

灯泡贯流式水轮发电机通风冷却的计算研究*

郑发平¹, 宋文武², 李建秀²

(1. 西昌学院 工程技术系, 四川 西昌 615013; 2. 西华大学 能源与环境学院, 四川 成都 610039)

【摘要】本文采用多学科理论和数值计算相结合的方法,从损耗的角度对灯泡贯流式水轮发电机内部流体场和温度场的耦合关系进行研究,建立了灯泡贯流式水轮发电机三维流体场和温度场的数学模型,采用有限元法计算灯泡贯流式水轮发电机的流体场、温度场,以及二者的耦合关系,为灯泡贯流式水轮发电机的通风冷却系统的设计以及结构优化设计提供了理论依据。

【关键词】灯泡贯流式水轮发电机;通风;冷却

【中图分类号】TM312 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1673-1891(2009)01-0041-03

灯泡贯流式水轮发电机的结构非常复杂,其电机布置在灯泡体内,其设计必然要受到水力设计及结构设计的限制(灯泡体不能过大)^[1]。与常规立式水轮发电机相比,径向尺寸较小、轴向尺寸较大、通风冷却困难,再加上转子旋转的作用,使得气体在定转子之间,或在定子和转子内的流动形态变得非常复杂。为了得出贯流式水轮发电机的温度分布规律,进而准确的进行贯流式水轮发电机的通风冷却系统的设计,需要将定子绕组股线绝缘和转子励磁绕组匝间绝缘进行等效处理。

本文采用多学科理论和数值计算相结合的方法,从损耗的角度对贯流式水轮发电机流体场和温度场的耦合关系进行研究,建立了灯泡贯流式水轮发电机三维流体场和温度场的数学模型,采用有限元法计算灯泡贯流式水轮发电机的流体场、温度场,以及二者的耦合关系,为灯泡贯流式水轮发电机的通风冷却系统的设计以及结构优化设计提供了理论依据。

1 内部流体场和温度场计算的基本理论

灯泡贯流式水轮发电机大多采用传统的空气冷却方式,一般均采用密闭通风,利用发电机转子强迫空气流动,冷空气通过转子线圈,经过定子中的通风沟,吸收发电机线圈和铁心等处的热量成为热空气。灯泡贯流式水轮发电机的损耗包括铁心损耗、绕组损耗、励磁损耗、机械损耗等,由于水轮发电机转速差别比较大,其损耗分布也是较大的,在空冷水轮电机中,铁耗和机械损耗占较大比例,铜耗相对较小;对于水冷发电机而言,铜耗占主要地位,短路损耗占总损耗的50%~60%。

1.1 计算流体力学控制方程

水轮发电机内部空气流场的基本控制方程

质量守恒方程

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为水的密度;

t 为时间;

u, v, w 分别为速度矢量在 x, y 和 z 方向的分量。

动量守恒方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{aligned} \quad (4)$$

式中: S_u, S_v, S_w 为动量守恒方程的广义源项, $S_u = F_x + S_x, S_v = F_y + S_y, S_w = F_z + S_z$ 。其中 F_x, F_y, F_z 是微元体上的体积力,若体积力只有重力,且 z 轴竖向向上,则 $F_x=0, F_y=0, F_z=-\rho g$,其中 S_x, S_y, S_z 的表达式为:

$$s_x = \mu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} [\lambda \operatorname{div} U] \quad (5)$$

$$s_y = \mu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} [\lambda \operatorname{div} U] \quad (6)$$

$$s_z = \mu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \operatorname{div} U) \quad (7)$$

式中: u 为速度矢量。

相对于粘性为常数的不可压流体, S_x, S_y, S_z 是少量(认为均为0),则以温度 T 为变量的能量守恒方程^[2,3]:

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\lambda}{c_p} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + S_T \end{aligned} \quad (8)$$

收稿日期:2009-01-30

*基金项目:四川省教育厅重点项目基金资助(项目编号:2006A089)。

作者简介:郑发平(1965-),男,汉族,四川西昌人,讲师,主要从事水利水电工程方向的教学和研究。

式中: C_p 为流体比热容;

T 为温度;

λ_i 为流体的导热系数;

S_r 为流体的内部热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分, 也称为粘性耗散项。

而三维非稳态导热控制方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi \quad (9)$$

1.2 流体计算的边界条件

边界条件是指在求解域的边界上所求解的变量或其一阶导数随地点及时间变化的规律。包括: 流动进口边界、流动出口边界、给定压力边界、壁面边界、对称边界以及周期性边界等。求解过程见图 1。

2 转子流体场计算及分析

灯泡贯流式水轮发电机的通风方式一般有轴向通风方式, 轴、径向通风方式及径向通风方式。

本文以红岩子水电站一灯泡贯流式水轮发电机为例, 进行了转子流体场及定子温度场与流体场耦合的计算和分析。主要参数有: 水轮发电机型号 SFWG600064/4970; 额定容量 6000KW; 额定转速 93.8r/min; 额定功率: $P_n=6000KW$; 额定电压: $U_N=6300V$; 功率因素: $\cos \phi_N=0.9$; 总风量 $Q_0=43.6m^3/s$; 磁极数为 64; 定子槽数 288; 定子铁心损耗 40.7KW; 定子绕组铜耗 44.5KW。

