simulation model of eddy current heating of brake switch

4.1 材料的磁导率对涡流发热的影响

考虑到金属材料的磁导率一般是从1到上千不等,因此选取200 H/m、20 H/m和1 H/m(其中1接近不锈钢材料的磁导率)三个数值进行磁导率的对比研究,其余条件保持不变。仿真得到

方钢中的涡流损耗功率密度如图9所示,可以明显看出,随着磁导率的减小,方钢中的涡流损耗逐渐减小,这与上节数值计算的结果是一致的。

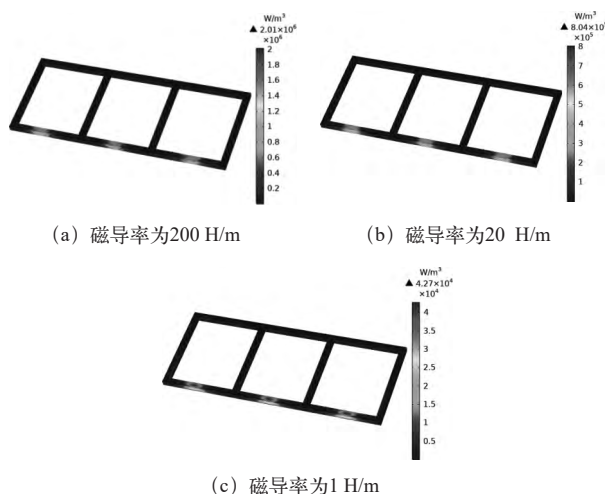


图9 不同磁导率方钢中的涡流损耗功率密度

Fig.9 Eddy current loss power density in square steel with different permeability

图10为通流30 min时,不同磁导率的方钢中的温度分布。可以看出,随着磁导率的减小,方钢的温度下降非常明显,最高温度从 57.7°C 下降到了 24.9°C 。同时也发现,靠近进线一侧的方钢发热较为严重,每一相通流铜排正下方的位置温度最高,而另一侧方钢几乎不发热,这与试验中测得的温度分布基本一致。

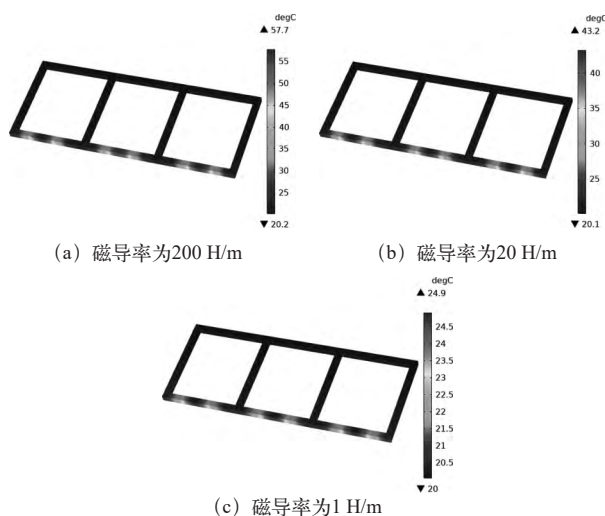


图10 通流30 min时不同磁导率方钢的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of square steel with different permeability at 30 min flow

4.2 材料的电导率对涡流发热的影响

考虑到金属材料的电导率一般是在 $10^6 \sim 10^7$ S/m的数量级，因此将方钢材料的电导率分别设置为 2×10^7 S/m、 1×10^7 S/m和 5×10^6 S/m。仿真得到方钢中的涡流损耗功率密度如图11所示。通过对比可发现，随着电导率的减小，方钢中的涡流损耗功率密度有一定程度的减小，这与数值计算结果是一致的，但从图12所示的通流30 min时方钢中的温度分布来看，温度的变化趋势却是相反的，方钢材料的电导率越小，温度反而越高。

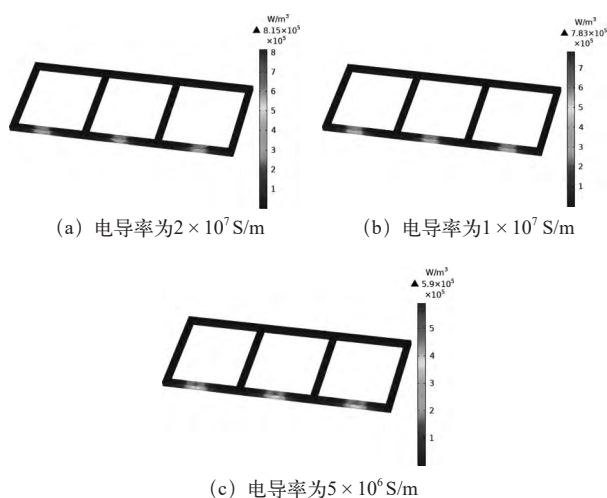


图 11 不同电导率方钢中的涡流损耗功率密度

Fig. 11 Eddy current loss power density in square steel with different conductivity

