

蒸发冷却水轮发电机定子温度场研究

姚若萍, 饶芳权

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

ANALYSIS OF 3D THERMAL FIELD IN THE STATOR OF LARGE HYDRO-GENERATOR WITH EVAPORATION-COOLING SYSTEM

YAO Ruo-ping, RAO Fang-quan

(Dept. of E.E., Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

ABSTRACT: In order to improve the performance reliability of large hydro-generators, the machine designers have made every effort to improve their cooling system, including application of inner liquid cooling system of the coils. Some evaporation-cooled vertical hydro-generators have been installed in power stations of China and put into commercial operation for long time. The identification of advantages of this new cooling system should be based on detailed analysis of the thermal field in electrical machine. A method to calculate 3D thermal field in the stator of large hydro-generators with evaporation cooling system was developed in this paper. The full length with half of tooth and slot, including conductors, end windings and ventilation ducts, was taken as the calculation area. As an example the 3D temperature distributions under different load conditions of the 400MW evaporation cooling hydro-generator at Lijiaxia Power Station were calculated. The precision of proposed method has been proved by comparison of the results calculated and measured at site. Through the work described in this paper some useful conclusions for generator design and operation can be drawn.

KEY WORDS: Hydro-generator; Evaporation cooling; 3D thermal field; Finite element method

摘要: 为了提高大型水轮发电机的运行可靠性, 设计人员对电机的冷却系统作了不少改进, 其中包括线圈采用液态介质内冷系统等。蒸发冷却技术已在中国数个电站的几台立式水轮发电机中得到应用, 并经历了长时间的商业运行考验。为了验证这种新型冷却系统的优越性, 应对电机内的温度场进行深入的分析。该文以有限元法计算了采用蒸发冷却系统的大型水轮发电机定子三维温度场, 以包括导

体、端部绕组及通风沟在内的定子半个齿距全轴向长度为计算域, 并考虑蒸发冷却的特点, 建立了物理和数学模型。论文以李家峡电站一台 400MW 蒸发冷却发电机为实例, 计算了不同工况下的定子温度分布, 计算结果与现场实测数据进行分析比较, 验证了计算方法的正确性。论文得出了一些有助于设计和运行的结论。

关键词: 水轮发电机; 蒸发冷却; 三维温度场; 有限元法

1 引言

我国近年在大型水电站建设方面将有较大的发展, 在 2000~2010 年间水电装机将成倍增长, 而且规格高, 性能要求高, 尤其是单机功率 700MW 的三峡发电机更为突出。此外, 据报道, 21 世纪拟建的水头 200m 级的大型水电枢纽就有溪落渡等 12 座, 总容量达 42000MW。随着单机容量的增大, 电机的传热成为突出问题, 如何防止产生局部过热及铁心因热膨胀产生的有害变形成为电机工程师注意的焦点。

一般空冷电机, 定子绕组中因损耗产生的热量传至绝缘表面后, 一部分由冷却空气带走, 另一部分传给铁心, 因此导体、绝缘、铁心间均有较大的温差, 而且由于导线换位不完善, 线棒内环流造成温升不均匀。由于线棒的导体和绝缘材料的膨胀系数不同, 受热后因膨胀量不同, 可能导致绝缘受损。由于机座与铁心间的温差还可能导致铁心翘曲。采用内冷技术后, 线棒中产生的损耗直接由冷却介质带走, 不仅铜损不会成为铁心的热源, 而且还有可能通过内冷介质带走部分铁损, 使温升降低, 温差减小, 从而使前述问题迎刃而解。水内冷虽然有很好的冷却效果, 但由于水泄漏可能引起绝缘损坏,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50277025); 博士点基金项目 (20020248005)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50277025)。

存在安全隐患,此外为了保证冷却水质,还需要一套复杂的水处理设备。

中国科学院电工研究所开发的自循环蒸发冷却系统,具有内冷系统的优点,且安全性优于水内冷,已在 10MW、50MW 及 400MW 立式水轮发电机中得到应用,运行经验证明它是一种高效率、易维护、安全性好的冷却方式。

