

超临界机组一次调频对汽轮机动态热力特性的影响

李福尚¹, 王旭荣², 戴义平², 张亚夫³

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250000; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032)

摘 要: 本研究建立了超临界机组及其控制系统的数学模型, 编制了机组变工况特性计算软件, 研究了一次调频对超临界机组汽轮机动态热力特性影响的规律。采用集总参数和分布参数相结合的方法建立了机组的动态数学模型, 对不同运行工况下机组的静态和动态特性进行了分析, 得到了机组不同运行工况下负荷扰动及调节系统参数对机组流量、调节级后压力和温度、再热器后温度影响的规律。结果表明, 随着负荷扰动的增大, 无论机组定压运行还是滑压运行, 各物理量动态过程中的百分比超调量不变, 机组高、中压各级温度的变化可以忽略。机组滑压运行时, 在维持锅炉出口温度不变的条件下, 随着流量压力环节时间常数和功率流量环节时间常数的增加, 高压调节级后的温度变化约 1.5 °C, 再热器后温度变化约 0.2 °C。因此, 一次调频对超临界机组不同运行工况下热力参数动态特性的影响非常小, 不会影响机组运行的安全性和稳定性。

关 键 词: 一次调频; 超临界机组; 定压运行; 滑压运行; 动态热力特性

中图分类号: TK262 文献标识码: A

引 言

一次调频是电网负载变化引起电网频率大幅度波动时, 并网运行机组根据其调节系统的调节特性自动调整机组负荷以恢复电网频率, 其中, 机组频率和负荷调整响应速度最快。然而在机组实际运行中, 机组的一次调频功能往往受到限制, 大多数采用数字电液调节系统控制的发电厂, 将一次调频死区设置得过大, 一次调频作用被切除或者调节幅度受到限制, 在突发性事故中导致频率大幅度波动甚至发生系统崩溃。对超临界机组动态特性的研究集中在锅炉汽水系统动态特性^[1-4]、汽轮机压力流量模

型的建立^[5]、机组控制策略研究^[6-7]等方面, 对机组在不同运行工况下热力参数动态特性变化规律^[8-10]研究的较少。为了分析一次调频对超临界机组动态热力特性的影响规律, 提高超临界机组参与电网一次调频的积极性, 本研究建立了超临界机组及其控制系统的数学模型, 开发研制了机组变工况特性计算软件, 确定了机组变工况运行时的热力特性, 通过仿真实验, 得到了机组不同负荷扰动及模型中各时间常数改变时的动态响应特性, 为机组温度场和应力场的计算提供了计算边界条件。

1 超临界机组动态数学模型的建立

现代大型超临界火电单元机组系统复杂, 其数学模型一般为分布参数, 在动态过程中系统参数不仅是时间的函数也是空间的函数, 求解其模型的偏微分方程组非常困难并且不能得到参数变化的一般规律。同时, 不同组成部件的动态过程响应速度相差很大且具有多变量、多回路和非线性的特点。为了简化系统的建模并得到参数变化的一般规律, 参考文献[1-5, 9]采用集总参数和分布参数相结合的方法建立机组的整体动态数学模型。

描述超临界机组动态特性的主要环节包括省煤器、水冷壁、过热器、再热器和汽轮机。将水冷壁单独处理; 一级、二级过热器环节由于其热物性较复杂将其细化, 分成低温过热器、大屏过热器、后屏过热器、高温过热器和主蒸汽管道环节; 将喷水减温器汽水容积和金属质量合并到相邻的环节中; 再热器环节分成 3 个环节: 冷再热器管(即高压缸排汽管)、再热器和再热蒸汽管(即中压缸进汽管); 汽机环节分成高压缸、中压缸和低压缸环节。简化后的系统

收稿日期: 2013 - 11 - 26

作者简介: 李福尚(1968 -), 男, 山东成武人, 国网山东省电力公司电力科学研究院教授。

物理模型如图 1 所示。

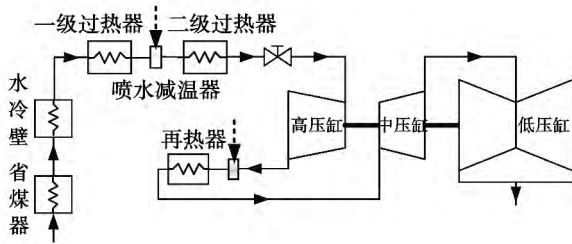


图 1 机组简化环节示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the simplified links of a unit

各简化环节的传递函数如图 2、图 3 所示。其中图 2 为定压运行时超临界机组数学模型, 锅炉侧模型简化为一个惯性环节; 图 3 为滑压运行时超临界机组数学模型, 锅炉侧模型简化为流量压力环节和功率流量环节。

