

大型贯流式水轮发电机阻尼绕组损耗与发热

范镇南^{1,2}, 韩力¹, 周光厚^{1,3}, 侯小全³, 廖毅刚³

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 四川省电力公司技术技能培训中心, 成都 610072;

3. 东方电机股份有限公司研究试验中心, 德阳 618000)

摘要: 为了深入研究大型贯流式水轮发电机阻尼绕组的损耗和发热规律, 建立了发电机二维电磁场和转子三维温度场有限元模型, 考虑了电磁场时变、运动、非线性等因素对损耗的影响以及转子铁芯各向异性导热性能和磁极迎风面、背风面散热性能差异对发热的影响。在此基础上, 以东方电机股份有限公司生产的 36 MW 贯流式水轮发电机为例, 针对不同工况、结构和材料, 对阻尼绕组的损耗和温度进行了综合计算和对比分析, 并与实测数据进行了比较。结果表明, 该模型计算精度高, 发电机设计合理, 研究结论对探讨大型贯流式水轮发电机阻尼绕组的损耗发热规律、改进其设计、提高发电机与电网的运行可靠性具有参考价值。

关键词: 贯流式水轮发电机; 阻尼绕组; 电磁场; 温度场; 有限元; 损耗; 发热

中图分类号: TM312

文献标志码: A

文章编号: 1003-6520(2011)02-0468-08

Losses and Heat on Damper Winding in Large Tubular Hydro generator

FAN Zhen nan^{1,2}, HAN Li¹, ZHOU Guang hou^{1,3}, HOU Xiao quan³, LIAO Yi gang³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Electric Power Training Center of Sichuan, Chengdu 610072, China;

3. Research & Test Center of Dongfang Electrical Machinery Company, Limited, Deyang 618000, China)

Abstract: To research the losses and heat of damper winding thoroughly, a 2D electromagnetic field model of tubular hydro generator and a 3D temperature field model of the rotor are established by the finite element method. The factors such as time varying, moving and nonlinearity of the electromagnetic field, the anisotropy heat conduction of the rotor core and different head dissipation of the pole windward, and lee side of the temperature field are considered. Furthermore, according to different operating conditions, structures, and materials, the losses and temperatures of the damper winding in a 36MW tubular hydro generator manufactured by Dongfang Electrical Machinery Company Limited are comprehensively calculated and analyzed, and the data are compared with the test ones. The results show that the computation precision is satisfied and the generator design is reasonable. The research is favorable for discovering the rules of the losses and heat of damper winding, improving its design, and enhancing the operation reliability of the large hydro generator and electric network.

Key words: tubular hydro generator; damper winding; electromagnetic field; temperature field; finite element; losses; heat

0 引言

阻尼绕组是水轮发电机的重要组成部分, 对发

基金资助项目: 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512709203); 重庆市自然科学基金(CSTC, 2008BB6163); 中央高校基本科研业务费(CDJXS 11151152)。

Project Supported by Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(2007DA10512709203), Chong Qing Natural Science Foundation(CSTC, 2008BB6163, Supported by the Fundamental Research Fund for the Central Universities (CDJXS 11151152).

电机和电网的安全稳定运行具有重要影响。贯流式水轮发电机是一种开发利用低水头、大流量水力资源的良好机型。与同容量的轴流式机组相比, 采用贯流式机组可节省工程投资 10%~25%, 增加年发电量 3%~5%, 具有明显的经济优势, 因此在 20 m 以下的低水头电站中得到了广泛应用^[1]。但由于受内部空间结构的限制, 贯流式机组的电磁设计和散热设计比较困难, 发生过热的可能性也随之增加, 进而对发电机与电网的安全稳定运行造成隐患。近年来, 凌津滩和飞来峡水电站分别引进的日立公司和伊林公司的大型贯流式水轮发电机, 在正常运行工况下先后发生阻尼条过热熔断的严重事故^[2-3]。为

改进设计, 提高机组与电网安全稳定运行水平, 很有必要对大型贯流式水轮发电机阻尼绕组的损耗与发热规律进行深入研究。

水轮发电机转子结构复杂, 除了励磁绕组损耗可用常规的电路方法准确计算之外, 阻尼绕组与铁芯损耗的精确计算都十分困难。加之转子旋转因素的影响, 使得各部分的散热情况也很难准确确定。自 Armor 等人首次采用有限元法计算大型汽轮发电机定子铁芯三维温度场以来^[4], 数值计算方法在电机损耗发热研究领域得到了广泛应用^[3-19], 但涉及大型水轮发电机转子及阻尼绕组损耗发热计算的文献不多, 且其中大部分文献研究的对象为立式水轮发电机^[12-16, 18], 而贯流式水轮发电机转子及阻尼绕组损耗发热计算的文献很少^[3, 17, 19]。

