

基于 Easy5 的燃气轮机发电系统建模与仿真

梅姣姣, 陈金伟, 张会生, 苏 明

(上海交通大学 燃气轮机研究院, 上海 200240)

摘 要: 采用模块化建模思想, 在传统的燃气轮机非线性数学模型基础上, 建立了三阶同步发电机的模型。基于所建的数学模型, 在 Easy5 仿真平台上搭建了单轴燃气轮机发电系统的完整模型, 仿真了变负荷时整个燃气轮机发电系统的动态过程, 仿真结果与实际情况相符, 模型具有较高的通用性。

关 键 词: 模块化建模; 燃气轮机; 发电机; Easy5 仿真平台

中图分类号: TK474.7 **文献标识码:** A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.011

引 言

同步发电机是机电能量转换的核心, 是燃气轮机发电系统中不可或缺的组成部分, 它集旋转与静止、电磁变化与机械运动于一体, 把机械能转换为电能, 供给电力系统^[1], 它与原动机及功率转速控制系统一起, 为电力系统提供主要的电能来源, 其动态运行是整个系统分析的基础和核心。因此, 建立精确描述同步发电机运行的仿真模型对系统的仿真精度和动态性能分析有着重要意义。目前对于电力系统的仿真普遍采用发电机的降阶简化模型, 常常忽略了定子暂态和转速变化, 这虽然方便了系统的稳态分析, 但进行变负荷仿真时会引起一定的误差。本研究基于 Easy5 仿真平台在传统的燃气轮机模型基础上建立了同步发电机的三阶模型, 并且考虑功率转速控制策略, 以模块化思想建立了燃气轮机发电系统的整体模型。

1 燃气轮机发电系统结构

燃气轮机发电系统结构如图 1 所示, 由压气机、燃烧室、透平、同步发电机组成。

当电网侧 AGC 指令与发电机的电磁功率不等时, 先将功率偏差信号送至 PI 控制器输入端, 通过 PI 控制器调节燃烧室入口的燃料量, 与经压气机压

缩后的空气混合在燃烧室内燃烧, 燃烧后的高温高压的燃气送至透平内膨胀做功, 再经由发电机将机械能转换成电能。最后, 当发电机实际输出功率与 AGC 指令相同时, 调节过程结束。

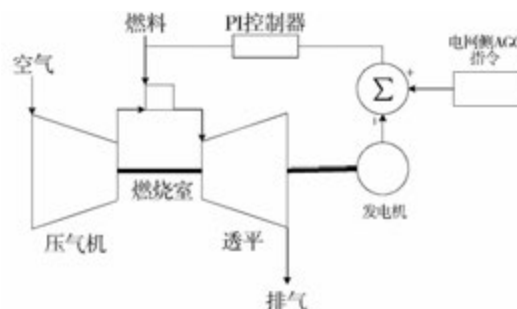


图 1 燃气轮机发电系统结构

Fig. 1 Structure of the gas turbine power generation system

2 燃气轮机发电系统整体建模

2.1 燃气轮机模型

燃气轮机是一个高度非线性的热力系统^[2], 按照燃气轮机模块化建模的思想^[3-4], 将燃气轮机划分为压气机、燃烧室、透平以及转子 4 个模块。

2.1.1 压气机模块

压气机的特性可由压比 π_c 、折合转速 $n/\sqrt{T_1}$ 、折合流量 $G_c \sqrt{T_1}/p_1$ 以及绝热压缩效率 η_c 这 4 个参数关系来描述^[3]。

只要确定了任意 2 个参数, 其它 2 个参数便可以确定。通常转速为状态量, 压气机的出口和燃烧室相连接, 其进出口压力也为状态量, 从而可通过插值的算法获得不同转速和不同压比下压气机的折合质量流量和绝热效率。

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-11-24

作者简介: 梅姣姣 (1991-), 女, 江苏盐城人, 上海交通大学硕士研究生。

2.1.2 燃烧室模块

燃烧室模块结合了容积惯性的方法^[4-5],该方法考虑了管路和连接处的容积,避免了由于质量流量不平衡引起的迭代计算,当燃烧室的进出口流量不平衡后会引引起容积内的流体压力变化,从而将压气机模块和透平模块之间质量流量不平衡的问题转化为燃烧室的压力变化,避免了迭代计算,简化了计算过程和仿真的复杂度。

