

浸润式与强迫内冷结合的蒸发冷却汽轮发电机 定子三维温度场计算

温志伟¹, 顾国彪², 王海峰²

(1. 中国科学院研究生院, 北京市 海淀区 100039; 2. 中国科学院电工研究所, 北京市 海淀区 100080)

Calculation of 3D Thermal Field in the Stator of Turbo-generator with Immersion Evaporative-cooling System and Forced Inner-cooling

WEN Zhi-wei¹, GU Guo-biao², WANG Hai-feng²

(1. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100039, China;

2. Institute Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: The new type of evaporative cooling technique combined with inner cooling system used in the stator of turbo-generator has ascendancy over other traditional cooling methods. It offers a more safe, more reliable and effective result of insulation and cooling. So it is worthy to have a deep research on temperature distribution calculating for more application. Based on analysis of a 50MW turbo-generator stator with the new evaporative cooling system, a complete simulation model in three dimensions for temperature calculating of the stator was developed for the first time. Effect on the temperature distribution of stator concerned with the change of load, inner cooling of stator winding and capacity of condenser was also analyzed by numerical simulation and tests. Distribution rule of stator temperature field has been obtained and result of simulation was tested agree well with experiment. Conclusion of this paper can be provided as academic foundation for more application in design and manufacture high-capacity turbo-generator with evaporative cooling system.

KEY WORDS: turbo-generator; evaporative cooling; inner cooling; stator; temperature field

摘要: 汽轮发电机定子采用浸润式与强迫内冷结合的新型蒸发冷却技术优越于传统的其它冷却方式, 可以为电机的运行提供安全、可靠和高效的绝缘及冷却效果, 相应地有必要对定子温度场进行准确的计算分析以满足进一步应用的要求。该文以1台应用该冷却系统运行的50MW汽轮发电机的定子为研究对象, 首次建立了较完整的定子三维温度场的仿真数学模型, 采用数值模拟与试验对比分析的方法, 对定子绕组内冷、负荷变化以及冷凝器工况等因素对电机温度场的影响进行了研究, 得到了新型蒸发冷却电机定子温度场的分布

规律。仿真结果与试验数据吻合较好, 为蒸发冷却技术在大型汽轮发电机中的进一步应用提供了理论依据。

关键词: 汽轮发电机; 蒸发冷却; 内冷; 定子; 温度场

0 引言

采用水氢氢(即转子采用水内冷、定子绕组及铁心采用氢冷)或全氢冷的冷却方式是当前大型汽轮发电机的主要冷却方式。虽然近年来汽轮发电机采用空气冷却技术有了很大发展, 但由于空气冷却能力较低, 随着设计容量的增大, 空冷电机制造体积增加很大, 而且通风损耗大、效率低、定转子温升高, 以至影响绝缘寿命。而电机采用氢冷系统由于存在密封防爆问题一直是安全运行的隐患, 水冷系统也存在着堵、漏水及水力钻孔等问题, 使得水(氢)冷电机的运行可靠性降低。目前还有采用以油冷为主的全液冷型电机, 存在结构复杂、维护不方便、需要注意防火防爆以及容易因为定子绝缘劣化造成事故等问题。针对上述问题, 中国科学院电工研究所开发了定子铁心浸润式与绕组内强迫循环冷却结合的新型蒸发冷却系统, 由于具有综合优势而成为大容量、高功率密度电机冷却方式的发展方向之一^[1-4]。除了用于新建机组, 这种冷却系统也可用于对现有的大中型汽轮发电机的定子进行改造, 例如, 对采用水冷技术的汽轮发电机组使用蒸发冷却介质替代现有的水介质, 可以有效提高电机运行的安全可靠, 而且不必对发电机做大的结构改造, 是一种比较现实可行的方案。