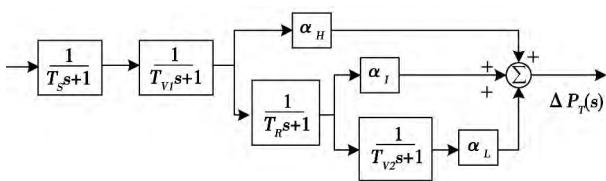


图 2 定压运行时 $G_{TS}(s)$ 的传递函数方框图

Fig. 2 Block diagram of the transfer function $G_{TS}(s)$ when the unit is operating at a constant pressure

其中, T_s 一油动机时间常数; T_R 一中间再热时间常数; T_{V1} 一高压容积时间常数; T_{V2} 一中、低压时间常数; α_H 、 α_I 、 α_L 一高压缸、中压缸、低压缸容量; ΔP_T 一汽轮机功率。

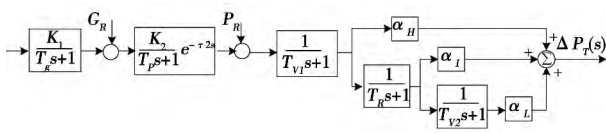


图 3 滑压运行时 $G_{TS,1}(s)$ 的传递函数方框图

Fig. 3 Block diagram of the transfer function $G_{TS,1}(s)$ when the unit is operating at a sliding pressure

其中, T_g 一流量的压力环节时间常数; T_p 一功率流量环节时间常数; G_R 一给水流量扰动; P_R 一给水压力扰动。

2 机组运行工况下的热力特性变化规律

2.1 各工况下的静态特性分析

某典型 600 MW 超临界火力发电机组主蒸汽参数为 24.2 MPa/566 °C, 再热蒸汽参数为 4.09 MPa/566 °C, 额定工况流量 1 660.745 t/h。机组的起滑流量为 1 460 t/h, 计算最小流量为 860 t/h。

从机组全工况运行的特性参数可见, 机组无论是定压运行还是滑压运行, 在保证再热器出口温度稳定的条件下, 机组中压缸各级的温度变化非常小, 因此只要再热蒸汽温度控制满足运行要求, 则负荷变化不会对中压缸各级的热力特性产生影响。

机组定压运行时, 高压缸调节级的温度变化规律为:

$$\Delta T = -115.07 N + 119.28 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

式中: N 一机组相对功率。当机组在 100% - 50% 负荷范围内变化时, 负荷每变化 10%, 高压调节级后的温度变化 11.5 °C, 而其它各级的温度变化均小于高压调节级的温度变化。

当机组滑压运行时, 高压缸调节级的温度变化规律为:

$$\Delta T = -17.46 N + 14.48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

当机组从启滑负荷(约 83% 负荷) - 50% 负荷范围内变化时, 负荷每变化 10%, 高压调节级后的温度变化 1.75 °C, 其它各级的温度变化均小于高压调节级的温度变化。因此, 只要主汽温度控制在要求范围内, 从启滑负荷一直到 50% 负荷范围, 机组高压缸各级的温度变化均非常小。

2.2 定压运行的动态特性分析

机组定压运行时, 控制系统的传递函数方框图如图 4 所示。

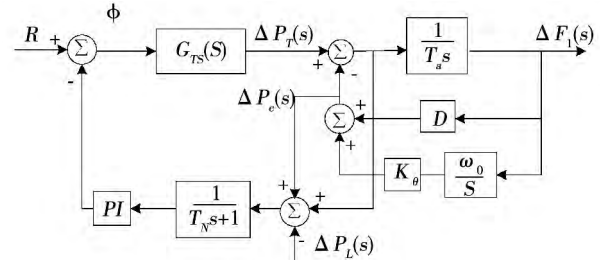


图 4 定压运行时机组控制系统的传递函数方框图

Fig. 4 Block diagram of the transfer function of the control system of the unit when the unit is operating at a constant pressure

其中: R —负荷给定; ΔP_e —发电机电磁功率; ΔP_L —负荷扰动; $\omega_0 = 2\pi$; K_0 —同步系数; D —发电机阻尼系数; T_a —转子时间常数。

2.2.1 不同负荷扰动的动态响应特性

当负荷扰动分别为 5%、10%、15% 时, 机组阀门开度、机组流量、调节级后温度和再热器后温度的变化规律如图 5 所示。

从各种工况时的动态响应特性可以看出, 随着扰动的增大, 各物理量的百分比超调量不变, 过渡过程约 30 s, 过程近似满足线性系统的特点。调节级后温度变化随着负荷扰动的增大而增大, 当负荷扰动为 15% 时, 温度变化约 20 °C; 而再热器后温度几乎不受负荷扰动的影响。