为使蒸发冷却这一先进技术进一步得到推广应用,有必要对它在大型发电机中应用的效果及其对电机定子温度分布所产生的影响进行深入的分析计算。关于这方面的工作,目前国内外尚未有论文发表。本文对这一课题进行了研究。作为实例,对李家峡电站 400MW 水轮发电机进行了计算分析,并将计算结果与实测数据对比,得出一些有益的结论。

2 发电机定子温度场

2.1 物理模型及基本假定

基本假定:

(1) 涡流效应对每根股线的影响相同,故定子绕组铜损取其平均值;

(2) 因结构对称,认为槽中心面和齿中心面是绝热面;

(3) 端部只考虑绕组部分;

(4) 采用蒸发冷却系统时,绕组损耗产生的热量均由冷却介质带走。

考虑结构的对称性,取包括定子铁心、绕组的导体、端部绕组及风沟在内的半个齿距作为计算域,上下层线圈端部用传热单元连接。

2.2 方程及边界条件

有内部热源时具有各向异性介质的稳态固体热传导方程

$$\nabla \cdot (I \nabla T) = -q \quad (1)$$

式中 I 为热传导率,即导热系数; q 为内部热源密度, W/m^2 。

在直角坐标系下,该方程可写为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(I_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(I_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(I_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q \quad (2)$$

边界条件:

(1) 第一类边界条件

$$T|_{S_1} = T_c \quad (3)$$

式中 T_c 为面 S_1 的环境温度已知值。

(2) 第二类边界条件

边界上热传导为已知值 q_0 (向外),即其边界的法向温度梯度已知。当 $q_0=0$ 时,此面上无热传导,称为绝热边界条件

$$-I_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} = q_0 \quad (4)$$

式中 q_0 为面 S_2 上的边界热流输入; I_n 为垂直于物体表面的热传导率。

(3) 第三类边界条件

边界 S_3 上从物体内部传到边界上的热流量与通过该边界散到周围介质中的热流量相等,即

$$-I_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_3} = a(T - T_f) \quad (5)$$

式中 T_f 为周围介质温度; a 为散热系数。

2.3 有限元计算方法

(1) 边值问题与条件变分

由上述分析,可将水轮发电机定子稳态温度场归结为如下边值问题

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(I_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(I_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(I_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q \\ T|_{S_1} = T_c \\ I_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} = -q_0 \\ I_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_3} = -a(T - T_f) \end{cases}$$

与之等价的条件变分为

$$E(T) = \int_V \left\{ \frac{1}{2} \left[I_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + I_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + I_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - qT \right\} dv + \frac{1}{2} \int_{S_3} a(T^2 - 2TT_f) ds = E_{\min}$$

$$T|_{S_1} = T_c$$

(2) 离散

采用有限元法,取半个齿距的区域进行分析计算,包括定子绕组及其端部。求解域采用八节点六面体单元进行离散,上下层线圈端部用传热单元连接,其部分网格剖分如图 1 所示。经单元分析及总体合成后得到关于求解域内温度的代数方程组,以一类边界条件进行修改后解方程,即得各节点的温度值。



图 1 包括端部在内的线圈及铁心的部分网格图

Fig.1 Part of meshes for core and windings

3 李家峡蒸发冷却发电机的温度场计算

3.1 基本数据

李家峡 400MW 水轮发电机的 4 号机采用蒸发冷却技术，其结构如图 2 所示。

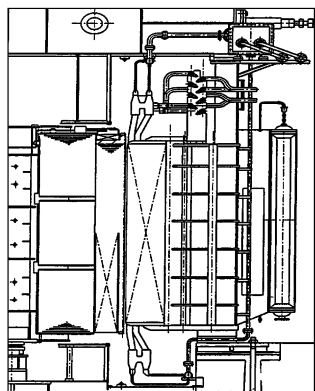


图 2 李家峡 400MW 蒸发冷却水轮发电机剖示图

Fig.2 Section of the 400MW evaporation cooled hydro-generator

额定功率为 $P_N=400\text{MW}$ ；功率因数为 $\cos\phi_N=0.9$ ；额定电压为 $U_N=18\text{kV}$ ；额定转速为 $n_N=125\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ；定子铁心长度为 $l_i=2980\text{mm}$ ；定子铁心外直径为 $D_o=12800\text{mm}$ ；定子铁心内直径为 $D_i=11740\text{mm}$ ；定子槽数为 $Z=396$ 。