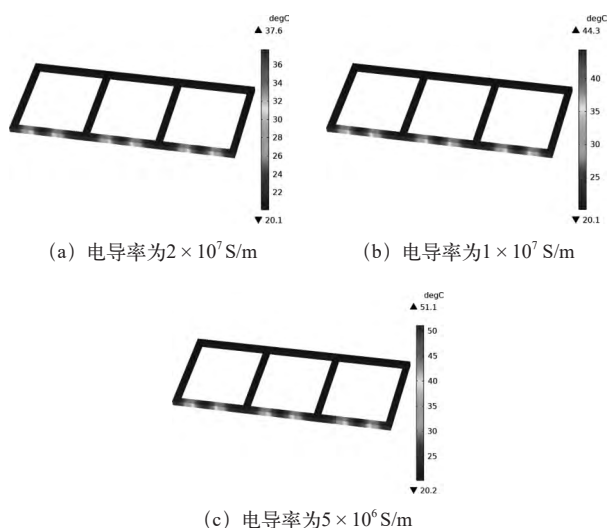


图 12 通流 30 min 时不同电导率方钢的温度分布

Fig. 12 Temperature distribution of square steel with different conductivity at 30 min flow

方钢的涡流损耗功率密度和温度随电导率的变化趋势不一致，猜测是由于电导率变化导致涡流的趋肤深度不同导致的。图13显示了不同电导率方钢截面上的涡流损耗功率密度。可以看出，随着电导率的减小，涡流的趋肤深度有一定的增大，也就是说，材料的电导率减小后，虽然涡流损耗功率密度局部的数值有一定下降，但发热的材料厚度增大了，两者综合作用下方钢整体发热反而更严重。利用仿真软件对方钢整个体积内的损耗功率密度做积分计算，得到电导率为 2×10^7 S/m、 1×10^7 S/m和 5×10^6 S/m时，整个方钢内的涡流损耗功率分别为432 W、554 W和668 W，这与上述推测是一致的。

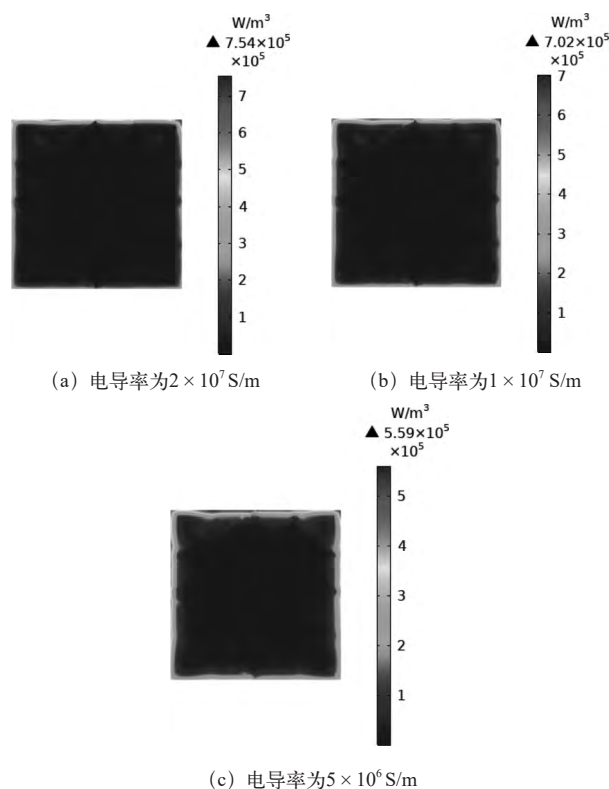


图 13 不同电导率方钢截面上的涡流损耗功率密度

Fig.13 Eddy current loss power density on square steel sections with different conductivities

4.3 箱体与铜排的距离对涡流发热的影响

图14和图15分别为箱体与铜排不同距离下方钢中的涡流损耗功率密度和通流30 min的温度分布。可以看出，随着方钢与铜排间距的增大，涡流损耗逐渐减小，方钢的温度也明显下降。