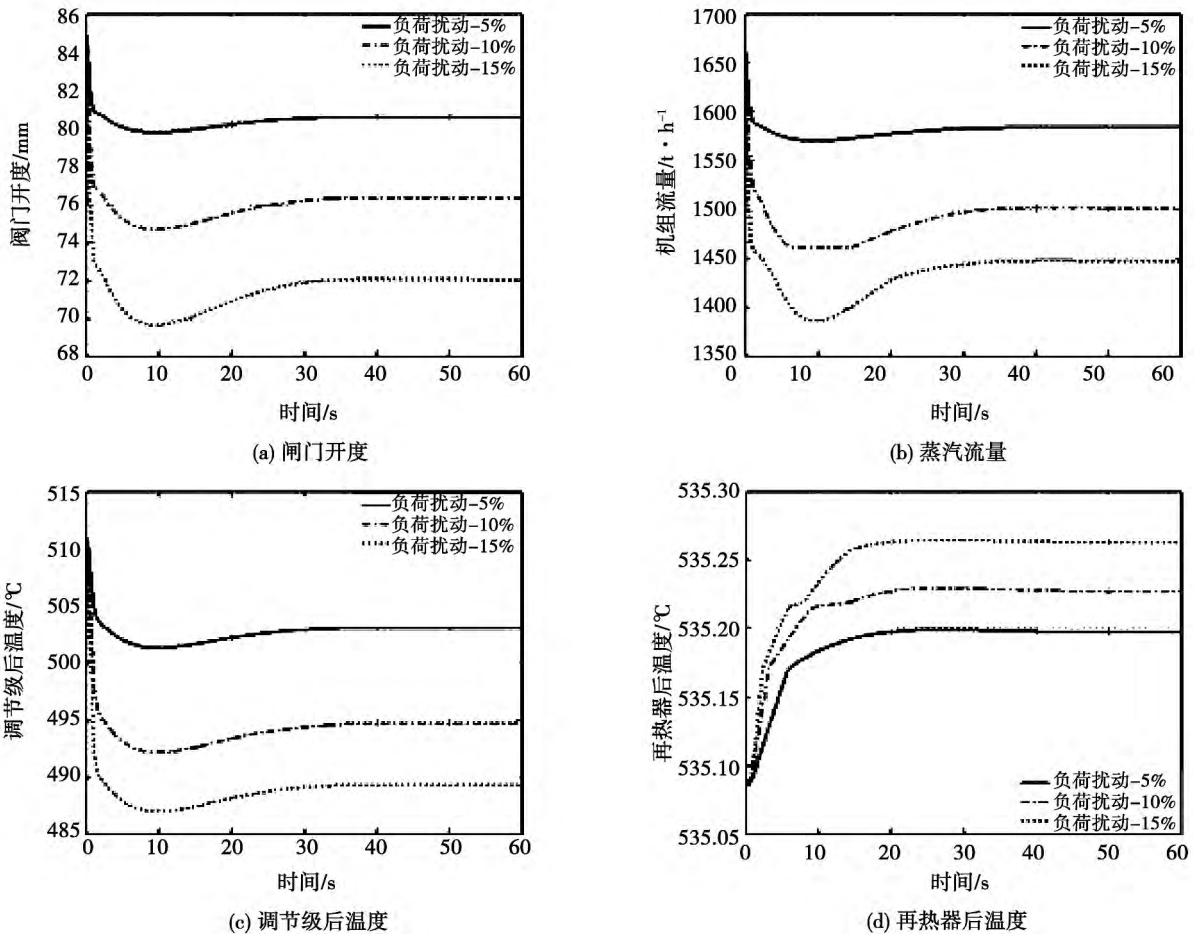


图 5 不同负荷扰动时的动态响应特性

Fig. 5 Dynamic response characteristics when disturbed at various loads

2.2.2 系统时间常数变化时的动态响应特性

当负荷扰动一定(10% 负荷扰动) 时, 考虑油动机、高压容积、转子、中间再热时间常数对系统动态特性的影响, 其中中间再热容积时间常数变化对系统动态特性的影响如图 6 所示。

从仿真实验结果可以看出, 所有参数中只有再热容积时间常数的变化对系统的动态特性有较明显影响, 其它参数变化对各物理量的影响可以不计。油动机和高压容积时间常数变化时, 负荷扰动对过

渡过程曲线没有影响, 可以不考虑。当中间再热容积时间常数增大达到 10 s 时, 过程曲线有一个平台, 实际上机组控制系统并没有出现限幅, 而是刚好碰到阀门重叠度比较小的地方, 阀门开度在变化, 而机组流量变化很小。转子时间常数的影响可以不考虑, 不同时间常数时的过程曲线基本不变化。