3.2 散热系数^[4]

通风沟内定子轭部

$$a_1 = \frac{1+0.25 \cdot v_a}{450} = 0.011655 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{°C})$$

通风沟内定子齿部

$$a_2 = \frac{1+0.25 \cdot v_a}{450} = 0.012121 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{°C})$$

计算用风速

$$v_a = \frac{Q \times 10^4}{\pi \cdot \left(D_o - \frac{2}{3} \times h_j \right) \cdot n_w \cdot h_w} \text{ m/s}$$

式中 Q 为发电机总风量； h_w 为单个风沟高，mm； h_j 为轭高，mm； n_w 为风沟数。

定子轭外表面

$$a_3 = 0.00004 \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{°C})$$

气隙

$$a_4 = 28 \left(1 + \sqrt{\frac{u_2}{2}} \right) = 201.5527 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$$

气隙处的切向线速度

$$u_2 = \pi \cdot D_i \cdot \frac{n_N}{60} \text{ m/s}$$

定子铁心端部表面

$$a_5 = \frac{1+0.25v_{d1}}{45000} = 9.05228 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{°C})$$

$$n_d = 0.2u_2 \text{ m/s}, \quad n_{d1} = 0.8n_d \text{ m/s}$$

定子端部线圈表面

迎风

$$a_6 = \frac{1+\sqrt{v_d}}{60000} = 8.20026 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{°C})$$

背风

$$a_6^1 = 0.8a_6 = 0.0000656021 \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{°C})$$

3.3 边界条件

铁心和线圈中心面为绝热面， $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ；冷风温度

度取为 $T_0 = 35 \text{°C}$ 。

根据设计规范，表面空气温度取值如下：

气隙表面空气温度为 $T_1 = 55 \text{°C}$ ；铁心轭背部表面空气温度为 $T_1 = 62.63 \text{°C}$ ；风沟内铁心端面空气温度认为是线性递增的。

3.4 蒸发冷却额定工况计算

表 1, 2 为蒸发冷却时额定工况下定子各部分温度的计算值，图 3~图 4 为定子铁心及绕组的温度分布，冷风温度为 35°C 。

表 1 气隙与铁心的温度计算值

Tab.1 Calculated temperature of air gap and core

位置	平均温度 /
气隙处	63.142
铁心轭内侧	62.240
铁心轭外侧	59.787

表 2 绕组导条与绝缘的温度计算值

Tab.2 Calculated temperature of bar and insulation

位置	最低温度 /	最高温度 /
绕组绝缘	59.461	65.139
绕组导条	61.072	63.125

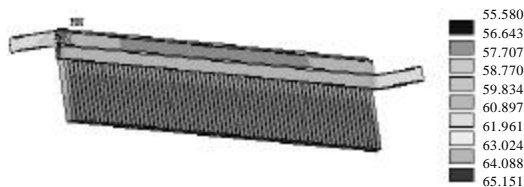


图 3 额定工况时铁心及线圈温度分布

Fig.3 Temperature of core and windings at rated load



图 4 额定工况时线圈温度分布
Fig.4 Temperature of windings at rated load

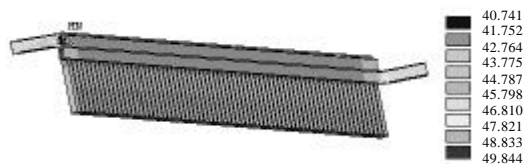


图 5 试验工况下铁心及线圈温度分布
Fig.5 Temperature of core and winding at test

3.5 计算与实测结果的比较与分析

为验证计算方法的准确性，本文对李家峡电站蒸发冷却 4 号机组某一实际运行工况下的温度场进行了计算，并与现场温度实测值^[7]进行比较。

(1) 试验运行工况的基本数据

有功功率为 322.7MW；无功功率为 39.3Mvar；定子电压为 17.4kV；定子电流为 10.8kA；励磁电压为 261.8V；励磁电流为 1521.9A。