由于汽轮发电机采用卧式结构，定子绕组难以采用自循环蒸发冷却技术，而且试验复杂、费用昂贵，所以关于汽轮发电机采用蒸发冷却技术的研究很少^[5-7]。文献[5]对大型汽轮发电机的定子绕组采用蒸发冷却介质内冷时的空心导线温升进行了一维的试验模拟分析；文献[6]对一台采用全浸润式蒸发冷却定子的异步发电机的定子进行了简化三维温度场的计算分析和试验研究，但忽略了铁心长度、叠片风道等因素的影响；文献[7]采用二维有限元法通过磁热直接耦合的方法分析了蒸发冷却汽轮发电机的负序暂态发热问题。由于蒸发冷却效果与发热材料物性与表面状况、冷却介质的物性与所在空间的压力等诸多因素相关，简化的数学分析模型对电机内部真实温度场的描述会具有较大的偏差。本文针对定子铁心浸润与绕组内强迫循环冷却结合的蒸发冷却系统建立了较完整的热计算模型，在以往研究成果的基础上，通过详细的仿真计算与试验研究，确定了蒸发冷却电机内各部件的换热系数和变化规律，并讨论了内冷系统、电机运行工况变化以及冷却器系统运行工况变化对电机内温度场的影响，为蒸发冷却电机的定子发热计算提供了新的理论依据。

通过对1台50MW蒸发冷却汽轮发电机的定子温度场进行的仿真计算，及与试验和运行测试数据的对比分析，证明了本文方法的准确性和适用性。

1 汽轮发电机定子温度场计算

1.1 电机参数

50MW蒸发冷却汽轮发电机外形如图1所示，电机额定功率 $P_N=50$ MW；功率因数 $\cos\phi_N=0.85$ ；额定电压 $U_N=10.5$ kV；额定转速 $n_N=3000$ rad/min；定子铁心外径 $D_s=1910$ mm；定子铁心内径 $D_i=920$ mm；定子铁心长度 $l=2740$ mm；定子绕组半匝长度 $l_c=4934$ mm；定子槽数 $Q_s=42$ 。



图1 50MW蒸发冷却汽轮发电机

Fig.1 50MW evaporative cooling turbo-generator

1.2 基本假定及物理模型

50MW汽轮发电机蒸发冷却系统是在原双水

内冷系统的基础上改造而成^[8]，根据电机的制造特点作以下基本假定：

(1) 认为电机的设计制造使得每匝绕组内每根股线的涡流效应系数相同，计算时取平均值。

(2) 由定子结构的对称性，认为定子槽中心面和定子齿中心面是绝热面。

(3) 定子绕组采用内冷方式时，进行介质的定性温度计算时，假定绕组损耗产生的热量均由冷却介质带走；进行定子绕组无内冷的温度场计算时，则不考虑绕组空心导线内的冷却效果。

(4) 取消了风扇，定转子间通风系统定子套筒与转子间的空气温度沿轴向线性增加。

(5) 槽内绝缘(股线间绝缘、层间绝缘、主绝缘等)的热物理性质参数认为都是相同的。

根据上述假设，物理模型采用包含全轴向长度的定子铁心(叠片及风沟道)、定子绕组(直线部分和端部)的半个齿距部分作为求解域。由于绕组内部冷却介质通道采用并联水路方式，因此求解域内的上下层绕组长度均为半匝长。定子仿真模型结构如图2所示。

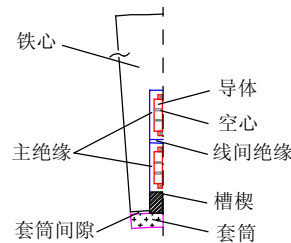


图2 定子结构(半齿距)

Fig.2 Cross section of stator (half of pitch)

1.3 数值分析方程及边界条件

汽轮发电机定子的铁心和绕组是主要发热部件，因此本文采用具有内部热源的三维温度场分析方法^[9-14]，求解域的热传导方程为

$$\nabla \cdot (I \nabla T) = -q \tag{1}$$

式中： I 为热传导率，W/(m·K)； T 为温度，K； q 为内部发热源的发热密度，W/m³。

在三维直角坐标系下，忽略辐射换热过程，式(1)可写为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} (I_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (I_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (I_z \frac{\partial T}{\partial z}) = -q \\ T|_{G_1} = T_w \\ -I_n \frac{\partial T}{\partial n} |_{G_2} = q_0 \\ -I_n \frac{\partial T}{\partial n} |_{G_3} = h(T - T_f) |_{G_3} \end{cases} \tag{2}$$