2.3 滑压运行的动态特性分析

机组滑压运行时, 调节阀的开度不变化, 靠主蒸汽压力的变化来满足机组负荷的变化, 而力求维持

主蒸汽温度不变。因此,将流量压力环节的数学模型近似为一阶惯性环节,机组功率与流量之间的数

学模型简化为延时惯性环节,考虑了电磁阻力影响的控制系统的传递函数方框图如图 7 所示。

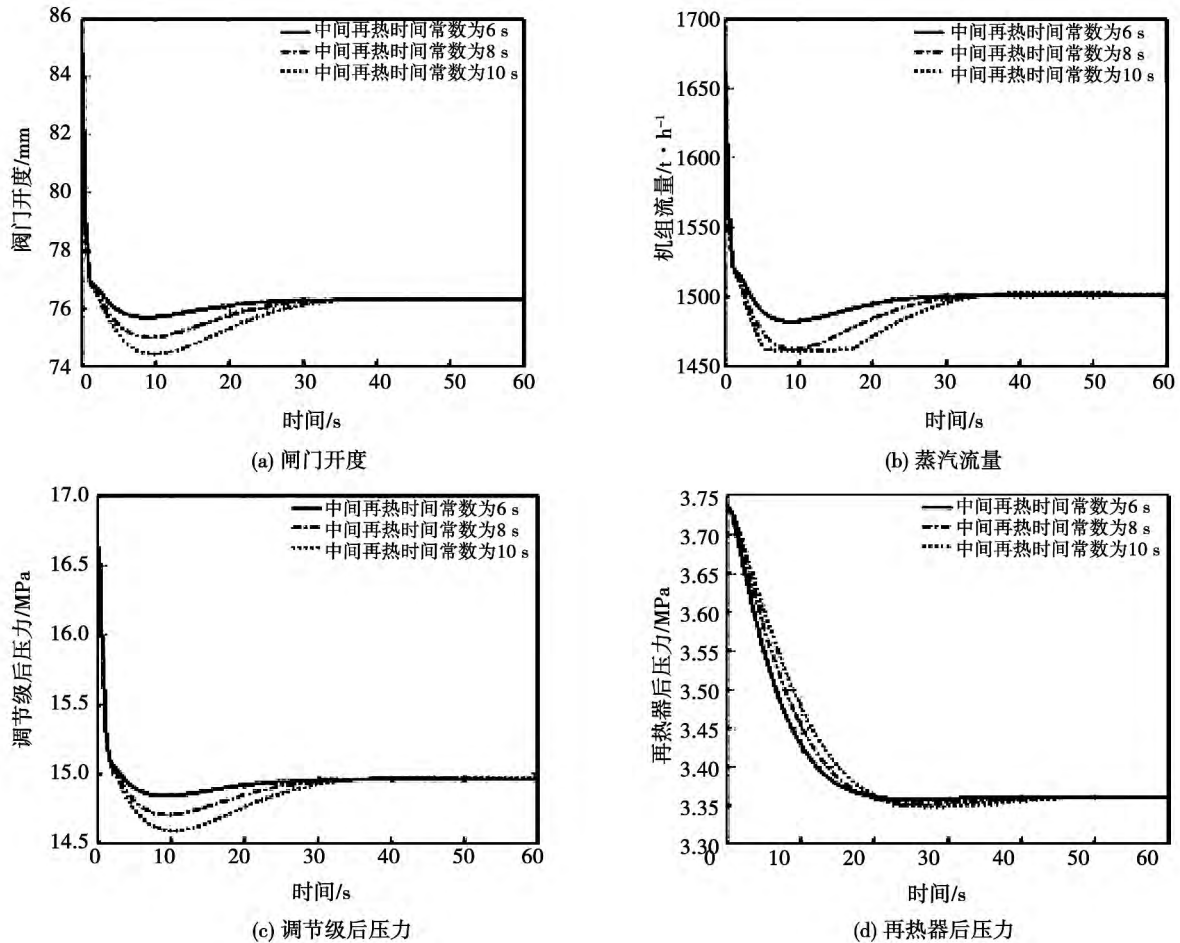


图 6 中间再热时间常数变化时的动态响应特性

Fig. 6 Dynamic response characteristics when the intermediate reheat time constant is changing

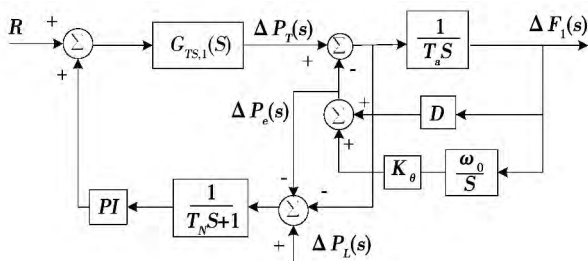


图 7 滑压运行时机组控制系统的传递函数方框图

Fig. 7 Block diagram of the transfer function of the control system of the unit when the unit is operating at a sliding pressure

2.3.1 不同负荷扰动的动态响应特性

当负荷扰动分别为 5%、10%、15% 时,机组流量、调节级后压力、调节级后温度、再热器后温度的变化规律如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着负荷扰动的增大,各物理量的百分比超调量不变,在锅炉出口温度不变的条件下,机组高中压各级温度的变化可以忽略,汽轮机不会成为限制机组变负荷速度的障碍。过渡过程时间在 150 s 左右,各物理量趋于稳定,过程近似满足线性系统的特点。

