

热电联产机组协调控制系统优化设计

郭晓红¹ 陈起¹ 田亮²

(1. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 华北电力大学 控制科学与工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 依据典型的300 MW抽汽式热电联产机组简化非线性动态模型设计热电联产机组的常规协调控制系统, 仿真发现, 供热负荷在手动控制方式下被控对象增益随供热负荷增加而降低是导致协调控制系统性能变差的主要原因。针对此种情况提出一种增益补偿方法设计增益补偿逻辑, 分别补偿锅炉侧、汽轮机侧对象增益变化, 仿真试验表明该方法能有效改善抽汽调节蝶阀, 在手动控制方式下或参数整定很弱的自动控制方式下机前压力的控制品质。

关键词: 热电联产机组; 协调控制; 增益补偿; 仿真分析

中图分类号: TP273 文献标识码: B
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2015.06.023

引言

随着用电负荷随机性加剧, 以及发电功率不稳定的风电等可再生能源的出现, 发电电源呈规模化并网, 电网调峰调频能力不足的矛盾日益凸显^[1]。我国北方地区热电联产机组装机容量占火电机组装机容量50%以上, 供暖期内多以“以热定电”方式, 而冬季又恰逢风电高发电低谷季节, 电网调峰调频能力不足的矛盾尤其突出。为解决此矛盾热电联产机组在供暖期内投入一次调频功能及有条件地投入AGC(自动发电控制)功能是大势所趋^[2-6]。

国内装机容量最大的抽汽式热电联产机组, 在纯凝工况下热力系统结构及运行方式与传统机组并无差异^[1]。热电联产机组机炉协调控制系统的设计、调试及性能测试也主要针对纯凝工况进行, 机组在供热工况下投入AGC, 控制指标往往难以另人满意^[7]。文献[8]对此问题开展研究, 提出供热机组利用热网蓄热快速补偿发电负荷扰动的思路。

文献[9]给出了典型热电联产机组简化非线性动态模型并进行了验证, 依据此模型在MATLAB(矩阵实验室)环境下建立对象模型及协调控制系统, 通过对比纯凝、供热两种工况下控制系统性能变

化, 研究能够适应以上两种工况的协调控制系统优化设计方法。本研究在此基础上研究一种能够同时适应纯凝、供热两种工况的协调控制系统改进设计方案。

1 系统结构及对象模型

抽汽式热电联产机组与纯凝式机组的主要区别在于汽轮机侧增加了中压缸与低压缸连通管侧抽汽装置、热网加热器等设备, 其余部分与纯凝式机组相同, 以东汽C300/235-16.7/0.35/537/537(额定发电功率/额定供热工况发电功率-额定汽轮机前蒸汽压力/额定供热抽汽压力/额定过热蒸汽温度/额定再热蒸汽温度)机组为例, 其热力系统结构如图1所示。

系统主要特点是: (1) 将汽轮机低压缸的2个做功级移至中压缸, 降低中压缸排汽温度以适应供热要求; (2) 在汽轮机中压缸与低压缸连通管道内安装抽汽调节蝶阀, 通过控制中压缸排汽压力控制供热抽汽流量; (3) 供热抽汽从位于抽汽调节蝶阀前的三通管内引出, 经过供热管道上的快关阀、逆止阀等设备, 进入热网加热器; (4) 供热抽汽在热网加热器内释放热量转变为热网疏水, 经过热网循环泵升压进入除氧器; (5) 热网循环水回水经过热网循环泵升压后进入热网加热器, 吸收热量后进入热网管道。

其简化非线性动态模型结构为^[9]:

$$r_m = u_B(t - 15) \quad (1)$$

$$120T_f \frac{dr_B}{dt} = -r_B + r_m \quad (2)$$

$$3300 \frac{dp_d}{dt} = -0.269p_T u_T + 2.37r_B \quad (3)$$

收稿日期: 2015-04-03; 修订日期: 2015-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776030); 华北电力大学博士科研基金资助项目(200612001)