针对大型立式水轮发电机转子及阻尼绕组温度场的计算, 文献[12]采用三维等参元法, 研究了转子迎风面和背风面不均匀表面散热系数比值对电机转子中部及端部温度场的影响, 以及转子磁极表面的附加损耗对转子温度场的影响; 文献[13-14]将转子三维温度场求解与电机整体通风网络计算联系起来, 得出了包括阻尼绕组在内的转子各部件温度分布。但上述文献均采用传统的电路和磁路计算公式或电磁场解析计算公式求解转子损耗, 没有考虑转子旋转及阻尼条涡流等因素的影响。文献[15]应用静磁场有限元法, 对发电机空载工况气隙磁场进行计算, 然后利用解析公式计算转子损耗, 也没有考虑转子旋转带来的电磁场时变效应以及负载工况下阻尼条涡流损耗的直接计算方法。近年来, 对于电磁场有限元运动问题的研究取得了较大进展^[20-21], 运动电磁场有限元计算模型开始在水轮发电机阻尼绕组电磁场计算中得到应用。文献[16]考虑了转子旋转的影响, 应用运动电磁场时步有限元法, 计算了抽水蓄能发电机在正常与断条情况下的阻尼条电流, 但未进一步研究阻尼绕组的损耗和发热问题。文献[3]针对飞来峡水电站贯流式水轮发电机阻尼绕组断条故障, 利用瞬变电磁场模型和三维温度场模型, 对发电机对称运行工况下的阻尼绕组损耗发热, 进行了卓有成效的计算分析, 但没有具体介绍建模与计算的过程。文献[17-19]应用流场-温度场综合计算方法, 研究了水轮发电机转子温度分布, 但由于未能合理考虑阻尼绕组自身涡流损耗, 从而对阻尼绕组发热计算结果的准确性造成了不利影响。而综合考虑不同工况、不同结构、不同材料等因素对大型贯流式水轮发电机阻尼绕组损耗与发热影响的文献, 尚未见报道。

为此, 本文选定 1 台东方电机股份有限公司生

产的桐子壕水电站 36 MW 贯流式水轮发电机为研究对象, 建立了二维运动电磁场时步有限元计算模型, 结合转子三维温度场有限元模型, 通过综合计算与对比分析, 研究了不同工况、结构、材料对阻尼绕组损耗和发热的影响, 并与凌津滩和飞来峡水电站故障机组的设计方案进行了比较。

1 发电机二维电磁场模型

本文所选桐子壕水电站、凌津滩水电站和飞来峡水电站的 3 台机组的基本参数如表 1 所示。

表 1 发电机基本参数对比
Tab. 1 Comparison of the basic data of the generators

| 参数 | 数值 | | |
|----------|-------|-------|-------|
| | 桐子壕机组 | 凌津滩机组 | 飞来峡机组 |
| 额定功率/MW | 36 | 30 | 35 |
| 额定电压/kV | 10.5 | 10.5 | 10.5 |
| 额定电流/A | 2 151 | 1 736 | 2 144 |
| 额定功率因数 | 0.92 | 0.95 | 0.9 |
| 额定励磁电流/A | 857 | 943 | 1 079 |
| 极数 | 72 | 76 | 72 |
| 定子槽数 | 324 | 342 | 324 |
| 每极阻尼条根数 | 4 | 4 | 3 |
| 运行情况 | 良好 | 损坏 | 损坏 |

1.1 运动电磁场边值问题

求解区域内, 考虑到铁磁材料的非线性, 描述非线性时变运动电磁场问题的偏微分方程为^[21]

$$\nabla \times (\nabla \nabla \times \mathbf{A}) + \alpha \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right) = \mathbf{J}_s. \quad (1)$$

式中, \mathbf{A} 为矢量磁位; \mathbf{J}_s 为外部强加的源电流密度; v 为媒质的磁阻率; \mathbf{V} 为媒质相对于参考坐标系的运动速度; σ 为媒质的电导率。

在二维情况下, 设电流密度和矢量磁位只有 z 轴分量, 速度只有 x 轴分量。引入库仑规范 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, 加入边界条件, 便可得到发电机二维非线性时变运动电磁场的边值问题, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} (v \frac{\partial A_z}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v \frac{\partial A_z}{\partial y}) = -J_{sz} + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + V_x \sigma \frac{\partial A_z}{\partial x}; \\ A_z |_{AB} = A_z |_{CD} = 0; \\ A_z |_{AC} = A_z |_{BD}. \end{cases} \quad (2)$$

由于桐子壕机组采用分数槽绕组, 每极每相槽数 $q = 1 \frac{1}{2}$, 因此电磁场有限元求解区域定为 1 个单元电机, 共包括 2 个磁极。其剖分如图 1 所示, 共 10 123 个单元, 27 683 个节点。