压缩空气和燃料在燃烧室中混合燃烧生成混合燃气,燃烧室进出口温差较大,考虑燃烧效率 η_b 、总压恢复系数 σ_b 和向外界的放热量 Q ^[6-7],根据质量守恒和能量守恒得:

$$\frac{dH_{out}}{dt} = \frac{k(G_f H_f \eta_b + G_{in} H_{in} - G_{out} H_{out} - Q)}{\rho V} - \frac{k(H_{out} - p_{out}(1 - \sigma_b)/\rho) \times (G_f + G_{in} - G_{out})}{\rho V} \quad (1)$$

$$\frac{dp_{out}}{dt} = \rho \frac{k-1}{k} \cdot \frac{dH_{out}}{dt} + \frac{RT_{out}(G_f + G_{in} - G_{out})}{V(1 - \sigma_b)} \quad (2)$$

式中: k —绝热指数; ρ —燃气密度, kg/m^3 ; p —压力, Pa; H —焓, kJ/kg ; R —通用气体常数; V —燃烧室容积, m^3 ; T —温度, K; 下标 in 表示入口参数; 下标 out 表示出口参数; 下标 f 表示燃料。

2.1.3 透平模块

透平是燃气轮机系统中工质膨胀做功的部件,透平特性的获取方法与压气机类似,关于透平的热力参数也可用与压气机模块类似的方法求得^[8]。

2.1.4 转子模块

转子模块的输入参数为透平的输出功率、压气机消耗的功率以及发电机的电磁功率;其输出参数为转子的转速。转子是燃机系统中的主要惯性部件,是将压气机、透平和发电机联系起来的部件,其中透平发出功,压气机和发电机消耗功,当发出功和消耗功相等时,整个系统便处于某个稳定工况,而当发出功和消耗功不平衡时,作用于转子上的不平衡力矩使得转子加速或者减速,根据动量矩定理有:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{900(P_t \eta_{mt} - P_c / \eta_{mc} - P_e)}{I \pi^2 n} \quad (3)$$

式中: I —转轴的转动惯量; P_t —透平输出功率, kW; P_c —压气机耗功, kW; P_e —发电机电磁功率, kW;

η_{mt} —透平机械效率; η_{mc} —压气机的机械效率。

2.2 同步发电机模型

为简化计算,通常将实际的三相同步发电机作为“理想电机”处理。由于定子和转子间的相对运动,基于空间静止不动的三相坐标系建立的原始方程中会出现变系数,这对方程组的求解造成很大的困难。对原始方程做派克变换,将原方程从 abc 三相静止不动坐标系变为转子相对静止的 dq 坐标系^[9-10],得到发电机的数学模型。

2.2.1 转子运动方程

根据同步发电机转轴的转动方程,得到同步发电机的功角方程:

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1) \omega_s \quad (4)$$

式中: δ —功角,表示转子 q 轴领先同步旋转坐标系实轴 x 的角度; ω —转子电角速度, $\omega = 2\pi n$; ω_s —同步角速度。

将式(3)和式(4)统称为转子的运动模型,当有不平衡功率出现,转子的转速 n 发生变化,发电机电角速度 ω 相应的发生变化,最终造成同步发电机的功角 δ 发生变化,致使同步发电机的其它电参数发生变化。

2.2.2 电磁暂态方程

在转子方面有一个励磁绕组 f 和用来代替阻尼绕组的等值绕组 D、Q,这 3 个转子绕组随转子一起旋转。当忽略 D、Q 绕组暂态,只计及励磁绕组 f 的电磁暂态,励磁绕组 f 的电压方程为:

$$\frac{d\psi_f}{dt} = u_f - r_f i_f \quad (5)$$

式中: i_f —励磁绕组电流; r_f —励磁绕组电阻; u_f —励磁绕组端电压; ψ_f —励磁绕组的磁链。

式(5)描述的是励磁绕组端电压由两部分组成,一是励磁绕组磁链变化引起的电压,二是励磁绕组电阻对应的电压。

引入 q 轴瞬变电动势 E'_q 、定子励磁电动势 E_f :

$$\begin{cases} E'_q = \frac{X_{ad}}{X_f} \psi_f \\ E_f = \frac{X_{ad}}{r_f} u_f \end{cases} \quad (6)$$