作者简介: 郭晓红(1968-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 内蒙古电力科学研究院高级工程师。

$$p_T = p_d - 0.00035(2.37r_B)^{1.5} \quad (4)$$

$$12 \frac{dN_E}{dt} = -N_E + 0.175p_T u_T + 2.096p_z u_H \quad (5)$$

$$160 \frac{dp_z}{dt} = -0.00039q_x(96p_z - t_i + 103) + 0.0942p_T u_T - 2.096p_z u_H \quad (6)$$

$$q_H = 0.0024q_x(96p_z - t_i + 103) \quad (7)$$

$$p_1 = 0.01p_T u_T \quad (8)$$

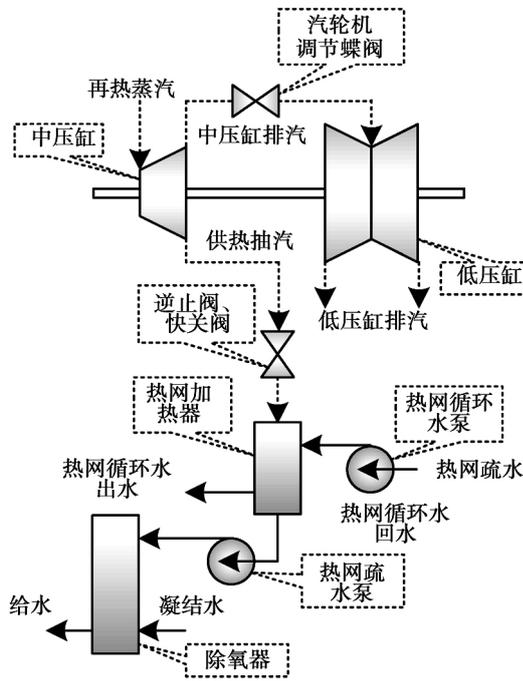


图 1 机组供热部分热力系统结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the heating parts for units

模型包含 3 个控制输入变量: u_B —机组燃料量, t/h; u_T —汽轮机高压缸进汽调节门开度, %; u_H —供热抽汽调节蝶阀开度, %。模型包含 2 个扰动输入变量: q_x —热网循环水流量, t/h; t_i —热网循环水回水温度, °C。模型包含 3 个状态输出变量: p_T —汽轮机前压力, MPa; N_E —机组发电功率, MW; p_z —供热抽汽压力, MPa。模型还能够反映 2 个机组其它变量输出: q_H —供热抽汽流量, t/h; p_1 —汽轮机一级压力, MPa。模型包含 2 个中间变量: r_m —制粉系统中实际进入磨煤机煤量, t/h; r_B —锅炉燃烧率, t/h。

此模型能够涵盖机组供热和纯凝 2 种工作方式。纯凝工况下热网循环水流量为零,式 7 可以取消,式 6 静态部分并可代入式 5,热电联产机组模型将还原为文献 [10] 描述的纯凝机组的双入双出

模型。

2 控制系统仿真

2.1 额定发电负荷纯凝工况

在 MATLAB(矩阵实验室)环境下建立热电联产机组协调控制系统及对象模型,进行控制系统特性仿真。以纯凝工况作为基准,对比其它工况下控制系统特性变化。仿真条件为:发电功率变化速率设置为 4.5 MW/min,变化范围为 255-300 MW,定压运行方式。

协调控制系统结构如图 2 所示,特点为:炉跟机控制方式,即燃料量控制机前压力,汽轮机高调门开度控制发电功率;锅炉侧发电功率指令前馈由限幅限速后发电功率折算燃料量的静态部分和其一阶微分构成的动态前馈部分组成。经过整定参数后,AGC 指令扰动下发电功率、机前压力响应如图 3 所示。经过优化后的协调控制系统,发电功率能够很好跟随功率指令变化,机前压力波动幅度小于 ±0.3 MPa。