2.3.2 系统时间常数变化时的动态响应特性

当负荷扰动一定(10% 负荷扰动)时,系统流量压力时间常数变化对系统动态特性的影响如图 9 所示。

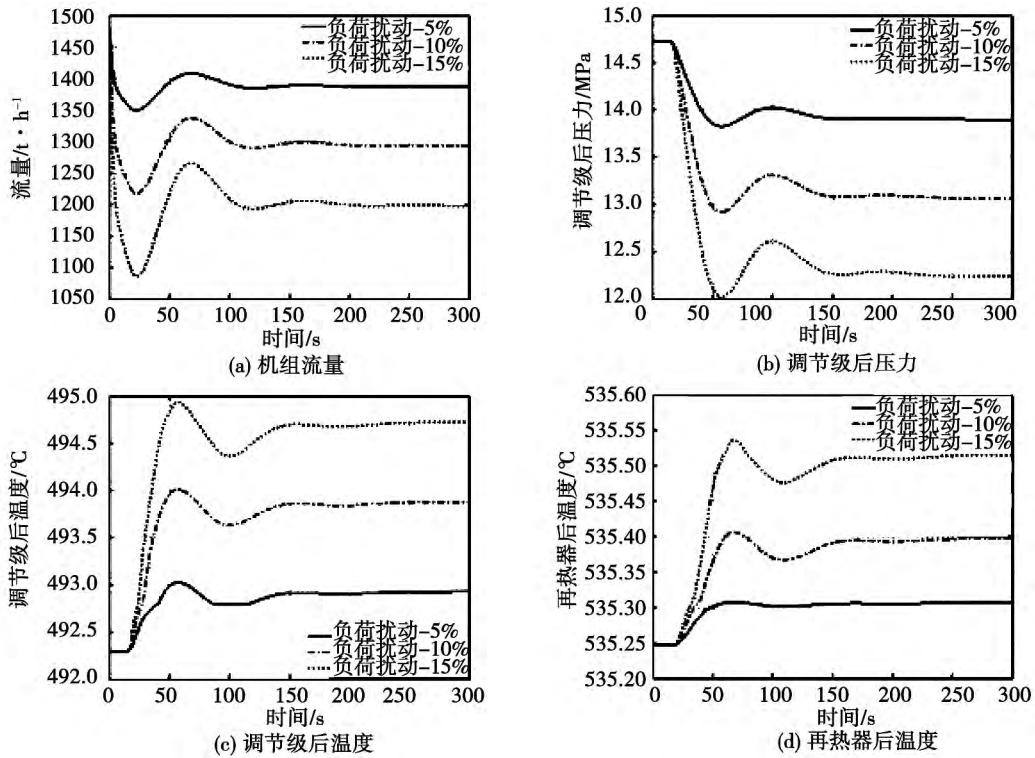


图 8 不同负荷扰动时的动态响应特性

Fig. 8 Dynamic response characteristics when disturbed at various loads

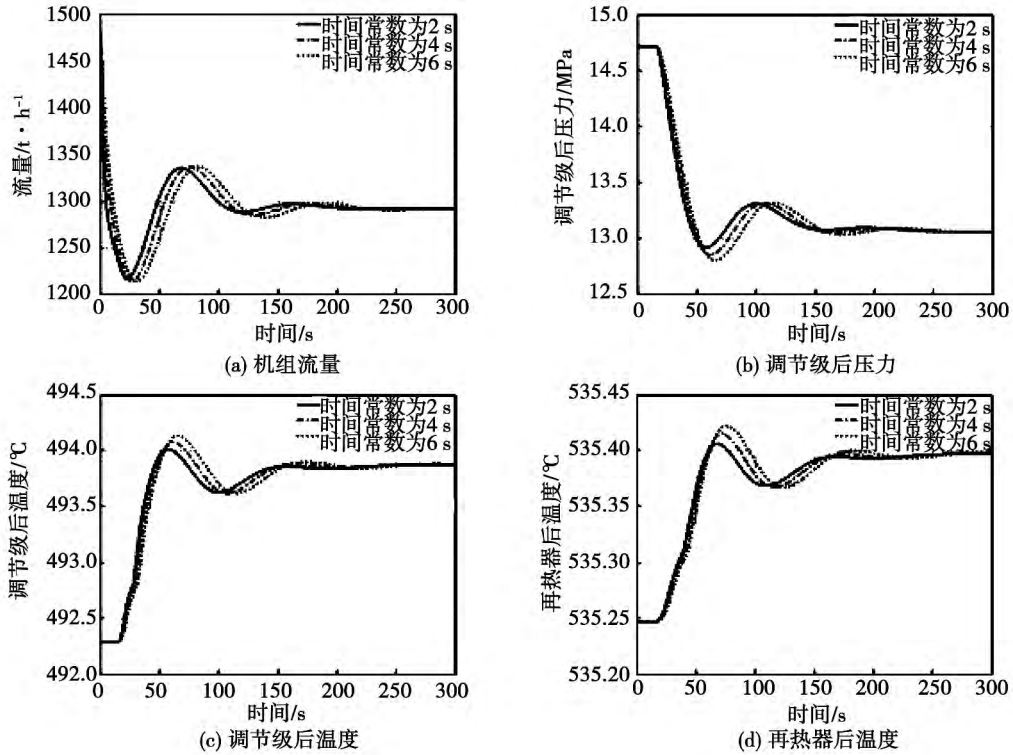


图 9 流量—压力时间常数变化时的动态响应特性

Fig. 9 Dynamic response characteristics when the flow rate-pressure time constant is changing