式中: X_{ad} —d 轴电枢反应电抗; X_f —励磁绕组的自感电抗。

将式(5)两端同时乘以 X_{ad}/X_f ,再由 E'_q 和 E_f 的

定义,得到式(7):

$$\frac{d}{dt}E'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [E_f - (E'_q + (X_d - X'_d) i_d)] \quad (7)$$

式中: T'_{d0} —瞬态开路时间常数。

式(3)、式(4)、式(7)构成了同步发电机的三阶模型,方程中的所有参数均是标么值。

对于同步发电机模型,其输入为燃气轮机的机械转矩,输出为发电机电磁功率 P_e , 其计算表达式为:

$$P_e = T_e \omega = (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \omega \\ = [E'_q i_q - (X'_d - X_q) i_d i_q] \omega \quad (8)$$

式中: ψ_d —d 轴绕组的磁链; ψ_q —q 轴绕组的磁链。

求解上述发电机的模型,就必须有 i_d 、 i_q 的表达式,由此需要建立定子电压方程:

$$\begin{cases} X_q i_q - r_a i_d = u_d = \sin \delta \\ E'_q - X'_d i_d - r_a i_q = u_q = \cos \delta \end{cases} \quad (9)$$

式中: X_q —q 轴电抗; X'_d —d 轴瞬态电抗; r_a —定子电阻; E'_q —q 轴瞬态电动势; u_d —d 轴电压; u_q —q 轴电压; i_d —d 轴电流; i_q —q 轴电流。

从同步发电机的数学模型可以看出,由于功率的不平衡,致使同步发电机的功角 δ 发生变化,发电机的定子电压电流 u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 相应的发生了变化,导致 q 轴瞬态电动势 E'_q 发生变化,最终致使发电机发出的电磁功率发生变化,并一直到一个新的平衡点。

2.3 仿真模型的建立

在上述燃气轮机模块化模型和发电机模型的基础上,将各模块连接起来,得到燃气轮机发电系统,其模块化结构简图和模块间的关系如图 2 所示。

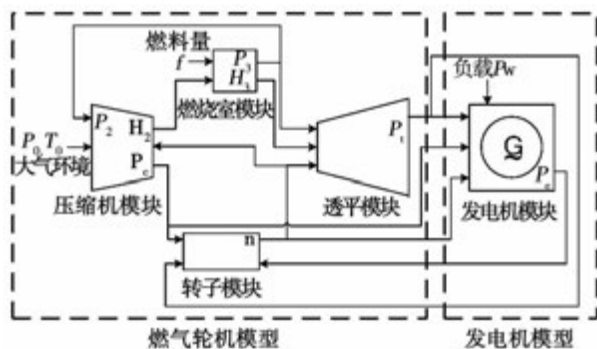


图2 燃气轮机发电系统模块化结构简图

Fig. 2 Modularized structure of the gas turbine power generation system

依据燃气轮机发电系统各模块之间的关系,利用 Easy5 仿真平台,将上述建立的发电机数学模型用 FORTRAN 语言编写了发电机模块,建立了燃气轮机发电系统的仿真模型,如图 3 所示。

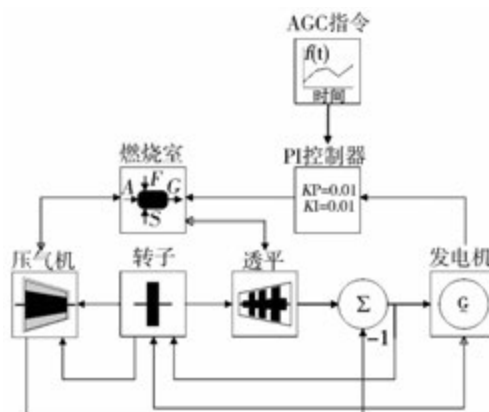


图3 燃气轮机发电系统模型

Fig. 3 Model of the gas turbine power generation system

3 仿真分析

3.1 仿真条件

以某重型燃气轮机机组为例,其主要技术参数的额定值如表 1 所示。

表1 某重型燃机额定参数

Tab. 1 Rated parameters of a gas turbine

主要技术参数	额定值
燃机输出功率/MW	260
热效率/%	38.5
压比	17
透平进气温度/K	1 583
透平排气温度/K	923
转速/ $r \cdot \min^{-1}$	3 000