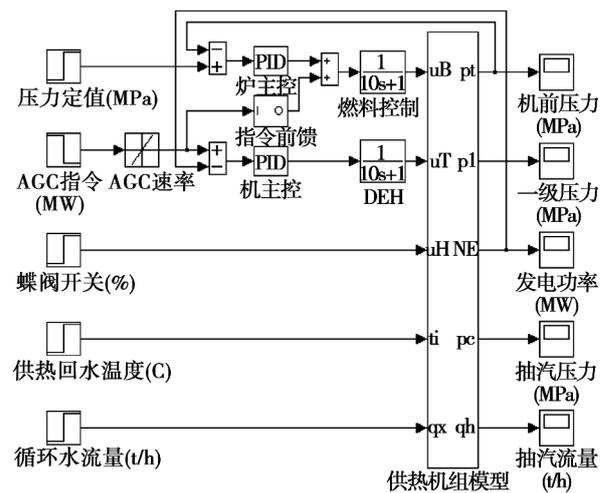


图 2 协调控制系统结构图

Fig. 2 The structure diagram of coordinated control system

2.2 额定供热工况蝶阀自动控制

抽汽式热电联产机组设计为通过调节抽汽调节蝶阀开度控制供热抽汽压力,进而保证供热负荷稳定。分析协调控制系统参数保持不变,抽汽调节蝶阀开度投入自动情况下系统特性。AGC 指令扰动下发电功率、机前压力、供热抽汽流量响应如图 4 所

示。可见,抽汽调节蝶阀自动控制时,发电功率变化不影响供热负荷,同时发电功率及机前压控制品质指标基本没有变化。

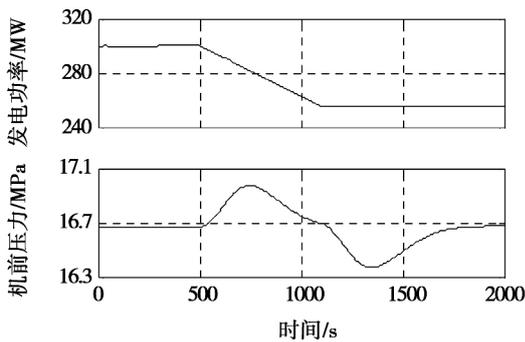


图 3 纯凝工况 AGC 指令扰动

Fig. 3 AGC instruction disturbance of pure condensing working conditions

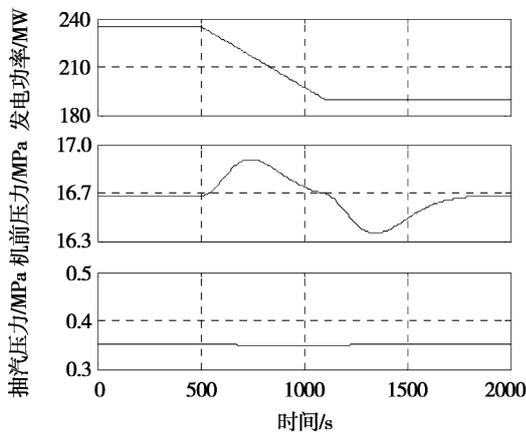


图 4 蝶阀自动供热工况 AGC 指令扰动

Fig. 4 AGC instruction disturbance under automatic butterfly valve heat supply working conditions

2.3 额定供热工况蝶阀手动控制

限于运行方式和设备原因,很多情况下抽汽调节蝶阀采用手动控制。分析协调控制系统参数保持不变,抽汽调节蝶阀开度保持不变情况下系统特性。AGC 指令扰动下发电功率、机前压力、供热抽汽流量响应如图 5 所示。可见,抽汽调节蝶阀手动控制时,发电功率变化将影响供热负荷变化,同时机前压力控制效果明显变差,波动幅度达到 ± 0.5 MPa。

导致这一现象的主要原因在于汽轮机侧对象增益的变化,纯凝工况下汽轮机进汽能量全部用于发电,而供热工况下一部分进汽能量用于供热导致发电功率下降,即表现为汽轮机单位进汽流量所对应