1.2 阻尼条损耗计算

通过有限元后处理, 可分别求出阻尼条中感应

的涡流密度以及 1 个剖分单元中的电流、损耗:

$$J = -\alpha_b \frac{\partial A_z}{\partial t}; \quad (3)$$

$$I_e = \iint_{\Delta} dx dy; \quad (4)$$

$$p_e = I_e^2 \frac{L_b}{\alpha_b \Delta_e}. \quad (5)$$

式中, α_b 为阻尼条电导率; L_b 为阻尼条长度; Δ_e 为阻尼条区域内 1 个剖分单元的面积。

因此, 1 根阻尼条的涡流损耗为

$$p_{db} = \sum_{e=1}^k p_e. \quad (6)$$

式中, k 为 1 根阻尼条区域的剖分单元总数。

1.3 铁芯损耗的计算

对发电机空载运行工况进行有限元分析, 在求得空载时的气隙平均磁密 B_{δ} 后, 将其与相关参数一起代入下述公式, 即可求出转子铁芯损耗。

空载时, 由气隙磁导齿谐波在极靴表面引起的附加损耗为^[22]

$$p_{Fep0} = \Delta \left(\frac{K_{\delta 1} - 1}{1000} B_{\delta} t_1 \right)^2 \left(\frac{Z n_N}{10000} \right)^{1.5} \frac{2p A_p}{1000} \times 10^{-3}. \quad (7)$$

式中, Δ 为转子冲片厚度; $K_{\delta 1}$ 为定子齿的气隙系数; t_1 为定子齿距; Z 为定子槽数; n_N 为发电机额定转速; p 为极对数; A_p 为极靴表面计算面积。

根据式(7), 可求出满载时定子齿谐波磁场在极靴表面产生的附加损耗

$$p_{2tk} = k' (X_{ad}^* \frac{2p}{Z(K_{\delta 1} - 1)})^2 p_{Fep0}. \quad (8)$$

式中, k' 为比例系数; X_{ad}^* 为直轴电枢反应电抗的标么值, 其对应基准值为发电机阻抗基值。

满载时, 定子绕组相带谐波磁动势在极靴表面产生的附加损耗为^[22-23]

$$p_{2vk} = \sum k'_{0v} (B_{\delta v} 2\tau_v)^2 f_v^{1.5} k_{vA}^2 p_{0v}. \quad (9)$$

式中, $v=5, 7, 11, \dots$; k'_{0v} 、 k_{vA} 为计算系数, 与转子材料有关; $B_{\delta v}$ 为 v 次谐波磁密幅值; τ_v 为 v 次谐波极距; f_v 为 v 次谐波频率。

满载时, 转子铁芯损耗为上述 3 项损耗之和

$$p_{iron} = p_{Fep0} + p_{2tk} + p_{2vk}. \quad (10)$$

2 转子三维温度场模型

2.1 求解区域及其剖分

设发电机通风系统结构对称, 转子温度分布关于其中心断面对称。这时, 可把温度场的求解区域定为 1 个磁极从转子端面到中心断面的半个轴向段, 该区域由转子铁芯、阻尼绕组、励磁绕组、托板等部件组成。进行有限元剖分后, 共得到 238 670 个棱柱单元和 131 967 个节点, 如图 2 所示。

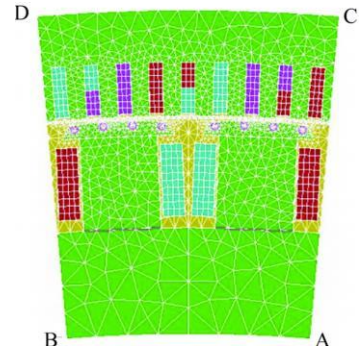


图 1 电磁场求解区域及网格剖分

Fig. 1 Problem region and meshes of electromagnetic field

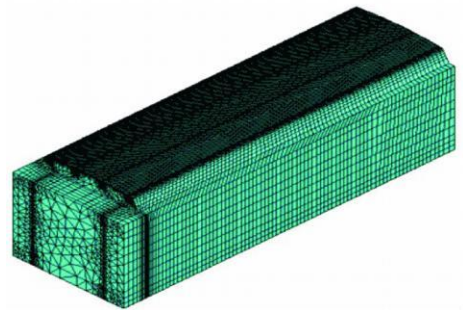


图 2 温度场求解区域及网格剖分

Fig. 2 Problem region and meshes of temperature field

2.2 转子三维温度场边值问题

考虑到转子磁极导热能力的各向异性特点, 求解区域内的三维稳态温度场边值问题为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z}) = -q_v; \\ \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{s_2} = 0; \\ \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{s_3} = -\alpha(\theta - \theta_f). \end{cases} \quad (11)$$

式中, θ 为待求温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; q_v 为热源密度, W/m^3 ; S_2 为满足绝热边界条件的转子中心断面及转子与磁轭交界面; S_3 为满足散热边界条件的各边界面; α 为 S_3 边界面上的散热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; θ_f 为 S_3 边界面上的温度。

2.3 散热系数的确定

转子旋转时, 极靴上表面的散热系数和励磁绕组的散热系数分别为^[22]:

$$\alpha = \frac{1 + 0.1\tau}{450}; \quad (12)$$

$$\alpha' = K\alpha'. \quad (13)$$

式中, τ 为极距, cm ; K 、 α' 根据电机结构确定。

考虑到转子迎风面的散热能力优于背风面, 在确定其散热系数时, 应分别乘以 1 个比例系数^[23]。

本文中, 迎风面和背风面的比例系数分别取 1.2 和 0.8, 端面的散热系数取迎风面和背风面的平均值。各部分散热系数的具体取值见表 2。

3 计算结果与分析

根据上述模型, 本文对桐子壕贯流式水轮发电机的电磁场与温度场进行了综合计算与分析, 研究了不同运行工况、不同结构、不同材料对阻尼绕组损耗和发热的影响。为便于论述, 将阻尼条从磁极背风面到迎风面依次进行编号, 最靠近背风面的右端阻尼条编号为 1, 最靠近迎风面的左端阻尼条编号为 4。