从图 9 可以看出,随着流量压力时间常数的增加,过渡过程时间延长,超调量增加,但是对于机组各级温度的变化基本上没有影响。也就是说,在维持锅炉出口温度不变的条件下,流量压力环节时间

常数的变化对汽轮机热力特性的影响可以不考虑。

功率流量环节实际上反映了锅炉的惯性,时间常数比较大,其对系统动态特性的影响如图 10 所示。

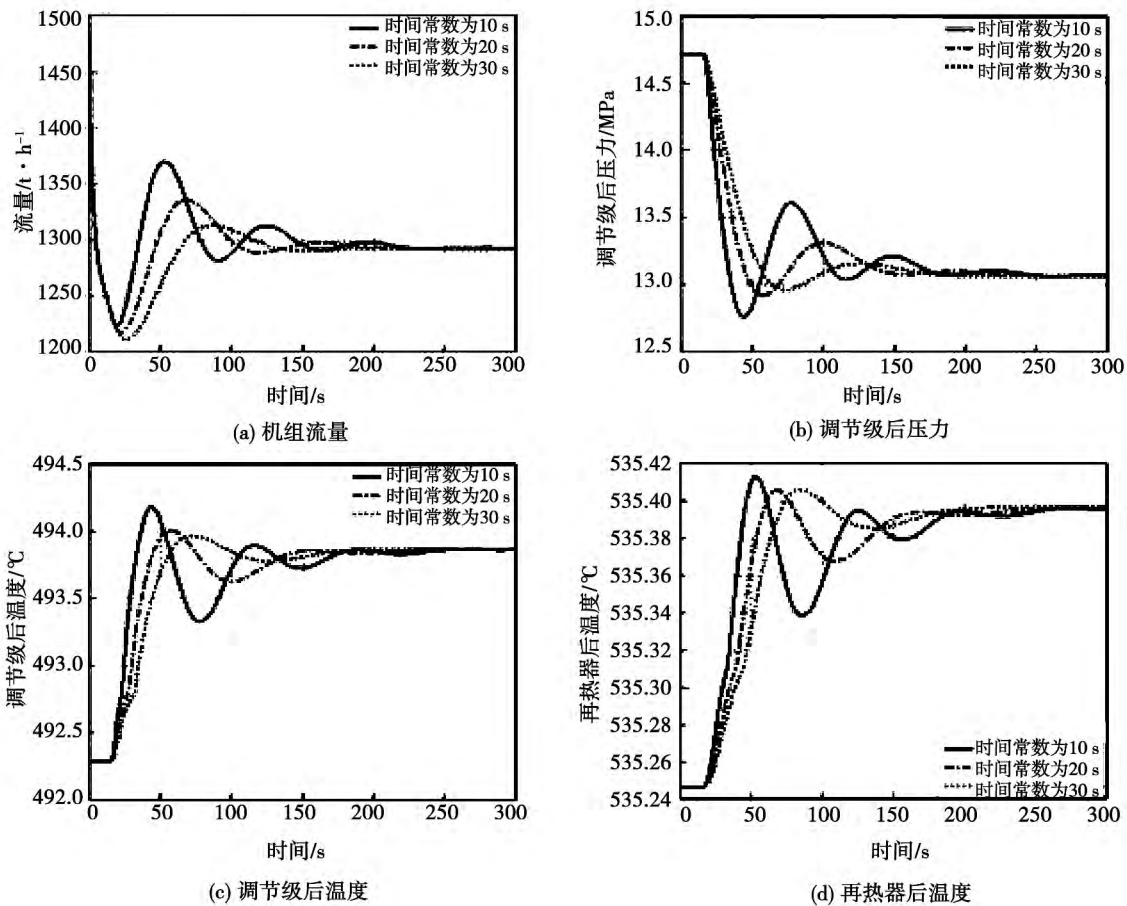


图 10 功率—流量时间常数变化时的动态响应特性

Fig. 10 Dynamic response characteristics when the power-flow rate time constant is changing

功率流量环节时间常数变化时,对于系统的响应特性有比较大的影响,惯性时间延长时,过渡过程时间延长,超调量增加。但是,当锅炉温度控制系统维持锅炉出口温度不变化时,无论锅炉惯性时间如何变化,机组各级温度的变化非常小。

荷每变化 10%,高压调节级后的温度变化 $11.5^{\circ}C$,其它各级的温度变化均小于高压调节级的温度变化;当机组滑压运行从启滑负荷至 50% 负荷范围内变化时,负荷每变化 10%,高压调节级后的温度变化 $1.75^{\circ}C$ 。