的发电功率下降。以机组设计数据为例说明,机组 100% THA(热耗考核)工况下,锅炉蒸汽流量为 873 t/h,对应纯凝工况下发电功率为 300 MW,对应供热抽汽流量为 400 t/h,额定供热工况下发电功率仅为 235 MW,汽轮机侧增益下降 22%。对于炉跟机协调控制系统,汽轮机侧被控对象属于小惯性小迟延易控制对象,因此发电功率控制品质不会有明显下降,当机侧闭环后将使锅炉侧等效被控制对象增益发生变化,锅炉侧对象存在大惯性大迟延难以控制,对象增益变化导致机前压力控制品质明显变差。

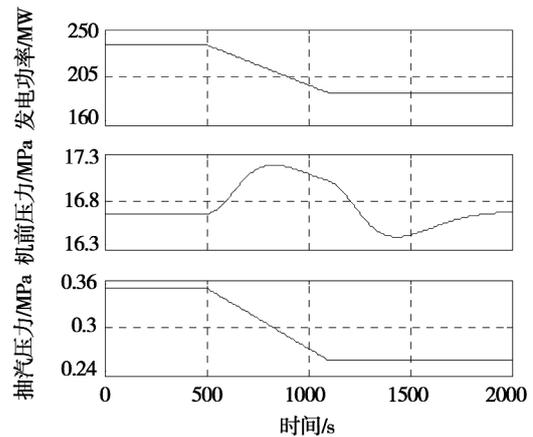


图 5 蝶阀手动供热工况 AGC 指令扰动

Fig. 5 AGC instruction disturbance under manual butterfly valve heat supply working conditions

当蝶阀投入快速自动控制时,AGC 指令变化时控制系统能够维持供热负荷恒定,进入汽轮机蒸汽流量的增加量全部用于发电,因此等效对象增益并无太大变化,对发电功率和机前压力控制品质并无太大影响。

3 优化设计

从仿真结果看,热电联产机组供热侧投入自动是防止发电功率影响供热负荷、维持机组协调控制系统性能指标的最优选择。但现场实际情况往往制约供热侧自动投入,包括:(1)汽轮机中压缸排汽体积流量巨大,安装调阀会造成巨大的节流损失;(2)蝶阀节流损失小,但其调压不等率大,非线性严重,不适合频繁动作;(3)调节蝶阀故障后果严重,往往会迫使汽轮机停机,控制系统设计要特别注意保护

执行机构;(4) 汽轮机中压缸排汽压力高会导致中压缸做功不足引起轴向推力变化等,汽压力过高将威胁供热抽汽管道、热网加热器等设备的安全,低压缸进汽流量低会导致蒸汽流动阻塞诱发汽轮机振动。控制系统需要优先考虑设备安全性。综合以上分析,热电联产机组供热工况下将供热侧投入自动并达到优良的控制品质并不一定能够满足现场需要,调节蝶阀处于手动调节状态或在限制调节幅度及调节速率的情况下投入自动才更加符合实际情况。

优化热电联产机组协调控制系统优化的关键在于对供热抽汽流量变化引起的对象增益的变化进行补偿。依据对象模型,进入汽轮机的能量可表示和转变为发电功率的能量分别:

$$E_T = 0.269p_T u_T \quad (9)$$

$$E_E = 0.175p_T u_T + 2.096p_z u_H \quad (10)$$

式中: E_T ——进入汽轮机的能量, MW; E_E ——转化为发电功率的能量, MW。

则对象增益补偿系数理论计算公式为:

$$K_H = \frac{E_T}{E_E} = \frac{0.269p_T u_T}{0.175p_T u_T + 2.096p_z u_H} \quad (11)$$

式中: K_H ——增益补偿系数。典型机组增益补偿系数变化范围在 1 - 1.28 之间,供热负荷越高数值越大。典型工况下数据如表 1 所示。

表 1 典型工况增益补偿系数

Tab. 1 Compensation coefficient of gain under typical operation conditions

参 数	额定发电	额定供热
机前压力 p_T /MPa	16.67	16.67
调节门开度 u_T /%	66.89	66.89
抽汽压力 p_z /MPa	0.5	0.35
U_H / (%)	100	54.53
增益补偿系数 K_H	1	1.28