(2) 边界条件

铁心和线圈中心面为绝热面为 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ；冷风温度为 $T_0 = 20$ ；气隙表面空气温度为 $T_1 = 40$ ；铁心轭背部表面空气温度为 $T_1 = 50$ ；风沟内铁心端面空气温度认为是线性递增的。

(3) 蒸发冷却试验工况计算与实测结果

试验工况下的计算结果如表 3、表 4，铁心及线圈的温度分布如图 5 所示。由表 4 可见温升随工况的变化很小。计算与实测的温升值比较如表 5 所示，定子铁心温升相对误差为 4.7%，绕组温升的相对误差为 8.7%，计算所得温度分布与理论分析相符，计算方法有足够的精确度。计算值与实测相

表 3 绕组导条与绝缘的温度计算值

Tab.3 Calculated temperature of bar and insulation

位置	最低温度 /	最高温度 /
绕组绝缘	45.279	49.839
绕组导条	46.337	48.65

表 4 定子气隙与铁心的平均温升计算值

Tab.4 Calculated average temperature rise of air gap and core

位置	额定工况/K	试验工况/K
气隙处	28.1	27.7
铁心轭内侧	27.2	27.1
铁心轭外侧	25.0	26.2

表 5 计算与实测温升比较

Tab.5 Comparison of calculated and measured temperature rise

位置	计算值 /K	实测值 /K	相对误差 /%
铁心	26.67	28	4.7
绕组	29.84	32	8.75

比，数值偏小，其原因，除测量精度等因素外，计算中边界条件假设的气隙及铁心轭背部表面空气温度与最后计算所得温度有差别，而且计算中假设发电机各部分的风量是均匀分布的，但实际上受电机结构的影响很大，从实测值可见铁心温度沿全圆测点的测量值分散性较大。

4 结论

(1) 本文以有限元方法计算水轮发电机的定子三维温度场，以包括定子铁心、导体和端部绕组及风沟在内全轴向长度半个齿距为计算域，并以李家峡电站 400MW 蒸发冷却发电机为实例，计算结果与实测值基本相符，说明该模型和方法的正确性，三维温度场的计算可为发电机及其蒸发冷却系统的合理设计提供可靠的依据。

(2) 由计算分析可知，蒸发冷却发电机的绕组、绝缘及铁心的温度都较低而且非常接近，李家峡电站 400MW 发电机额定工况时，绕组与绝缘的平均温度相差为 1.4，铁心内侧与绝缘平均温度相差 0.1。温度分布比较均匀，最高与最低温度相差很小，绕组的最高与最低温度相差 2.05，绝缘为 5.1，铁心内外侧温差 2.4。温度低且分布均匀，可延长绝缘寿命，减小热变形，这显示了蒸发冷却技术的优越性。

(3) 从论文计算的结果可以看到，在不同负荷情况下，蒸发冷却发电机线棒温度变化很小，即，在一定的运行范围内保持绕组的温度基本不变，这种特性对长铁心大型发电机，尤其是负荷经常变化的电机，如作调峰机组运行的电机，是非常宝贵的，使过去电机工程师非常关心的线圈在铁心槽内能自由滑移和防止绝缘与铜线相对移动等问题迎刃而解。

致谢

本文使用了东方电机股份有限公司的实测数据，在此表示衷心的感谢。

(下转第 101 页 Continued on page 101)