3 结 论

(1) 超临界机组无论是定压运行还是滑压运行,在保证再热器出口温度稳定的条件下,机组中压缸各级的温度变化非常小。而对于高压缸,当机组定压运行且在 100% - 50% 负荷范围内变化时,负

(2) 随着负荷扰动的增大,无论机组定压运行还是滑压运行,机组流量、调节级后压力、调节级后温度、再热器后温度等物理量动态过程中的百分比超调量不变,机组高中压各级温度的变化可以忽略,温度变化的动态特性近似满足线性规律。

(3) 超临界机组定压运行时,所有系统时间常数中只有再热容积时间常数的变化对于系统动态特

性有较明显影响,其它参数变化对各物理量的影响可以不计。机组滑压运行时,在维持锅炉出口温度不变的条件下,随着流量压力环节时间常数和功率流量环节时间常数的增加,过渡过程时间延长,超调量增加,高压调节级后的温度变化约 1.5 °C,再热器后温度变化约 0.2 °C,因此对于机组各级温度的变化基本上没有影响。

(4) 火电机组通过设置合理的调速系统参数参与电网的一次调频,既可以保证机组运行的安全性和稳定性,又能够保证电网频率变化在允许的范围之内。

参考文献:

[1] 肖 军,任挺进,袁爱东.超临界火电机组汽温动态特性研究[J].发电设备,2009(1):4-8.
XIAO Jun,REN Ting-jin,YUAN Ai-dong. Study of the dynamic characteristics of the steam temperature of a supercritical thermal power unit[J]. Power Equipment,2009(1):4-8.

[2] 黄锦涛,陈听宽.超临界直流锅炉蒸发受热面动态过程特性[J].西安交通大学学报,1999,33(9):71-75.
HUANG Jin-tao,CHEN Ting-kuan. Dynamic process characteristics of the evaporating heating surface of a supercritical once-through boiler[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,1999,33(9):71-75.

[3] 郦晓雪,高升,李旭等.超临界机组过热器、再热器动态特性模型研究[J].发电设备,2013,27(5):322-325.
LI Xiao-xue,GAO Sheng,LI Xu,et al. Study of the model for dynamic characteristics of the superheater and reheater of a supercritical unit[J]. Power Equipment,2013,27(5):322-325.

[4] 刘远鹏.超临界压力锅炉汽水系统分布参数动态数学模型[D].重庆:重庆大学,2005.
LIU Yuan-peng. Dynamic mathematical model for the distributed parameters of the steam-water system of a supercritical pressure boiler[D]. Chongqing: Chongqing University,2005.

[5] 郑 艳.汽轮机压力-流量通道动态数学模型的建立[J].发

电设备,2003(3):11-13.
ZHENG Yan. Establishment of a dynamic mathematical model for the pressure-flow rate passages of a steam turbine[J]. Power Generation Equipment,2003(3):11-13.

[6] 于达仁,徐志强.超临界机组控制技术及发展[J].热能动力工程,2001,16(92):115-121.
YU Da-ren,XU Zhi-qiang. Supercritical thermal power unit control technology and its development[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2001,16(92):115-121.

[7] 章伟杰,杨景祺,李卓霖,等.600 MW超临界机组控制特性的分析与控制策略的研究[J].动力工程学报,2013,33(8):600-605.
ZHANG Wei-jie,YANG Jing-qi,LI Zhuo-lin,et al. Analysis of the control characteristics of a 600 MW supercritical unit and study of its control tactics[J]. Journal of Power Engineering,2013,33(8):600-605.

[8] 肖伯乐,赵铁成,孙 瑞.超临界机组动态特性的分析[J].发电设备,2004(增刊):21-25.
XIAO Bo-le,ZHAO Tie-cheng,SUN Rui. Analysis of the dynamic characteristics of a supercritical unit[J]. Power Generation Equipment,2004(supplement):21-25.

[9] 王恭良,沈 炯,李益国,等.适用于控制的600 MW超临界机组的简化模型[J].江苏电机工程,2008,27(4):1-7.
WANG Gong-liang,SHEN Jiong,LI Yi-guo,et al. A simplified model for the control of a 600MW supercritical unit[J]. Jiangsu Electrical Machinery Engineering,2008,27(4):1-7.

[10] 蔡宝玲,王 哲,魏 湘,等.超临界600 MW机组仿真系统动态数学模型的开发及其分析[J].热力发电,2006(2):34-36.
CAI Bao-ling,WANG Zhe,WEI Xiang,et al. Development and analysis of a dynamic mathematical model for the simulation system of a 600 MW supercritical unit[J]. Thermal Power Generation,2006(2):34-36.