燃机起始阶段在部分工况下稳定运行,在 50 s 时外界负荷指令发生改变,从 200 MW 阶跃变化到 250 MW,研究燃气轮机发电系统的动态过程。

3.2 仿真结果分析

图 4 给出 AGC 指令、燃机输出功率、发电机电磁功率的瞬态响应。从图中可以看出,当 AGC 指令阶跃增大时,燃机输出功率逐渐增大至指定负荷,随

后发电机电磁功率也逐渐增大,直至 250 MW 为止。

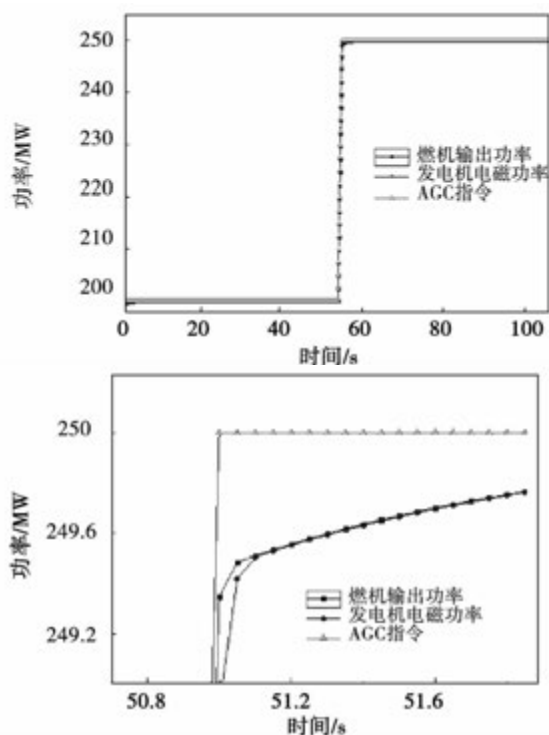


图4 AGC指令、燃机输出功率、发电机电磁功率的动态响应

Fig. 4 Dynamic response among AGC instruction, output power of the gas turbine and electromagnetic power of the generator

当负荷需求发生变化时,PI 控制器根据 AGC 负荷指令与发电机的实际发电量的偏差进行调节,调节燃料量进而改变燃机输出功率和发电机电磁功率。图 5 和图 6 给出了燃料量和燃机转速的动态响应。由图可知,当负荷指令阶跃增大时,产生的负荷偏差通过控制器作用在燃料阀上,然后燃料阀开始动作增加燃料量,从而增加了燃机的输出功率。发电机的输出功率变化滞后于燃机的输出功率变化,因此,当燃机的输出功率变化时,发电机的输出功率还未来得及改变,造成的功率不平衡致使转子加速,转速会偏离额定转速一点,但最终稳定在 3 000 r/min,这与实际情况相符。

图 7-图 10 给出了发电机功角、q 轴瞬变电动势、d、q 轴电流的动态响应。转子加速引起发电机功角增大,励磁绕组 f 的磁链减小,从而发电机 q 轴瞬变电动势随之减小。