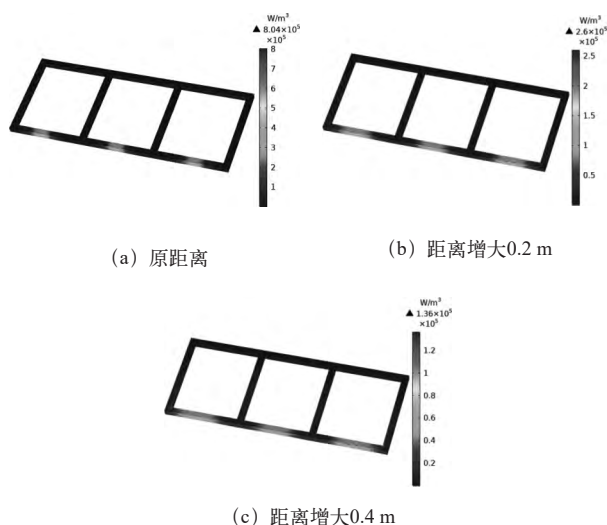


图 14 不同距离下方钢中的涡流损耗功率密度

Fig. 14 Eddy current loss power density in steel at different distances

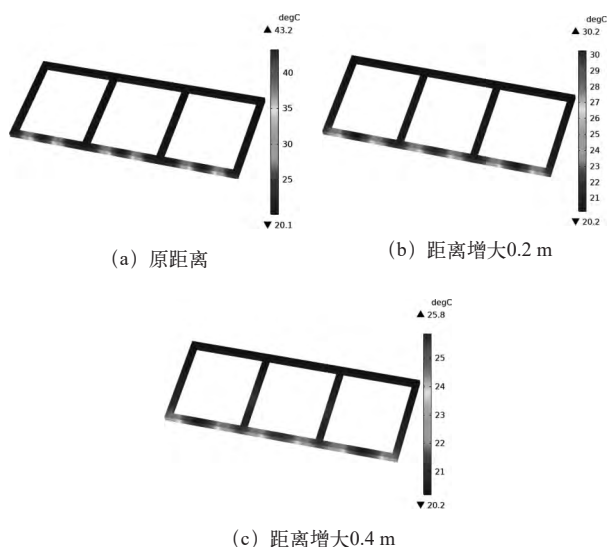


图 15 通流 30 min 时不同距离下方钢的温度分布

Fig. 15 Temperature distribution of steel at different distances under 30 min flow

对以上仿真计算结果进行综合分析,得出如下结论:

1) 降低箱体材料的磁导率及增大通流铜排与箱体的间距,这两个措施均可有效抑制箱体中的涡流损耗发热,并进一步降低箱体的温升值,这与上节对涡流损耗的数值计算结果是一致的。

2) 减小箱体材料的电导率能够降低箱体中局部的涡流损耗功率密度,这与数值计算的结果一致,但对温升的影响则与之相反,电导率降低

后,温度反而有所上升。材料电导率的改变对涡流的抑制作用仍需进一步深入研究。

5 措施及应用效果

基于以上分析研究结果,对制动开关箱体采取了如下改进措施。

(1) 更换箱体材料

考虑到制动开关在吊装过程中箱体需承受整个设备的重量,对其支撑强度有一定要求,因此将箱体所有支撑方钢及侧板、顶板均由碳钢更换为不锈钢,在保证其强度的同时,大大降低了材料的磁导率。

(2) 增大进线铜排与箱体的间距

将制动开关顶部的进线铜排由原本的上下平行进线改为左右平行进线,并将铜排竖直方向和水平方向的长度均加大,从而增大了通流铜排到箱体侧板和顶部的距离。

以上措施实施后,箱体的发热得到了明显的抑制,设备整体的温升性能大大改善,箱体的温升值远小于30 K的标准要求,振动噪声也基本完全消除,电气制动开关的温升型式试验顺利通过。

6 结束语

1) 大容量电气设备封闭柜抑制涡流常采用对铁磁材料开槽的隔磁措施,在电气制动开关上的应用效果并不明显,此措施的有效性及其抑制原理解释有待论证。

2) 降低箱体材料的磁导率及增大通流铜排与箱体的间距,这两个措施均可有效抑制箱体中的涡流损耗,对箱体异常发热现象的改善作用比较显著。

3) 箱体材料的电导率对涡流损耗及温升的影响规律及机理尚不明确,还有待于后续进一步深入研究。

参考文献

- [1] 王彦领,廉永,马晨辉,等. 涡流造成发电机出线CT二次电缆毁坏分析及对策[C]// 中国动力工程

- 学会超超临界机组技术交流会, 2013.
- [2] 杨红星, 梁川, 沈强. 大庄水电站主变低压侧母线发热原因分析与处理方案[C]// 中国水力发电工程学会信息化专委会, 水电控制设备专委会2015年学术交流会论文集, 2015.
- [3] 林宇. 主变压器箱体涡流发热的原因及处理方法[J]. 科技展望, 2016, 26(29): 101.
- [4] 叶朋珍. 一起大型变压器低压侧升高座过热原因分析及处理[J]. 广东电力, 2016, 29(2): 5.
- [5] 吴永进, 刘东红. 封闭柜电气设备发热原因及改善措施探讨[J]. 机电信息, 2013(30): 2.
- [6] 张红光. 大电流开关柜的研究与设计[J]. 煤矿机械, 2015, 36(2): 4.
- [7] 杜建华, 蒋海牙, 王海浩. 首钢1#高炉压差发电系统高压柜发热问题的分析[J]. 自动化技术与应用, 2016(12): 3.
- [8] 蓝鹏昊. 基于10 kV开关柜发热故障的研究与分析[J]. 中国新技术新产品, 2016(16): 2.
- [9] 罗宣国, 魏世民, 时晓蕾. 电气设备中涡流产生的原因及预防措施[J]. 电力系统装备, 2013(11): 67-70.
- [10] 郭冠导. 浅谈涡流对开关柜的影响[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2013(19): 1-5.
- [11] 冯恩信. 电磁场与电磁波[M]. 3版. 西安: 西安交通大学出版社, 2010.

作者简介

张震锋(1976—), 男, 高级工程师, 从事断路器的研发工作。

(收稿日期: 2022-06-21)