(丛 敏 编辑)

移动式余热利用系统的经济性研究 = **Study of the Cost-effectiveness of a Mobile Type Waste Heat Utilization System** [刊 汉] GUO Shao-peng (College of Energy Source and Environment ,Inner Mongolia University of Science and Technology ,Baotou ,China ,Post Code: 014010) ,ZHAO Jun ,AN Qing-song ,GAO Wei (Education Ministry Key Laboratory on Low Temperature Thermal Energy High Efficiency Utilization ,College of Mechanical Engineering ,Tianjin University ,Tianjin ,China ,Post Code: 300072) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(5) . -465 -469

On the basis of a mobile type waste heat utilization test system being used as a reference ,performed were the cost and income estimation of a mobile type waste heat utilization system in a scale of practical applications. Through the two cost-effective indexes (net present value and investment payback period) ,the cost-effectiveness of the above-mentioned system was analyzed and studied. In addition ,in combination with the heat charging time ,distance from the heat source and waste heat prices etc. factors ,a sensitivity analysis of the project was made. It has been found that for the mobile type waste heat utilization project serving as the case being studied ,when the waste heat cost changes ,the net present values of the project in the years of the system in operation corresponding to the discount rate of 7% ,10% ,12% and 15% are bigger than zero. Under the condition of various waste heat costs ,the longest investment payback period at four discount rates will be 13 ,9 ,11 and 15 years respectively. The foregoing cost-effective indexes indicate that the mobile type waste heat utilization project serving as the case under investigation is feasible in terms of its cost-effectiveness. The extents of the heat charging time of the heat accumulator and the distance from the heat source influencing the cost-effectiveness of the project will be basically identical ,both greater than that of the waste heat price influencing the cost-effectiveness of the project. The foregoing cost-effectiveness study can offer reference and an underlying basis for making decisions of mobile type waste heat utilization projects.

Key Words: mobile type waste heat utilization ,cost-effectiveness ,sensitivity analysis

超临界机组一次调频对汽轮机动态热力特性的影响 = **Influence of the Primary Frequency Modulation of a Supercritical Unit on the Dynamic Thermal Characteristics of Its Steam Turbine** [刊 汉] LI Fu-shang (Shandong Electric Power Research Institute ,Jinan ,China ,Post Code: 250000) ,WANG Xu-rong ,DAI Yi-ping (College of Energy Source and Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) ,ZHANG Ya-fu (Xi'an Thermodynamics Research Institute Co. Ltd. ,Xi'an ,China ,Post Code: 710032) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(5) . -470 -476

A mathematical model was established for supercritical units and their control systems ,a software for calculating the off-design condition characteristics of the units was programmed and the law governing the influence of the primary

frequency modulation on the dynamic thermal characteristics of the supercritical steam turbine was studied. By using a method combining the lumped parameters with distribution parameters a dynamic mathematical model was established for the units and the static and dynamic characteristics of the units under various operating conditions was analyzed with the law governing the influence of the load disturbance and parameters of the control system under different operating conditions on the flow rate of the units, pressure and temperature after the regulating stage and temperature after the reheater being obtained. It has been found that with an increase of the load disturbance, whatever the units are in constant pressure and sliding pressure operation, the percentage overshoots of various physical quantities during the dynamic process are constant and changes of the temperatures in various HP, IP and LP stages of the units can be neglected. When the units are in sliding pressure operation, under the condition of the temperature at the outlet of the boiler being kept constant, with an increase of the time constant in both flow rate-pressure link and power-flow rate link, any change in the temperature after the HP regulating stage is approximately 1.5 °C and that after the reheater is about 0.2 °C. Therefore, the influence of the primary frequency modulation on the dynamic characteristics of the thermal parameters in the supercritical units under various operating conditions is very small and will not affect the safety and stability of the units in operation. **Key Words:** primary frequency modulation, supercritical unit, constant pressure operation, sliding pressure operation, dynamic thermal characteristics

分布式拉杆转子轴向预紧力的确定 = **Determination of the Axial Pretightening Force of a Distributed Type Tie-rod Rotor** [刊, 汉] ZHANG Qing-lei, CHEN Yan-fang, CHENG Yi-yue (College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014, 29(5). -477-482

Studied was the method for determining the axial pretightening force of a distributed type tie-rod rotor when the contact effect between the wheel disks being taken into account and analyzed was the variation law governing the maximal equivalent stress of the rotor, maximal and minimal normal contact stress on the joint surfaces of the wheel disks and the bending rigidity of the rotor under various operating conditions with the pretightening amount of the tie-rod. It has been found that with an increase of the axial pretightening force of the rotor, the rotor can transfer a growing load and the deviation between its bending rigidity and intrinsic frequency and those of its continuum will become smaller, however, the maximal equivalent stress of the rotor will remarkably increase and the strength allowance of the material will markedly decrease. On the basis of the maximal equivalent stress of the tie-rod rotor, normal stress distribution on the contact surface, the bending rigidity and the free mode frequency of the rotor obtained, a proper axial pretightening force of the rotor was determined. When the rotor sustains a shear load of 100 KN, the proper pretightening force range of the rotor will be 7/10000 to 13/10000 of the total length of the tie-rod rotor. **Key**