由图可知,发电机 d、q 轴电流均增大,但由于 q

轴电流 i_q 增幅比 d 轴电流 i_d 大,所以发电机的电磁功率相应地增大,最后燃机输出的机械功率与发电机的输出功率平衡在新的运行点。

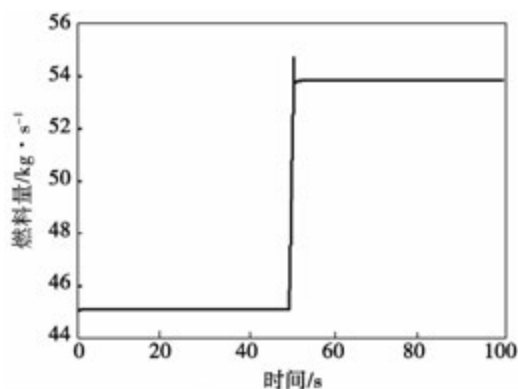


图5 燃料量的动态响应

Fig. 5 Dynamic response of fuel quantity

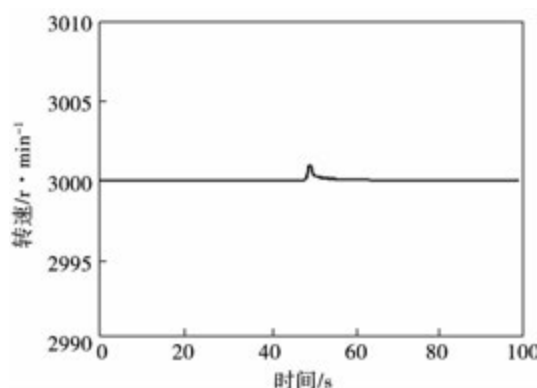


图6 燃气轮机转速的动态响应

Fig. 6 Dynamic response of gas turbine speed

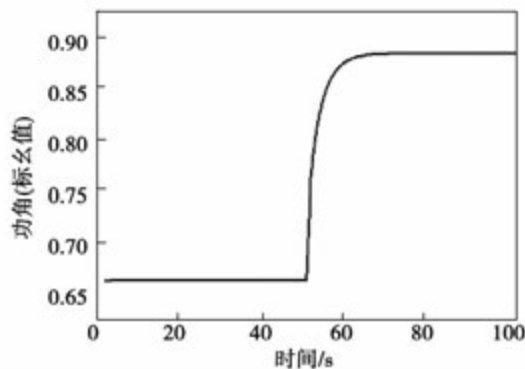


图7 发电机功角的动态响应

Fig. 7 Dynamic response of generator power angle

比较发现,发电机各参数的变化趋势与文献[11]所建立的同步发电机模型的计算结果一致,说

明建立的燃气轮机发电系统模型是准确的。

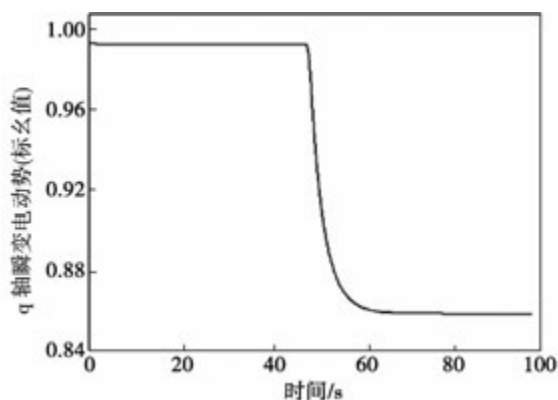


图8 发电机q轴瞬变电动势的动态响应

Fig. 8 Dynamic response of generator's q axis transient electromotive force

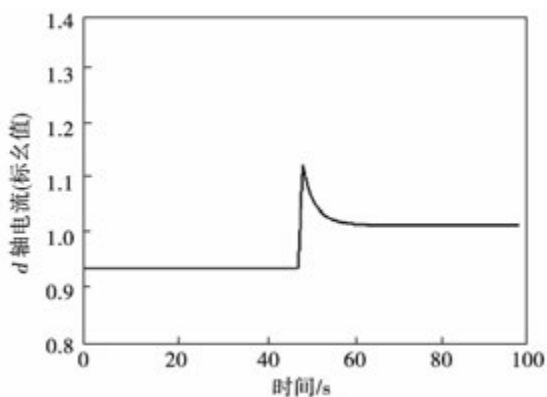


图9 发电机d轴电流的动态响应

Fig. 9 Dynamic response of generator's d axis current

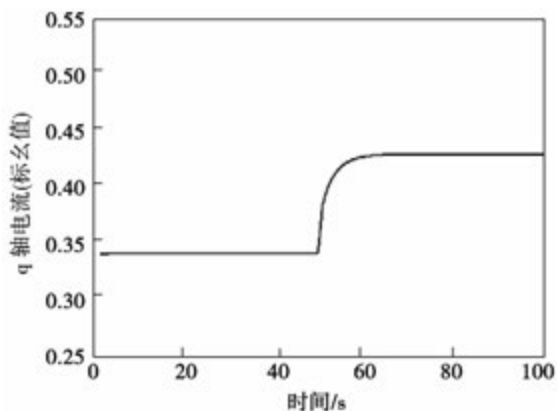


图10 发电机q轴电流的动态响应

Fig. 10 Dynamic response of generator's q axis current

4 结 论

(1) 在传统燃气轮机模型的基础上,建立了作为负载的同步发电机模型,构建了燃气轮机发电系统的仿真模型,该模型不仅可反映燃气轮机自身的动态特性,而且将燃气轮机与发电机之间的动态作用过程进行了描述。

(2) 利用所建立的发电机模型,可以有效地实现燃气轮机并网运行过程中的控制性能仿真,简化了转速负荷控制回路。

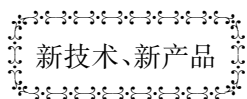
(3) 所建立的同步发电机模型,同样适用于其它发电系统中对发电机模块的建模,如风力发电,火力发电等,具有很好的普适性。

参考文献:

- [1] 陈成功. 船电系统中同步发电机的建模与仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
CHEN Cheng-gong. Research on modeling and simulation of synchronous generator for shipboard power system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [2] 苏明, 陈德来, 张园蔚, 等. 一种燃气轮机模块化非线性仿真模型[J]. 热能动力工程, 1998, 13(6): 435-437.
SU Ming, CHEN De-lai, ZHANG Yuan-wei, et al. A modularized non-linear simulation model for gas turbines [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1998, 13(6): 435-437.
- [3] 高健强, 裴闪, 吴迎光. 单轴燃气轮机模块化仿真模型及其运行特性研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(5): 52-55.
GAO Jian-qiang, Pei Shan, Wu Ying-guang. Modular simulation model and operation behaviors of single-shaft gas turbine [J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(5): 52-55.
- [4] 苏明, 翁史烈. 大型汽轮机的模块化仿真建模[J]. 系统仿真学报, 1998(3): 30-34.