3.1 运行工况的影响

图 3 给出了空载和满载工况下发电机的磁场分布规律以及阻尼条的涡流和温度分布规律, 表 3 给出了发电机在空载、对称满载、对称满载叠加 12% 负序 (IEC 标准) 3 种不同工况时阻尼条损耗与温度的计算结果。

其中, $P_1 \sim P_4$ 和 $\sum P$ 分别表示第 1~4 号阻尼条的损耗和阻尼绕组的总损耗; θ_{max} 和 θ_{min} 分别表示阻尼绕组的最高温度和最低温度。

由图 3 和表 3 可见, 发电机在空载运行时, 由于磁场分布关于磁极中心线左右基本对称, 因此阻尼绕组的涡流、损耗也基本上关于磁极中心线左右对称, 1 号阻尼条与 4 号阻尼条的损耗大致相等, 2 号阻尼条与 3 号阻尼条的损耗大致相等。发电机在负载运行时, 由于电枢反应的作用, 气隙磁场分布发生了畸变, 磁极迎风面的磁场被削弱、背风面的磁场被加强, 此时阻尼绕组涡流与损耗分布的对称性不再存在。靠近背风面的 1 号阻尼条, 其涡流和损耗明显大于靠近迎风面的 4 号阻尼条。又因为背风面的散热能力低于迎风面, 所以位于背风面的阻尼条, 其温度明显高于迎风面的阻尼条。最高温度出现在 1 号阻尼条的中部, 最低温度出现在 4 号阻尼条的端部。发电机从空载到对称满载再到对称满载叠加 12% 负序, 阻尼绕组的损耗和温度进一步增加。对称满载叠加 12% 负序工况对应的阻尼绕组损耗最大, 其对应的最高温度是空载时的 1.85 倍, 增加了 57°C。可见发电机运行工况对阻尼绕组损耗和发热的影响非常明显。在以下的计算和分析中, 重点研究对称满载叠加 12% 负序运行工况。

3.2 槽配合的影响

取 6 种不同的槽配合, 在对称满载叠加 12% 负序工况下, 计算得到的阻尼绕组损耗和温度见表 4。

可见, 随着槽配合 t_2/t_1 的减小, 在定子槽距 t_1 不变的情况下, 阻尼条槽距 t_2 减小, 各根阻尼条向

表 2 磁极各部分的散热系数

Tab. 2 Coefficients of heat dissipation of the pole components $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

| 位置 | 散热系数 | 位置 | 散热系数 |
|-------|--------|---------|-------|
| 极靴端面 | 88.8 | 励磁绕组端面 | 101 |
| 极靴上表面 | 88.8 | 励磁绕组迎风面 | 121.2 |
| 极靴迎风面 | 106.56 | 励磁绕组背风面 | 80.8 |
| 极靴背风面 | 71.04 | 托板表面 | 21 |

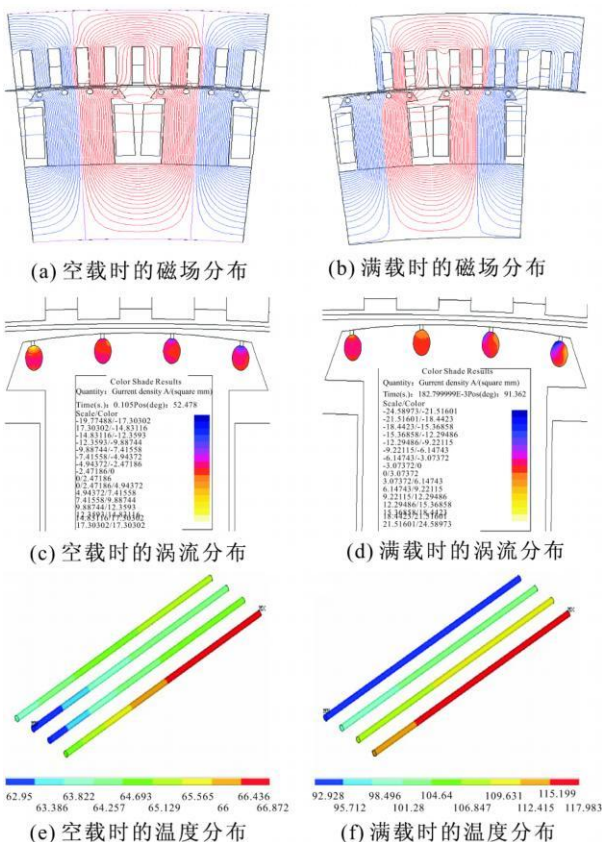


图 3 空载和满载时磁场、阻尼条涡流及温度分布

Fig. 3 Distribution of magnetic field, eddy current and temperature of damper bars at no load and rated load