将此增益补偿系数以乘积的形式引入热电联产机组协调控制系统,修正锅炉主控输出和汽轮机主控输出。图 6 为抽汽调节蝶阀采用手动控制情况下 AGC 指令扰动实验曲线,与图 5 相比,压力波动减小 0.2 MPa。可见机前压力控制效果获得明显改善。

图 7 显示了供热侧投入自动对调节蝶阀动作进

行限速处理且供热侧控制器参数整定很弱为“缓慢爬坡”形式时,经过补偿后的控制效果,可见此补偿逻辑依然有效。

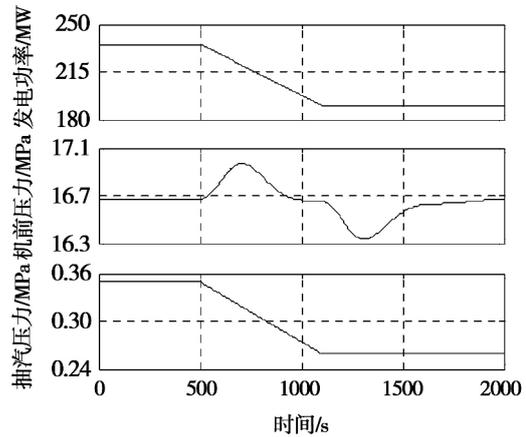


图 6 优化后蝶阀手动供热工况 AGC 指令扰动

Fig. 6 AGC instruction disturbance under manual butterfly valve heat supply working conditions after optimization

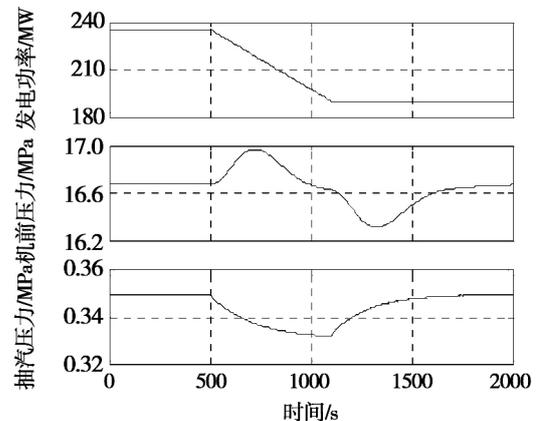


图 7 优化后蝶阀缓慢自动供热工况 AGC 指令扰动

Fig. 7 AGC instruction disturbance under slow automatic butterfly valve heat supply working conditions after optimization

4 结 论

针对热电联产机组供热季内协调控制系统性能下降,投入 AGC 后控制品质难以达标的问题,利用对象模型设计仿真控制系统进行研究,得到以下

结论:

(1) 当抽汽调节蝶阀采用手动控制时,机前压力控制品质变差是由于对象增益变化导致的。

(2) 研究一种对象增益系数补偿方法,通过仿真实验证明此方法能有效改善抽汽调节蝶阀采用手动控制或参数整定很弱的自动控制方式下机前压力的控制品质。

参考文献:

[1] 朱剑英. 330 MW 供热机组 AGC 和一次调频控制策略分析及优化[J]. 电力与能源. 2012, 33(3): 227 - 231.
 ZHU Jian-ying. Analysis and optimization of AGC and primary frequency control strategy for 330 mw heating unit [J]. Power & Energy 2012, 33(3): 227 - 231.

[2] 王建强, 郑渭建, 童小忠, 等. 基于热网蓄热提升机组 AGC、一次调频品质的试验研究[J]. 中国电力. 2014, 47(9): 1 - 5, 10.
 WANG Jian-qiang, ZHENG Wei-jian, TONG Xiao-zhong, et al. Experimental study on enhancing the quality of AGC and primary frequency regulation based on heat system accumulation [J]. Electric Power 2014, 47(9): 1 - 5, 10.