式中: q 含义同前; G_1 为第 1 类边界条件的物体边界; T_w 为已知壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; I_n 为第 2 类边界条件的垂直于界面 G_2 的热传导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; q_0 为通过界面 G_2 的热流密度, W/m^2 ; λ_n 为第 3 类边界条件的垂直于界面 G_3 的热传导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T_f 为在界面 G_3 与物体接触的冷却介质的温度, $^{\circ}\text{C}$; h 为在界面 G_3 的与物体接触的冷却介质的换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

1.4 蒸发冷却介质温度、热传导率以及换热系数的确定

1.4.1 蒸发冷却介质温度

蒸发冷却介质温度即进行温度场计算时采用的蒸发冷却介质的饱和温度, 由定子的热负荷以及密封腔体内的空气压力决定, 因此调节定子电流、导体内蒸发冷却介质的流速以及冷却器的冷却功率均可以引起介质温度的变化, 在进行分析计算时须根据上述实际运行条件确定。50MW 电机(上海西郊变)通过长期运行, 得到所采用的蒸发冷却介质 F113 在常温常压下的运行温度基本稳定在 50°C 左右, 本文进行稳态温度场计算时亦取这一数值作为边界条件。

1.4.2 热传导率

由于采用浸泡式蒸发冷却方式为定子绕组提供了一个气、液、固三相状态的优良的绝缘环境。其热传导率计算无法简单的用绝缘材料的物性参数进行推算, 因此需采用等效热传导系数的概念^[15]:

$$l = \sum_{i=1}^n b_i / \sum_{i=1}^n (b_i / l_i) \quad (3)$$

式中: l 为绝缘等效热传导系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; l_i 、 b_i 为第 i 层(共计 n 层)介质传热系数和厚度。

1.4.3 换热系数

浸泡式蒸发冷却定子冷却系统的换热系数主要考虑如下:

(1) 导线内冷却介质的对流换热系数。

由于在电机定子绕组的导线空心内采用强迫循环冷却方式, 液态冷却工质的雷诺数很大, 在导线空心内壁处的换热属于管内湍流强迫对流换热, 目前使用最广的换热系数计算公式为^[15]

$$h = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} I_K / d \quad (4)$$

式中: Re 、 Pr 分别为绕组内冷却介质的雷诺数和普朗特数; d 为管道等效水利直径, m ; I_K 为计算区段内冷却介质在定性温度时的热传导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

导体采用强迫循环内冷时, 由于冷却介质在流动的过程中不断地被加热, 因此仿真计算时需要根

据 1.1 节中的基本假定(3)确定出介质的定型温度设定初值。为了保证温度场计算的精确度, 必须根据介质的流速, 将导体沿轴向划分成数个计算区段, 每个区段内的介质温度认为是恒定的。

(2) 定子套筒与气隙的对流换热系数。

定子采用蒸发冷却系统, 取消了原设计的风扇系统, 定子套筒内径沿轴向设计成具有一定锥度(汽轮机侧直径较小), 使得定转子间气隙具有一定的吸气冷却能力, 根据电机内空气动力学分析方法^[16], 通过试验和仿真分析得到汽轮发电机定子套筒与转子间气隙的换热系数与定子套筒表面热流密度变化相关, 如图 3 所示(图中计算用曲线系根据试验数据拟和得到, 下同)。

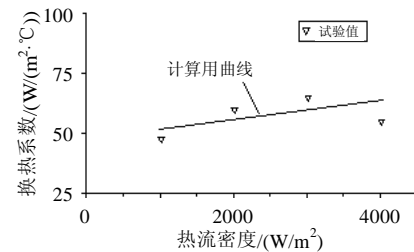


图 3 定转子间气隙内的传热系数

Fig.3 Coefficient of heat transfer in the gap

(3) 定子内蒸发冷却介质的沸腾换热系数。

由于受加热面的材料与表面状况、加热面的过热度、液体所在空间的压力以及液体的物性等诸多因素影响, 因此通用的沸腾换热系数计算理论公式很难获得, 目前已有的一些试验得到的经验公式的计算结果与测量误差也较大(平均偏离度达 20%), 使得相应关联式的应用很难具有普遍性, 需要依据具体的试验数据来确定特定适用条件下的沸腾换热系数。