表 3 不同工况时阻尼条的损耗和温度

Tab. 3 Losses and temperatures of the damper bars for different operating conditions

| 运行工况 | 损耗/W | | | | $\sum P$ | 温度/ $^\circ C$ | |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|----------------|----------------|
| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | | θ_{max} | θ_{min} |
| 空载 | 73 | 34 | 34 | 72 | 213 | 67 | 63 |
| 对称满载 | 334 | 231 | 139 | 84 | 788 | 118 | 93 |
| 12% 负序 | 397 | 270 | 182 | 128 | 977 | 124 | 98 |

磁极中心线靠近。由于气隙不均, 使得阻尼条顶部的气隙长度变小, 磁场在阻尼条中感应出更强的涡流, 从而使损耗增大、温度升高。槽配合对阻尼绕组

表4 不同槽配合 t_2/t_1 时阻尼条的损耗和温度
Tab.4 Losses and temperatures of the damper bars
for different t_2/t_1

| t_2/t_1 | 损耗/W | | | | | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|------------|------------------------|-----------------|
| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | ΣP | θ_{\max} | θ_{\min} |
| 0.93 | 397 | 270 | 182 | 128 | 977 | 124 | 98 |
| 0.9 | 413 | 290 | 218 | 152 | 1073 | 127 | 100 |
| 0.85 | 502 | 360 | 290 | 179 | 1331 | 136 | 105 |
| 0.8 | 583 | 478 | 373 | 190 | 1624 | 144 | 107 |
| 0.75 | 626 | 632 | 458 | 162 | 1878 | 156 | 111 |
| 0.7 | 633 | 790 | 513 | 144 | 2079 | 170 | 112 |

损耗和发热的影响相当明显,当 t_2/t_1 从 0.93 减小到 0.7 时,阻尼条的最高温度从 124°C 增加到 170°C ,增加了 46°C ,变化了 1.37 倍。对比发现,桐子壕、凌津滩和飞来峡机组的 t_2/t_1 分别为 0.93、0.59、0.9,桐子壕机组的设计方案更合理。为了便于比较,在以下的分析计算中,槽配合统一取 $t_2/t_1 = 0.93$ 。

3.3 阻尼条装配气隙的影响

阻尼条和阻尼槽之间的气隙称为阻尼条装配气隙,用 δ_B 表示。取 3 种不同的 δ_B ,在对称满载叠加 12% 负序工况下,计算得到的阻尼绕组温度见表 5。

不同 δ_B 对电磁场计算的影响很小,阻尼绕组的损耗基本相同。但由于空气的导热能力差,因此 δ_B 越大,阻尼条的散热能力就越差,温度就越高。装配气隙对阻尼绕组发热的影响相当明显。为了降低阻尼条的最高温度,在设计和工艺上应尽可能减小装配气隙的大小。对比发现,桐子壕、凌津滩和飞来峡机组的 δ_B 分别为 0.15、0.5 和 0.4 mm,可见桐子壕机组的设计方案更合理。

3.4 单边气隙长度的影响

取 3 种不同 b_s/δ 值,在对称满载叠加 12% 负序工况下,计算得到的阻尼绕组损耗和温度见表 6。

随着 b_s/δ 的增加,在定子槽宽 b_s 不变的情况下,单边最小气隙长度 δ 减小,气隙磁密增强,由定子开槽引起的气隙磁导不均匀程度增加,使各阻尼条中感应的涡流和损耗增大,从而使阻尼绕组的总损耗和温度也相应增加。对比发现,桐子壕、凌津滩和飞来峡机组的 b_s/δ 分别为 3.4、3.2 和 2.9。但由于桐子壕机组采用不均匀气隙,如果按平均气隙计算,其 $b_s/\delta = 2.7$ 。

3.5 阻尼条直径的影响

取 3 种不同的阻尼条直径 d_B ,在对称满载叠加 12% 负序工况下,计算得到的阻尼绕组损耗和温度

见表 7。

随着阻尼条直径 d_B 的减小,阻尼条体积减小,电流密度增大,阻尼绕组总损耗基本不变。但由于阻尼条的损耗密度增加,且阻尼条表面积减小,装配气隙的热阻增加,使阻尼条散热能力降低,以上原因都会使阻尼绕组温度升高。为了降低阻尼绕组的发热、防止阻尼绕组出现断条事故,应适当增加阻尼条直径。对比发现,桐子壕、凌津滩和飞来峡机组的 d_B 分别为 15、9.5、16 mm。

3.6 阻尼条电阻率的影响

取 3 种不同的阻尼条材料,其电阻率见表 8。

表5 不同 δ_B 时的阻尼绕组温度

Tab.5 Temperatures of damper winding for different δ_B

| δ_B/mm | θ_{\max} | | θ_{\min} | |
|----------------------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | 计算值/ $^{\circ}\text{C}$ | 变化率 | 计算值/ $^{\circ}\text{C}$ | 变化率 |
| 0 | 101.42 | 基值 | 89.64 | 基值 |
| 0.15 | 124.42 | 1.23 倍 | 97.56 | 1.09 倍 |
| 0.25 | 138.58 | 1.37 倍 | 102.08 | 1.14 倍 |