[3] 全勇军. 300 MW 空冷供热机组一次调频优化[J]. 电力学报. 2013, 28(3): 266 - 270.
 TONG Yong-jun. Primary frequency modulation optimization of 300 MW air cooling and heat supply unit [J]. Journal of Electric Power 2013, 28(3): 266 - 270.

[4] 尚勇, 贺悦科, 刘新龙. 供热发电机组一次调频策略及其优化[J]. 电气技术. 2009(2): 50 - 53.
 SHANG Yong, HE Yue-ke, LIU Xin-long. Control strategy and optimization of primary frequency modulation on thermal power unit [J]. Electrical Engineering 2009(2): 50 - 53.

[5] 杨建国. 200 MW 空冷供热机组一次调频能力分析 with 方案确定[J]. 电力学报. 2012, 27(2): 173 - 176.

YANG Jian-guo. Analysis and solution of primary frequency regulation capacity of 200 MW air-cooled co-gen units [J]. Journal of Electric Power 2012, 27(2): 173 - 176.

[6] 朱剑英. 协调控制系统的优化及 AGC、一次调频的投入分析[J]. 上海电力. 2012, 25(2): 77 - 78.
 ZHU Jian-ying. Optimization of coordinated control system analysis on primary frequency modulation and AGC application [J]. Shanghai Electric Power 2012, 25(2): 77 - 78.

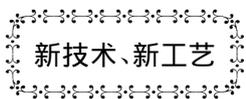
[7] 田超, 栗向鑫, 张圣楠. 京津唐电网供热机组冬季调峰能力分析[J]. 华北电力技术. 2013(3): 5 - 8.
 TIAN Chao, LI Xiang-xin, ZHANG Sheng-nan. Analysis on winter peaking capacity of the heating units of Bei-jing-Tianjin-Tangshan power grid [J]. North China Electric Power 2013(3): 5 - 8.

[8] 刘鑫屏, 田亮, 王琪. 补偿风电扰动的供热机组快速变负荷控制方法[J]. 电力系统自动化. 2014, 38(6): 26 - 32.
 LIU Xin-ping, TIAN Liang, WANG Qi. A control method of rapid load change for heat supply units compensating wind power disturbance [J]. Automation of Electric Power Systems 2014, 38(6): 26 - 32.

[9] 刘鑫屏, 田亮, 王琪, 等. 供热机组发电负荷-机前压力-抽汽压力简化非线性动态模型[J]. 动力工程学报. 2014, 34(2): 115 - 121.
 LIU Xin-ping, TIAN Liang, WANG Qi, et al. Simplified nonlinear dynamic model of generating load-throttle pressure-extraction pressure for heating units [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering 2014, 34(2): 115 - 121.

[10] 吴龙, 袁奇, 丁俊齐, 等. 基于变工况分析的供热机组负荷特性研究[J]. 热能动力工程. 2012, 27(4): 424 - 428, 513.
 WU Long, YUAN Qi, DING Jun-qi, et al. Study of the load characteristics of a heat-supply unit based on an analysis of its off-design operating conditions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power 2012, 27(4): 424 - 428, 513.

(姜雪梅 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.024

使燃气轮机减排的后处理系统

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2015 年 6 月刊报道, PMFG 公司已接受了一个 450 万美元的合同, 为在 2016 年年初将要安装在新英格兰地区的 2 个燃气轮机联合循环电站提供 2 个 SCR(选择催化还原)和 CO/VOC(挥发性有机化合物)氧化系统。

该设备将是新的快速启动联合循环电站的一部分, 并使 NO_x 排放减少 90%。

(吉桂明 摘译)

provided in the software Fluent ,the distribution characteristics of the temperature ,speed and various constituents inside the furnace before and after the optimization were studied. It has been found that after the optimization and adjustment of the combustion inside the furnace ,the carbon monoxide concentration in the zone of the burners in the upper layer decreases from 0.8% to 0.5% and the speed and temperature distribution region correspondingly reduces ,thus making an outstanding achievement in containing the coking. The method above-mentioned can offer reference for anti-coking operation and modification of boilers burning Zhundong-originated coal. **Key words:** Zhundong-originated coal with a high sodium content ,tangentially-fired boiler ,layered arrangement ,coking ,numerical simulation ,butterfly shape