SU Ming, WENG Shi-lie. Modularized simulation modeling for a large steam turbine [J]. Journal of System Simulation, 1998(3): 30-34.
- [5] Camporeale S M, Fortunato B, Mastrovito M. A modular code for real time dynamic simulation of gas turbines in Simulink [J]. ASME, 2006, 128(3): 506-517.
- [6] 刘冰, 彭淑宏. 某重型燃气轮机动态建模及性能仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(9): 335-338.
LIU Bing, PENG Shu-hong. Dynamic modeling and simulation on heavy duty gas turbine [J]. Computer Simulation, 2012, 29(9): 335-338.
- [7] 崔凝, 王兵树, 邓勇, 等. 重型燃机热力系统动态仿真模型

- [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 110 - 117.
- CUI Ning, WANG Bing-shu, DENG Yong, et al. Dynamic simulation model for the heavy duty gas turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 110 - 117.
- [8] 付云鹏, 黄宜坤, 张会生, 等. 一种考虑变几何特性的重型燃气轮机建模方法 [J]. 动力工程学报, 2014, 34(3): 200 - 204.
- FU Yun-peng, HUANG Yi-kun, ZHANG Hui-sheng, et al. A modeling method for heavy gas turbines considering variable-geometry characteristics [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(3): 200 - 204.
- [9] 许国瑞, 王红宇, 刘晓芳, 等. 同步发电机不同实用模型的大扰动特性的对比研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 67 - 73.
- XU Guo-rui, WANG Hong-yu, LIU Xiao-fang, et al. Comparing research on large disturbance characteristics of the different generator practical models [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 67 - 73.
- [10] 吕崇德, 任挺进, 姜学智, 等. 大型火电机组系统仿真与建模 [M]. 北京, 清华大学出版社, 2002.
- LV Zong-de, REN Ting-jin, JIANG Xue-zhi, et al. Simulation and modeling for large thermal power generating unit system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [11] 孙才勤, 王贝贝, 张灵杰, 等. 船舶电力系统中同步发电机数学建模与仿真 [J]. 大连海事大学学报, 2013, 39(1): 99 - 102.
- SUN Cai-qin, WANG Bei-bei, ZHANG Ling-jie, et al. Modeling and simulation for synchronous generator in marine power station system [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013, 39(1): 99 - 102.