表6 不同 b_s/δ 时阻尼条的损耗和温度

Tab.6 Losses and temperatures of the damper bars for different b_s/δ

| b_s/δ | 损耗/W | | | | | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|------------|------------------------|-----------------|
| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | ΣP | θ_{\max} | θ_{\min} |
| 2.5 | 239 | 145 | 124 | 97 | 605 | 109 | 93 |
| 3.4 | 397 | 270 | 182 | 128 | 977 | 124 | 96 |
| 4.0 | 486 | 325 | 221 | 136 | 1168 | 129 | 98 |

表7 不同 d_B 时阻尼条的损耗和温度

Tab.7 Losses and temperatures of the damper bars for different d_B

| d_B/mm | 损耗/W | | | | | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|------------|------------------------|-----------------|
| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | ΣP | θ_{\max} | θ_{\min} |
| 20 | 405 | 332 | 198 | 115 | 1049 | 119 | 97 |
| 15 | 397 | 270 | 182 | 128 | 977 | 124 | 98 |
| 9.5 | 374 | 248 | 196 | 191 | 1008 | 133 | 107 |

表8 阻尼条材料不同时的电阻率

Tab.8 Resistivities for different materials of damper bars

| $10^{-7}\Omega \cdot \text{m}$ | | | |
|------------------------------------|------|-----|------|
| 阻尼条材料 | 纯铜 | 铜合金 | 黄铜 |
| 120 $^{\circ}\text{C}$ 时电阻率 ρ | 0.25 | 0.4 | 0.77 |

根据以上 3 种不同的阻尼条电阻率, 在对称满载叠加 12% 负序工况下, 计算得到的阻尼绕组损耗和温度见表 9。

随着阻尼绕组电阻率的增大, 单根阻尼条的损耗和阻尼绕组的总损耗都将增大, 最高温度也随之升高。为了减小阻尼绕组的损耗与发热, 采用纯铜阻尼条是恰当的。另一方面, 随着阻尼绕组电阻率的增大, 导致阻尼条内部某些区域涡流密度减小, 因此阻尼条损耗的增加程度不及电阻率增加的程度。

3.7 励磁绕组散热系数的影响

取 4 种不同的励磁绕组散热系数, 在对称满载叠加 12% 负序工况下, 计算得到的阻尼绕组温度见表 10。

可见, 励磁绕组表面散热系数对阻尼绕组的发热也有一定影响, 当励磁绕组散热系数减小时, 阻尼绕组的温度升高。因此, 现代发电机的励磁绕组一般均采用散热系数高的 7 边形铜排。

3.8 铁芯导热系数的影响

考虑到转子铁芯导热能力的各向异性特点, 取 5 种不同的磁极铁芯导热系数和 2 种不同的阻尼条材料, 在对称满载叠加 12% 负序工况下, 计算得到的阻尼绕组温度见表 11。

其中, λ 和 λ_a 分别为转子铁芯的径向导热系数和轴向导热系数。可见, 当铁芯导热能力下降时, 阻尼条的最高温度略有增加。由于黄铜的电阻率大、损耗大, 且导热能力比纯铜差, 因此黄铜阻尼条的温度高于纯铜。但总体来说, 当铁芯导热系数变化数倍时, 阻尼绕组温度变化也很小, 铁芯导热系数的变化对阻尼绕组发热的影响不大。

3.9 计算结果的验证

由于阻尼绕组自行闭合, 其温度的测量十分困难, 而励磁绕组的温度测量相对较易。为此, 本文通过励磁绕组温度的计算, 来验证电磁场和温度场综合计算的准确性。实测时, 桐子壕机组处于额定运行工况, 环境温度为 47.6°C, 在试验中通过电阻法实测得到的励磁绕组平均温度为 110°C。通过有限元计算得到的励磁绕组平均温度为 116.6°C, 两者相差 6%, 说明本文的模型和计算结果是正确的。

4 结论

1) 相对于传统的电路磁路模型、电磁场解析计算公式和静磁场有限元模型, 本文建立的运动电磁场时步有限元模型可以更全面地考虑转子旋转和时变及涡流等因素的影响, 得到的损耗与温度计算结果更为准确、合理。

表 9 不同阻尼条材料对应的损耗和温度

Tab. 9 Losses and temperatures of the damper bars for different materials

| 阻尼条材料 | 损耗/W | | | | | 温度/°C | |
|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-----------------|-----------------|
| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | ΣP | θ_{\max} | θ_{\min} |
| 纯铜 | 397 | 270 | 182 | 128 | 977 | 124 | 98 |
| 铜合金 | 449 | 275 | 196 | 156 | 1076 | 128 | 99 |
| 黄铜 | 534 | 301 | 247 | 250 | 1332 | 138 | 108 |