多流量低温省煤器最优设计通用数学模型 = A General-purposed Mathematical Model for Optimal Design of Multi-flow Low Temperature Economizers [刊 ,汉] TAN Liang-hong ,HU San-gao ,ZHAO Yan ,WANG Zhe (College of Energy Source ,Power and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Beijing , China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -911 -915

For low temperature economizers in boilers ,proposed was a multi-flow connection mode ,of which the connection criteria and the resulting influence on the cost-effectiveness of the unit were analyzed. Under the condition of the total investment ,power consumption and amount of coal burned being taken into account and with the maximal pure income serving as the object of study ,a mathematical model for optimal design of low temperature economizers was established and with a N200-42.75/535/535 unit serving as an example ,a calculation was performed. The calculation results show that compared with a single-flow economizer ,a multi-flow economizer can increase the amount of steam extracted at low parameters and at the same time decrease that at high parameters ,thus better realizing a stepped utilization of waste heat from flue gases ,reducing the coal consumption by 0.5 g/(Kw. h) ,cutting the heat exchange area by 1 000 square meters and minimizing the initial investment and the power consumed by the fans and pumps.

Key words: utility boiler ,low temperature economizer ,optimized design

热电联产机组协调控制系统优化设计 = Optimized Design of a Coordinated Control System for Cogeneration Units [刊 ,汉] GUO Xiao-hong ,CHEN Qi (Inner Mongolia Electric Power Academy ,Hohhot ,China ,Post Code: 010020) ,TIAN Liang (College of Control Science and Engineering ,North China University of Electric Pow-

er ,Baoding ,China ,Post Code: 071003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(6) .
-916 -920

By making use of a simplified non-linear dynamic model for typical 300 MW steam extraction type cogeneration units ,designed was a conventional coordinated control system for cogeneration units. The simulation results show that under the manual control mode ,the fact that gains in parameters of the object under control will decrease with an increase of the heating load constitutes the main cause for deterioration in the performance of the coordinated control system. The authors designed a gain compensation logic ,thus compensating changes in the gains of the object at the side of the boiler and steam turbine and effectively improving the quality in controlling the pressure before the unit under the condition of the steam extraction regulating butterfly valve being in a manual control mode or under the automatic control mode when the setting of the parameters is very weak. **Key words:** cogeneration unit ,coordinated control ,gain compensation ,simulation analysis

基于遗传算法的冷却塔管式配水系统优化设计计算研究 = Study of the Optimized Design and Calculation of a Tube Type Water Distribution System for Cooling Towers Based on the Genetic Algorithm [刊 ,汉]

WANG Feng ,JI Qing-feng (College of Water Conservation ,Energy Source and Power ,Yangzhou University ,Yangzhou ,China ,Post Code: 225127) ,WANG Dong-hai (China Nuclear Power Engineering Co. Ltd. ,Beijing ,China , Post Code: 100840) ,ZHOU Ling (College of Water Conservation and Hydropower ,Hehai University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210098) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(6) . -921 -925

For a natural ventilation cooling tower tube type water distribution system ,with the design version for a single distribution system serving as the evolution individual ,the ideal flow coefficient for a single water distribution tube as the evolution direction and the integral uniform distribution coefficient as the evaluation target ,on the basis of an analysis of the methods for hydraulic calculation ,the genetic algorithm was used and a method for optimized design and calculation of cooling tower tube type water distribution systems was proposed based on the genetic algorithm. Through a check calculation of a case in an engineering project ,it has been proven that the calculation method above mentioned can effectively and quickly fulfill the automatically optimized type selection and design of the water distribution pipes and sprinklers in the water distribution system and relative to the water distribution system version empirically designed ,the water distribution system design version finalized after the optimization and calculation has