定子铁心端部表面、定子铁心叠片外表面以及定子绕组端部由于与冷却介质直接接触面积大, 流动通道宽敞, 属于大容器内的沸腾传热, 参考以往的研究成果, 通过试验和仿真计算得到卧式汽轮发电机内使用蒸发冷却介质 F113 时的换热系数计算公式为^[17]

$$h = 3.09 q^{0.75} (0.18 + 1.53 p / p_c) \quad (5)$$

式中: p_c 为介质的临界压力, MPa ; p 为介质的工作压力, MPa 。

定子铁心叠片风道内的蒸发冷却传热情况更为复杂, 除了前述各项因素外, 不同的绝缘结构以及固定方法不同时, 冷却介质的传热也完全不同, 中科院电工研究所通过大量试验和数值仿真得到

的蒸发冷却介质 F113 在卧式定子铁心槽风沟道内的换热系数^[6,15]如图 4 所示。

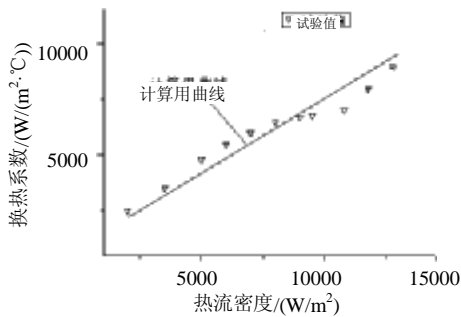


图 4 风沟道内的传热系数
Fig.4 Coefficient of heat transfer in the duct

2 计算结果与试验分析

2.1 边界条件

由前述假设中可知：定子铁心齿和槽中心面为绝热面；电机定子绕组进水的温度与汽轮机侧气隙空气入口处的温度均为 40℃，为第 1 类边界条件；定子绕组导体与绝缘层的接触面为第 2 类边界条件；定子套筒的气隙表面、绕组内外表面、定子铁心外表面及通风沟道表面等为第 3 类边界条件。

2.2 数值计算

为了验证计算方法的准确性，对 50MW 汽轮发电机在额定工况运行条件下的温度场进行了数值计算，如图 5 所示。

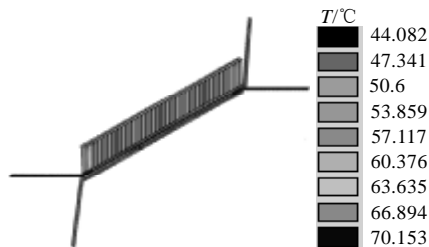


图 5 额定工况下的定子温度场
Fig.5 Temperature field in stator at rated load

为了能够准确分析蒸发冷却技术在汽轮发电机上应用的实际效果，在电机铁心以及上下层绕组间沿电机轴向不同位置埋设了测温元件，额定工况下定子各部分元件的轴向温度分布的计算值与试验值的比较情况见图 6~7。

从图 6、7 可以看到，计算结果和实测数据吻合较好，定子铁心温度计算值与测量值最大误差为 6.2℃，绕组温度计算值与测量值最大误差为 5.2℃。考虑到测量精度等因素，计算值与测量值的误差在 10% 左右，计算有足够的精确度，可以满足工程实际应用的要求。计算和试验测试显示，在浸润式蒸