液池的运动参数等对喷溅的影响，系统反映了材料性质与喷溅量相对大小之间的定量关系。

(3) 计算并比较了 Ag、Cu、W、Mo、Cr、Se 等纯金属材料喷溅量的大小，计算结果与实验结果相符，证明了模型的正确性。为触头材料的理论设计提供了指导。

参考文献

- [1] 王其平, 电器电弧理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [2] 林辛, 张冠生, 洪翠 (Lin Xin, Zhang Guansheng, Hong Cui). 基于模糊理论的真空断路器开断寿命综合评判的研究 (A study of fuzzy theory based comprehensive judgement on the interrupted electrical endurance of vacuum circuit breaker) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(2): 15-18.
- [3] 安藤弘平, 长谷川光雄. 焊接电弧现象 (增补版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [4] 王可建 (Wang Kejian). 电触头材料的分断电弧侵蚀研究 (Breaking arc erosion of contact material) [D]. 西安: 西安交通大学 (Xi'an: Jiaotong University), 1987.
- [5] 孙明, 王其平 (Sun Ming, Wang Qiping). 触头表面液池中的电磁搅拌 (Electromagnetic agitation of contact surface molten pool) [J]. 低压电器 (Low Voltage Apparatus), 1995, (4): 28-30.
- [6] 山东工学院, 东北电力学院工程流体力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [7] 万江文 (Wang Jiangwen). 电弧对银金属氧化物 (AgMeO) 触头的熔炼和侵蚀特性 (Smelting and erosion characteristics of AgMeO contacts by breaking arc) [J]. 西安: 西安交通大学学报 (Journal of

- Xi'an: Jiaotong University), 1998, (4): 13-17.
- [8] 钱增源. 低熔点金属的热物性[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [9] 林柏年, 魏尊杰. 金属热态成形传输原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [10] 郭宽良. 计算传热学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1988.
- [11] 郝柏林. 从抛物线谈起 - 混沌动力学引论[M]. 上海: 上海科技教育出版社出版发行, 1993.
- [12] Michael Bruce Schulman, Paul G. Slade and John A. Bindas. Effective erosion rate for selected contact material in low-voltage contactors [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technology, 1995, 18 (2): 329-333.
- [13] Chi-hung leung, hanj.kim. A comparison of Ag/W, Ag/WC, and Ag/Mo electrical contacts [J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1984, 7 (1): 69-75.
- [14] Werber F, Rueder *et al*. The influence of composition and Cr particle size of cu/cr Contacts on chopping current, contact resistance, and breakdown voltage on vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1989, (2): 273-283.

收稿日期: 2002-10-29.

作者简介:

吴细秀 (1976-), 女, 博士研究生, 从事电器、电接触材料方面的研究;

李震彪 (1963-), 男, 教授, 研究方向为电接触理论及电器新材料, 电磁干扰与电磁兼容、计算机数字信号处理及应用。

(责任编辑 丁玉瑜)

(上接第 90 页 Continued from page 90)

参考文献

- [1] 李广德, 付刚 (Li Guangde, Fu Gang). 大型水轮发电机定子三维温度场计算 (The calculation of three-dimension thermal field of large hydro-generator stator) [J]. 大电机技术 (Large Electric Machinery Technology), 2000, (2): 1-5.
- [2] 魏永田. 电机内热交换[M]. 机械工业出版社, 1998.
- [3] 白延年. 水轮发电机设计与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [4] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [5] Gu Guobiao, Xiong Nan, *et al*. The development of the 400MW evaporation-cooling hydro-generator of Lijiaxia power station [C]. presented at CIGRE Session-2000, Paris, 2000.
- [6] Rao Fangquan, Gu Guobiao, Xiong Nan. Prospective application of evaporation-cooling technology for huge-generator in 21 century[C]. in Proceedings of International Conference on Engineering and

Technological Sciences 2000. New World Press.

- [7] 东方电机股份有限公司 (Dong Fang Electric Machinery Co., Ltd.) 李家峡 400MW 水轮发电机转子温升试验报告 (Test report on measurement of temperature rise of a 400MW hydro-generator in P.S. Lijiaxia) [R]. 上海: 东方电机股份有限公司 (Shanghai: DongFang Electric Machinery Co., Ltd), 2000.

收稿日期: 2003-01-03.

作者简介:

姚若萍 (1940-), 女, 教授, 博士生导师, 长期从事电机及其控制和电机物理场研究;

饶芳权 (1934-), 男, 中国工程院院士, 长期从事大型发电机的设计与制造工作。

(责任编辑 丁玉瑜)