表 10 励磁绕组不同散热系数对应的阻尼绕组温度

Tab. 10 Temperatures of the damper winding for different heat dissipation coefficients of field winding

| 励磁绕组散热系数/(W·(m ² ·°C) ⁻¹) | $\theta_{\max}/^{\circ}\text{C}$ | $\theta_{\min}/^{\circ}\text{C}$ |
|--|----------------------------------|----------------------------------|
| 101.1 (7 边形铜排) | 124.42 | 97.56 |
| 91.0 | 127.46 | 100.61 |
| 80.9 | 130.93 | 104.12 |
| 72.8 (4 边形铜排) | 133.93 | 107.82 |

表 11 不同铁芯材料对应的的阻尼绕组温度

Tab. 11 Temperatures of the damper winding for different rotor core materials

| λ/λ_a | $\theta_{\max}/^{\circ}\text{C}$ | | $\theta_{\min}/^{\circ}\text{C}$ | |
|---------------------|----------------------------------|--------|----------------------------------|-------|
| | 纯铜条 | 黄铜条 | 纯铜条 | 黄铜条 |
| 55.6/4.0 | 101.27 | 106.72 | 89.16 | 91.58 |
| 51/19.6 | 101.42 | 106.90 | 89.04 | 92.74 |
| 40.6/3.4 | 102.24 | 107.88 | 88.82 | 92.31 |
| 19/4.0 | 105.10 | 111.40 | 88.02 | 91.11 |
| 16/1.95 | 105.88 | 112.40 | 87.74 | 90.81 |

2) 发电机在负载工况下, 同一磁极上各根阻尼条具有损耗与温度分布不均的特点, 背风面阻尼条的涡流、损耗与发热明显大于迎风面的阻尼条。

3) 运行工况与结构参数是影响阻尼系统损耗与发热的主要因素。适当提高槽配合、增加单边气隙长度、采用电导率大的阻尼条材料, 可以更好地抑制涡流损耗, 防止阻尼条发生过热。此外, 尽量减小阻尼条装配气隙、增大励磁绕组散热面积、合理增加阻尼条直径、采用导热能力较高的铁芯材料, 也可以提高散热效果, 降低阻尼条发热。

4) 东方电机股份有限公司制造的桐子壕机组, 从 2003 年 7 月投运以来, 一直安全运行。通过与实测数据的比较, 以及机组安全运行的实事, 均表明本文模型与计算结果是正确的、发电机设计是合理的。