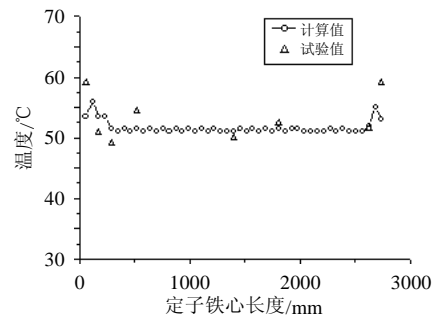


图 6 定子铁心轴向温度
Fig.6 Temperature of stator core at axial direction

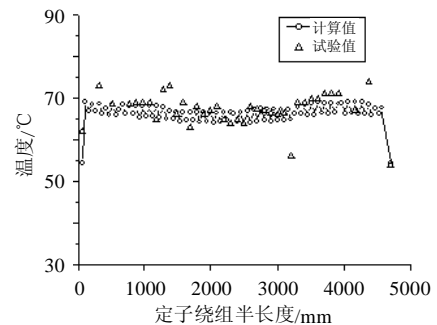


图 7 定子绕组温度
Fig.7 Temperature of stator winding

发冷却和内冷的双重冷却作用下，定子绕组和铁心温升较小，冷却效果良好，而且温度分布较为均匀，这有利于延长绝缘寿命，减小热变形。定子铁心的轴向温度在直线部分变化很小，并且与冷却工质的沸点温度接近，可以认为温升主要取决于冷却工质的物理特性；而在铁心端部由于发热较严重，因此铁心内部温升较高，但在铁心端面部分由于与冷却工质充分接触，冷却效果较好，温升较低。还可以看到，由于定子铁心与绕组内采用同一种冷却介质，物性稳定，因而绕组直线部分与铁心间的温差分布也较均匀且基本对称于定子轴向中心面，这样可以有效避免因轴向温差变化较大导致的铁心翘曲和绕组在槽内发生滑动。

2.3 绕组内冷的影响

对在额定工况条件下仅采用定子浸润式蒸发冷却的电机进行了计算和测试，如图 8 所示，与额定工况试验比较如表 1(表中温度为沿定子铁心轴向和绕组半匝长度内测点的平均值，下同)所示，可以看到定子铁心的温升情况几乎没有变化，定子绕组温升则明显增大，可知浸润蒸发冷却对定子铁心的冷却效果受定子绕组部分发热的影响较小，而对定子绕组的冷却能力略显不足，虽然可以满足额定工况的温升要求，但裕度已经很小。在进行 1.2 倍过负荷运行试验时，定子绕组温升很快就达到限值^[8]，

造成上述现象的主要原因在于浸润式蒸发冷却能力的强化需要对定子绕组的绝缘系统进行相应的改进(目前改进的绝缘方案已在中小容量电机内进行运行试验^[6]), 而 50MW 蒸发冷却汽轮发电机制造时仍采用现有的绝缘设计标准, 因此在一定程度上削弱了浸润式蒸发冷却对定子绕组的冷却能力。计算和试验表明, 在现有绝缘设计标准条件下, 尽管绕组强迫循环内冷采用的蒸发冷却介质的冷却能力并非最好, 但由于内冷系统效率较高, 采用蒸发冷却介质对绕组进行内冷足以弥补浸润式蒸发外冷的不足, 并可以使电机具有一定的冷却容量裕度, 从而满足一定的超负荷运行能力要求。由于大容量汽轮发电机定子发热严重, 对于电机安全运行的可靠性要求很高, 采用浸润式蒸发冷却与强迫循环内冷联合的冷却方式无疑是适宜的。

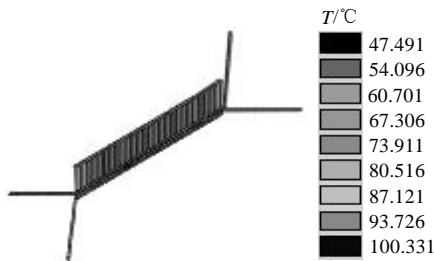


图 8 额定工况下无内冷时的定子温度场
Fig.8 Temperature field in stator at rated load without inner cooling

表 1 额定工况下有无内冷时的定子温升比较
Tab.1 Comparison of average temperature rise with or without inner cooling at rated load

位置	强迫循环冷却			无绕组内冷		
	计算值/K	实测值/K	相对误差/%	计算值/K	实测值/K	相对误差/%
铁心	30.6	27.7	10	29.8	26.8	11
绕组	44.4	42.3	5	63	57	10

2.4 电机负荷变化的影响

在采用浸润式蒸发冷却与强迫循环内冷结合的混合冷却方式条件下, 对电机在输出 50% 额定负荷条件下定子温升的试验和计算结果如表 2 所示, 可以看到计算模型不仅具有足够的精确度, 而且对于计算条件变化的适应性较好。