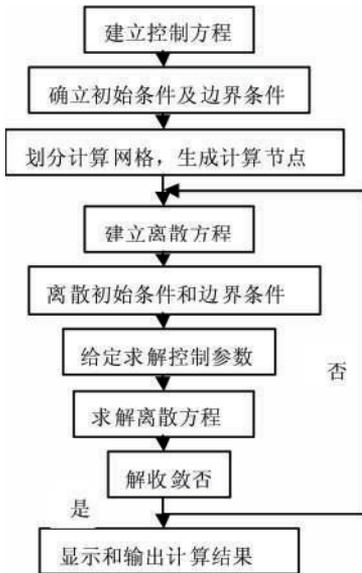


图1 CFD 工作流程图

通风系统采用转子供风、密闭自循环、双路径轴向通风方式; 空气冷却器沿发电机定子机座外壁圆周均匀分布, 冷却空气从冷却器出来流过发电机的上、下风道, 在转子综合压力作用下, 冷却空气分为两路: 第一路冷却空气穿过转子支架入口沿磁轭径向通风沟经磁极极间流道径向进入气隙。另一路

冷却空气沿转子端部一部分沿轴向进入磁极极间流道流入气隙, 与第一路冷却空气汇合后一起被转子综合压力压于定子铁心径向通风沟, 冷却定子铁心及定子绕组后进入定子铁心背部风室; 冷却空气通过定子铁心背部风室汇集到空气冷却器, 与空气冷却器进行热交换散去热量后, 流入机壁外风室, 由此构成了密闭自循环双路径轴向通风冷却系统。

根据贯流式水轮发电机的通风结构可知, 冷却空气一部分通过转子磁轭径向通风沟进入气隙, 一部分通过转子端部进入气隙, 然而最终通过定子径向通风沟进入冷却器。在此通过建立三维模型的方式对流场进行分析, 此处只考虑第一部分的冷却气体进入定子径向通风沟的情况。包括定子径向通风沟的转子流场截面计算区域。采用混合六面体的非结构化网格^[4-6], 共离散单元有 163548 个, 计算节点有 44356 个。定子通风沟内流体速度见图 2。

通过计算得到的流速分布表明: 转子逆时针旋转时, 最大流速出现在转子磁极的迎风面, 而背风面附近的流速较小, 转子磁极的迎风面作为转子流场的动力源, 通过其旋转给冷却空气的流动提供动力; 通过转子旋转为进入流场的流体提供动力, 而流场中的动压则表示了转子磁极表面通过压力的方式给流体传递动能的状况; 转子磁极的迎风面是对流场作用的主要工作面, 同时可以看出在磁极迎风面附近的动压沿径向逐渐减弱, 接近气隙处基本与气隙内动压一致。

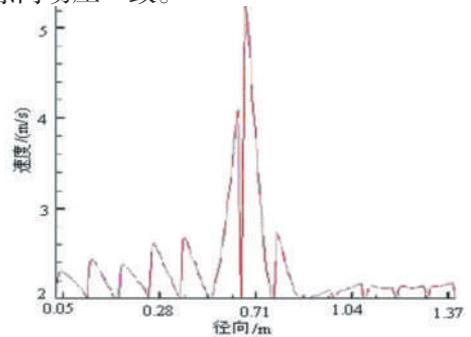


图2 定子通风沟内流体速度分布图

3 结论

从整个区域上看, 旋转部分的动压远大于定子径向通风沟内的动压, 这主要是由于在定子部分沿径向的通风槽钢和线棒垂直于转子旋转的速度方向, 阻止旋转动压向通风沟内深入。转子以高速旋转, 在磁极间和气隙中的冷却空气以较高的速度随转子一同运动, 而该速度主要为周向速度。由于定子线棒和通风槽钢特殊结构的原因, 高速旋转的转子对定子径向通风沟内的流场影响较小, 只有少量的冷却空气通过径向通风沟在气隙中的入口进入

径向通风沟。在转子磁轭径向通风沟所正对的定子径向通风沟内流速较大,这是由于转子旋转离心力的作用将磁极间隙中的冷却气体压入到所对的

径向通风沟。通过定子径向通风沟各出口的速度分布情况可以看出,经气隙进入不同位置径向通风沟内的冷却空气量。

注释及参考文献:

- [1]T.Nakata, N.Takahashi, K.Fujiwara, A.Ahagon. Periodic condition for 3-D magnetic field analysis and its applications to electrical machine. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(6):2694-2696.
- [2]A.N.鲍里先科. 电机中的空气动力学与传热学[M].北京:机械工业出版社,1985:238-473.
- [3]A.F.Armor, M.V.K.Chari.用三维有限元法计算大型汽轮发电机定子铁芯的热流[J].国外发电机,1980,(6):27-31.
- [4]向隆万,唐永建.汽轮发电机氢内冷转子三维温度场研究[J].中国电机工程学报,1991,11(2):47-53.
- [5]曹国宣.水内冷汽轮发电机转子温度场计算[J].电工技术学报,1993:(1):18-21.
- [6]温嘉斌,鲁长滨.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(6):1-5.

Research on Calculation Ventilation Cooling of Generator of Bulb-stator Turbine

ZHENG Fa-ping¹, SONG Wen-wu², LI Jian-xiu²

(1. Engineering Department of Xichang College, Xichang, Sichuan 615013;

2. School of Power and Environment, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039)

Abstract: In this paper, the research on relationship between internal fluid and temperature fields is given to generator of bulb-stator turbine which is adopted a multidisciplinary theory and numerical combination of methods, from the perspective of loss, as well as a three-dimensional fluid and temperature fields of mathematical models. By finite element method, the field of fluid, temperature, and the coupling relationship are calculated, which provides a theoretical basis for generator of bulb-stator turbine on the ventilation cooling system design and structural optimization and design.

Key words: Generator of bulb-stator turbine; Ventilation; Cooling