参 考 文 献

- [1] 李朝阳. 贯流式机组在低水头电站的应用[J]. 发展, 2006, 19(9): 145-146.
LI Chaoyang. The application of bulb-type hydro generator set at low head hydropower station[J]. Developing, 2006, 19(9): 145-146.
- [2] 郭景斌. 水轮发电机阻尼绕组和磁极损坏机理分析[J]. 大电机技术, 2001, 31(7): 63-67.
GUO Jingbin. Analysis on the damage of damping winding and pole in hydrogenerator[J]. Large Electric Machine, 2001, 31(7): 63-67.
- [3] 邓东, 孙玉田, 谭国伟, 等. 飞来峡水电站发电机的运行故障分析[J]. 大电机技术, 2003, 33(6): 13-17.
DENG Dong, SUN Yutian, TAN Guowei, et al. Analysis on operating faults of generator in Feilaixia hydropower station[J]. Large Electric Machine, 2003, 33(6): 13-17.
- [4] Armor A F, Chari M V K. Heat flow in the stator core of large turbine generators by the method of three dimensional finite elements[J]. IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems, 1976, 95(5): 1648-1668.
- [5] Armor A F. Transient three dimensional finite element analysis of heat flow in turbine generator rotors[J]. IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems, 1980, 99(3): 934-946.
- [6] Khan G K M, Buckley G W, Bennett R B, et al. An integrated approach for the calculation of losses and temperatures in the end region of large turbine generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1990, 5(1): 183-194.
- [7] 任成燕, 严萍, 王珏, 等. 高压电缆绕组直线电机定子及绕组的涡流分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 16-19.
REN Chengyan, YAN Ping, WANG Jue, et al. Analysis of eddy current in stator and winding of high voltage linear motor[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 16-19.
- [8] 任成燕, 严萍, 王珏, 等. 高压电机电缆绕组的电磁特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1240-1245.
REN Chengyan, YAN Ping, WANG Jue, et al. Electromagnetic characteristics of cable windings in high voltage motor[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1240-1245.
- [9] 路义萍, 李伟力, 马贤好, 等. 大型空冷汽轮发电机转子温度场数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 7-13.
LU Yiping, LI Weili, MA Xianhao, et al. Numerical simulation of temperature field in rotor of large turbo generator with air coolant[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 7-13.
- [10] 李伟力, 李勇, 杨雪峰, 等. 大型空冷汽轮发电机定子端部温度场与流体场的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 80-87.
LI Weili, LI Yong, YANG Xuefeng, et al. Temperature and fluid flow field calculation and analysis of stator end of air cooled turbo generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 80-87.
- [11] 路义萍, 陈朋飞, 李俊亭, 等. 某新型空冷汽轮发电机转子通风方式的流场分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 63-68.
LU Yiping, CHEN Pengfei, LI Junting, et al. Flow field analysis of new type ventilation method in one air cooled turbo generator rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 63-68.
- [12] 李伟力, 周封, 侯云鹏, 等. 大型水轮发电机转子温度场的有限元计算及相关因素的分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 85-90.
LI Weili, ZHOU Feng, HOU Yuyun, et al. Calculation of rotor temperature field for hydro generator as well as the analysis on relevant factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 85-90.
- [13] 温嘉斌, 孟大伟, 鲁长滨. 大型水轮发电机通风发热综合计算[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 115-119.
WEN Jiarbin, MENG Dawei, LU Changbin. Synthetic calculation for the ventilation and heating of large waterwheel generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 115-119.
- [14] 温嘉斌, 孟大伟, 周美兰, 等. 大型水轮发电机通风发热场模型研究及通风结构优化计算[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 1-4.
WEN Jiarbin, MENG Dawei, ZHOU Meilan, et al. Field model research of ventilation and heat and optimal calculation of ventilation structure for large water wheel generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(6): 1-4.
- [15] 南日山, 张东, 李伟力. 凸极同步发电机空载下的气隙磁场波形特征系数及转子温度场的数值计算[J]. 大电机技术, 2003, 33(4): 23-26.
NAN Rishan, ZHANG Dong, LI Weili. Coupled numerical calculation of wave shape eigen coefficient of air gap magnetic field and rotor temperature field of a salient pole synchronous generator[J]. Large Electric Machine, 2003, 33(4): 23-26.
- [16] Karmaker H C. Broken damper bar detection studies using flux probe measurements and time stepping finite element analysis for salient-pole synchronous machines[C] // 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2003: 193-197.
- [17] 夏海霞, 姚缨英, 倪光正. 发电机通风系统流场及转子温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(5): 472-476.
XIA Haixia, YAO Yingying, NI Guangzheng. Analysis of ventilation fluid field and rotor temperature field of a generator[J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(5): 472-476.
- [18] 徐旭, 徐鸿, 李桃, 等. 立式水轮发电机通风系统及转子温度场研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1717-1719.
XU Xu, XU Hong, LI Tao, et al. Ventilation and stator temperature field in a vertical hydro power generator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(10): 1717-1719.
- [19] 朱殿华, 郭伟, 张雪. 水轮发电机通风散热系统的耦合仿真与参数分析[J]. 水利发电学报, 2009, 28(4): 176-180.
ZHU Dianhua, GUO Wei, ZHANG Xue. Study on simulation of fluid solid thermal coupled fields for the ventilation and heat rejection system of hydrogenerator[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 176-180.
- [20] 严登俊, 刘瑞芳, 胡敏强, 等. 处理电磁场有限元运动问题的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 163-167.
YAN Dengjun, LIU Ruifang, HU Minqiang, et al. A new method to deal with the motion problem in electromagnetic field finite element analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 163-167.
- [21] 胡敏强, 黄学良. 电机运行性能数值计算方法及应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003.
HU Minqiang, HUANG Xueliang. Numerical computation

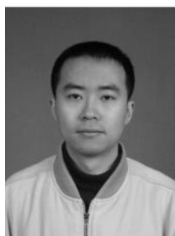
method of electric machine performance and its application [M]. Nanjing, China: Southeast University Press, 2003.

[22] 白延年. 水轮发电机设计与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

BAI Yan nian. Design and computation of hydro generator [M]. Beijing, China: China Machine Press, 1982.

[23] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

WEI Yong tian, MENG Da wei, WEN Jia bin. The heat exchange in electric machine [M]. Beijing, China: China Machine Press, 1998.



范镇南(通信作者)

1981—, 男, 博士生, 讲师

2007年获重庆大学工学硕士学位。目前正在重庆大学“输配电装备及系统安全与新技术”国家重点实验室攻读博士学位, 主要从事电机与电力设备电磁场与温度场分析计算方面的研究, 作为负责人承担中央高校科基本科研业务费资助项目1项, 作为主研人员参与重庆市自然科学基金课题1项、输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室项目1项、横向研究项目2项

FAN Zhen nan

Ph. D. candidate

收稿日期 2010 09 29 修回日期 2010 12 29 编辑 任明

E-mail: fanzhennan@126.com



HAN Li

Ph. D., Professor

韩力

1963—, 男, 博士, 教授

现任重庆大学电气工程学院副院长、四川省电工技术学会常务理事兼电机专委会副主任委员、重庆市学术技术带头人后备人选。研究方向为电机与变压器的分析和优化设计、永磁电机及其控制、风力发电技术、电机物理场的分析与计算。获重庆市科技进步二等奖1项, 主研国家自然科学基金项目1项, 主持重庆市自然科学基金项目1项、重庆市应用基础研究项目1项、输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室项目2项、横向科研项目10余项



ZHOU Guang hou

Senior engineer

周光厚

1970—, 男, 硕士, 高工

主要研究方向为电机电磁场与温度场, 大电机的设计与试验

收稿日期 2010 09 29 修回日期 2010 12 29 编辑 任明