表 2 50% 额定负荷条件下定子温升
Tab.2 Temperature rise of stator at half rated load

位置	计算值/K	实测值/K	相对误差/%
铁心	23.1	21.6	6.5
绕组	39.1	36.3	7.7

负荷减少一半, 铁心温度降低约为 6℃, 绕组温度降低约为 7℃, 可以看到运行负荷在较大的范围内变化时, 电机内各部件的温度变化则相对较

小。由于定子绕组内外采用相同的冷却介质进行冷却, 定子铁心与绕组的温度变化较为一致。上述这些特点无疑非常有利于减少影响电机安全运行的热应力变化带来的不利因素, 特别是对于某些需要频繁进行负荷调节的发电机组(例如调峰用发电机等) 的长期安全运行。

2.5 冷却器冷凝功率的影响

电机内为介质蒸发预留有一定的空间, 蒸发的介质通过冷却器冷却后循环使用, 因此冷却器的运行状态与电机整体运行密切相关。调节冷却器的冷却水量, 可以在一定范围内调节冷却器的冷凝功率, 从而改变蒸发冷却介质的饱和温度, 根据第 1 节中的分析可知会对与冷却介质相关的换热产生影响。试验中, 在额定工况下减小冷却水量, 冷凝器压力明显增高, 相应地介质的饱和温度增高, 而介质蒸发量则相应地减少, 电机冷却系统达到新的平衡状态。从表 3 可以看到, 电机定子内的各部件温升也相应增大, 但变化幅值较小, 可见蒸发冷却系统对冷却器的非正常运行具有较好的适应性。但由于压力增加一方面会引起电机温升增加, 另一方面也不利于电机的密封, 会导致介质发生过多泄漏。因此, 在设计冷凝器时需要有较高的冗余度, 允许冷却水量在一定范围内变化, 必要时可以具有较长时间的冷却水断流运行能力。

表 3 不同冷凝条件下定子温升比较
Tab.3 Comparison of temperature rise of stator with different condensing power

冷却条件			位置			
冷却水流量/(t/h)	冷凝器压力/MPa	液体饱和温度/℃	铁心		绕组	
			计算值	实测值	计算值	实测值
70	0	47.6	30.6	29.7	44.4	42.3
50	0.008	48.9	31.2	30.8	45.1	42.8

可以看到, 在以上分析中, 温升的计算平均值与实测平均值相比, 数值偏大, 主要原因除测量精度等因素外, 计算中边界条件假设的定转子间气隙温度与计算所得温度有差别, 而且在确定蒸发冷却换热系数时, 试验分析和计算中均假定了蒸发冷却换热是沿圆周均匀分布的, 而实际上会受到电机内部结构的影响, 从而导致电机内冷却工质和部件的温度沿径向到圆周的测量值分散性较大

3 结论

(1) 本文通过三维有限元计算分析了采用铁心浸润与强迫循环内冷方式结合的蒸发冷却汽轮发电机的定子三维温度场, 以 50MW 实际运行电机

为研究对象, 计算结果与实测数据吻合较好, 计算模型具有足够的准确性。试验、运行和计算分析结果均表明新型蒸发冷却系统是一种高效、易维护、安全性好的冷却方式。

(2) 在现有绝缘设计标准条件下, 是否采用强迫循环内冷对定子绕组温升影响较大, 采用浸润式蒸发冷却与强迫循环内冷结合的混合冷却方式可以使得冷却作用内外叠加, 电机整体冷却效果最好, 温升较低且温度分布较均匀。电机负荷发生较大变化时, 对于定子各部件的温升和温度分布的影响则较小, 有利于电机的长期安全运行, 充分显示了新型蒸发冷却技术的优越性。