(丛 敏 编辑)



关于 250 - 800 MW 功率的超临界汽轮机组 的围带上方蜂窝状密封技术的实践经验

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.012

据杂志《Электрические станции》2013 年 10 月刊报道, 超临界压力工作中的 250 - 800 MW 功率的汽轮机组通流部分应用了围带上方和端部密封结构。

与传统形式的汽轮机密封结构相比蜂窝状密封更能确保提高高压缸的相对内效率。在 800 MW 功率的条件下, 汽轮机组内该效率最大增加量为 1.28%, 功率约增加 3.8 MW。且在 250 - 800 MW 功率的条件下, 蜂窝状密封也不会引起高压转子的低频振动。

实践表明, 为了保证蜂窝状密封如同任何具有小间隙的密封那样, 在不同的工况和负荷变化的情况下, 在汽轮机结构中都应该保证汽缸和转子的同心度。

借助于相应的运行措施, 也应该保证供入汽轮机的蒸汽高纯度以及在蒸汽中没有由于腐蚀或氧化而产生的微粒。

根据蜂窝状密封的应用经验, 合理地在调节级上进行了试验, 也进行了用于以超临界压力工作的汽轮机高压缸端部密封和中间密封的试验, 并计划研制更大单机功率的蜂窝状密封, 其中包括以高超临界蒸汽参数 ($t = 600 - 620\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P \leq 29\text{ MPa}$), 汽轮机组的通流部分应用这些蜂窝状密封。

(吉桂明 摘译)

cooling effect of turbine blade mid-chord. Cooling heat-transfer and flow resistance characteristics are obtained under various cooling flow rate in combined cooling structure of different spacing between impingement holes and film holes l/d_1 , the length of impingement hole h/d_1 . Meanwhile, the correlation is set up on cooling effect and structural feature parameter. The results show that in the structure of $l/d_1 = 12$, the cooling effectiveness outside surface of the film cooling holes both upstream and downstream is higher; and in the structure of $h/d_1 = 1$, the heat transfer coefficient on target surface increases. The cooling effectiveness outside surface of film cooling holes downstream is not affected by l and h . **Key words:** combined impingement-film cooling, cooling effectiveness, correlation

基于 Easy5 的燃气轮机发电系统建模与仿真 = **Modeling and Simulation of the Gas Turbine Power Generation System Based on Easy5** [刊, 汉] MEI Jiao-jiao, CHEN Jin-wei, ZHANG Hui-sheng, SU Ming (Gas Turbine Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4) . - 541 - 546

With the modular modeling theory, a third-order synchronous generator module was established on a basis of the traditional nonlinear mathematical model of gas turbines. Based on the mathematical model, a complete model of single shaft gas turbine power generation system was built on Easy5 simulation platform. The variable load process of the entire gas turbine power generation system was simulated dynamically, which reflected the dynamic process of the gas turbine and generator well. Results agree well with the actual circumstances and the model has high versatility. **Key words:** modular modeling, gas turbine, generator, Easy5 simulation platform

低叶尖马赫数开式叶轮气动声源数值研究 = **Numerical Study on Aerodynamic Sound Sources of Low Tip Mach Number Open Impeller** [刊, 汉] WAN Jian-feng (School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(4) . - 547 - 550

In order to find reasonable noise reduction measures, this paper, using Large Eddy Simulation and FW-H hybrid method, conducts a full-scale simulation on flow and aerodynamic noise of low tip Mach open impeller and researches the aerodynamic sound sources performance. The study on SPL distribution in space and frequency domain shows: noise sources of the open impeller include monopole sound source, dipole sound source from blades rotation, and quadruple sound source generated by blade trailing vortex. There is not basically vortex-blade interference