(3) 冷凝器工作状况的改变会对电机内温升产生一定的影响, 而新型蒸发冷却系统对冷却器的非正常运行具有良好的适应性。

参考文献

- [1] Gu Guobiao, Xiong Nan. The development of evaporation-cooling technology for large generator in China[C]. Proceedings of CICEM, Xi'an, China, 1999: 3-8.
- [2] 顾国彪. 蒸发冷却应用于 50MW 汽轮发电机的研究和开发[C]. 北京: 中国科学院电工所论文报告集, 1992, 23(7): 1-15.
Gu Guobiao. Research and development about the application of evaporative cooling technology to 50MW turbo-generator [C]. Bulletin of Institute of Electrical Engineering, Academic Sinica, Beijing, 1992, 23(7): 1-15(in Chinese).
- [3] Rao Fangquan, Gu Guobiao, Xiong Nan. Prospective application of evaporative cooling technology for large generator in 21century [C]. Proceedings of International Conference on Engineering and Technology Science, Beijing, China, 2000: 317-320.
- [4] 姚若萍, 饶芳权. 蒸发冷却水轮发电机定子温度场研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 87-90.
Yao Ruoping, Rao Fangquan. Analysis of 3D thermal field in the stator of large hydro-generator with evaporation-cooling system [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 87-90(in Chinese).
- [5] 阮琳, 顾国彪, 傅德平. 300MW 汽轮发电机定子绕组蒸发内冷的试验研究[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(4): 9-12.
Ruan lin, Gu Guobiao, Fu Deping. Experimental research of inner evaporative cooling of 300MW turbo generator stator windings [J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 2002, 21(4): 9-12(in Chinese)
- [6] 栾茹, 傅德平, 唐龙尧. 新型浸润式蒸发冷却水轮发电机定子三维温度场的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 205-209.
Luan Ru, Fu Deping, Tang Longyao. Study on 3D temperature distribution in new evaporative cooling asynchronous generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 205-209(in Chinese).
- [7] 温志伟, 顾国彪. 蒸发冷却汽轮发电机机序能力的改进计算[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(4): 34-37.
Wen Zhiwei, Gu Guobiao. Improving calculating of the negative sequence capability of the evaporative cooling turbo-generator [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(4): 34-37(in Chinese).
- [8] 傅德平, 朱荣建. 50MW 蒸发冷却汽轮发电机运行情况[J]. 电力设备, 2001, 2(3): 32-34.
Fu Deping, Zhu Rongjian. Operation of 50MW turbo-generator with evaporative cooling[J]. Electrical Equipment, 2001, 2(3): 32-34(in Chinese).
- [9] 李伟力, 丁树业, 靳慧勇. 基于耦合场的大型同步发电机定子温度场的数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 129-134.
Li Weili, Ding Shuye, Jin Huiyong. Numerical calculation of large synchronous generator stator temperature fields based on coupled fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 129-134(in Chinese).
- [10] 李伟力, 付敏, 周封, 等. 基于流体相似理论和三维有限元法计算大中型异步电动机的定子三维温度场[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 14-21.
Li Weili, Fu Min, Zhou Feng, et al. Calculation of 3D stator temperature fields of large and medium scale synchronous motor on the basis of theory of fluid similarity and 3D FEM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 14-21(in Chinese).
- [11] 李伟力, 候云鹏, 周封, 等. 大型水轮发电机定子股线导热的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 115-119.
Li Weili, Hou Yunpeng, Zhou Feng, et al. Heating analysis of stator strands of large htdro-generator based on numerical method [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 115-119(in Chinese).
- [12] 鲁涤强, 黄学良, 胡敏强. 汽轮发电机端部三维温度场的有限元计算[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 82-85.
Lu Diqiang, Huang Xueliang, Hu Minqiang. Using finite element method to calculate 3D thermal distribution in the end region of turbo-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 82-85(in Chinese).
- [13] 杜炎森, 黄学良, 刘磊, 等. 大型汽轮发电机端部三维温度场研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 95-101.
Du Yansen, Huang Xueliang, Liu Lei, et al. Study on temperature distribution in the end region of large turbogenerators[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 95-101(in Chinese).
- [14] 刘有军, 樊洪明, 何钟怡. 具有辐射边界的三维非规则域内稳态温度场分析[J]. 热能动力工程, 2002, 17(1): 83-84.
Liu Youjun, Fan Hongming, He Zhongyi. Analyzing 3D irregular reliable temperature field with radiating condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(1): 83-84(in Chinese).
- [15] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [16] AN 鲍里先科. 电机内的空气动力学与热传递[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [17] 林瑞泰. 沸腾换热[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

收稿日期: 2006-06-11。

作者简介:

温志伟(1973—), 男, 河南籍, 博士研究生, 研究方向为同步电机内电磁场与发热研究, wenzhw@mail.iee.ac.cn;

顾国彪(1936—), 男, 上海籍, 研究员, 中国工程院院士, 研究电机的蒸发冷却技术;

王海峰(1966—), 男, 河南籍, 博士, 研究电机的蒸发冷却技术。

(编辑 车德竞)