

# 先进预测控制在超超临界机组机炉协调系统上的应用

方吉吉

(中电投江西电力有限公司景德镇发电厂 江西 景德镇 333000)

**摘 要:** 针对中电投景德镇发电厂 660 MW 超超临界机组存在变负荷速率低、主要控制参数波动大、主再热汽温偏低的问题,本研究通过有机融合预测控制技术、神经网络学习技术及自适应控制技术,提出了现代大型超超临界火电机组 AGC 控制的先进解决方案,并利用 INFIT(基于 PLC 的先进热工控制应用平台)实时优化控制系统将上述控制方案在现场成功实现。机组上的实际应用表明,采用 INFIT 平台实现的先进控制技术明显提高了机组的负荷调节性能、机组运行稳定性和平均主再热汽温,全面提高机组的整体运行安全性和经济性。

**关 键 词:** 超超临界机组; 自动发电控制 AGC; 预测控制; 自适应控制; 燃水比

中图分类号: TK323 文献标识码: A

## 引 言

目前,国内火电机组的 AGC 控制策略主要采用国外各大 DCS 厂商提供的组态逻辑,采用了负荷指令前馈 + PID 反馈的调节方案,这种方案要求前馈控制回路的参数必须整定得非常精确,对于煤种稳定、机组设备稳定、机组运行方式成熟的国外机组是比较有效的,因此一直以来都是国外 DCS 厂商的推荐方案。但是对于煤种多变、机组控制及测量设备不精确、运行参数经常与设计参数存在较大偏差的国内机组,则控制效果会明显变差。

景德镇发电厂 2 × 660 MW 超超临界机组投产一段时间以来,由于 DCS 协调控制方案的先天设计不足以及机组面临的燃煤品质多变、运行工况多变、执行机构设备可靠性差等多种恶劣运行环境,造成目前的自动控制性能较差,机组只能以 5 MW/min 的速率投入 AGC 运行,主汽压力始终处于 0.5 ~ 1.0 MPa 的振荡过程,过热度的调节振荡也较明显。同时由于过热度及燃水比控制不合理,主汽温度控制偏差很大,易长时间低于设定值 10 °C 以上运行,机组的经济性受到明显影响。

本研究首先在锅炉主控回路中采用预测控制技

术来提前调整锅炉的负荷指令,加快锅炉的热负荷响应速度;同时针对超超临界机组,采用了新的燃水比控制方法,在汽水分离器温度发生偏移时通过解耦策略同时改变燃料量和给水流量来匹配燃水比率;最后通过智能的神经网络学习技术,不断动态调整控制系统的特性参数和部分机组设定参数,一方面使控制系统性能始终保持最佳,另一方面也使机组运行工况不断向最经济状态逼近。

## 1 基于先进控制技术的 AGC 协调控制方案

景德镇电厂 2 × 660 MW 超超临界机组优化前的 AGC 协调控制策略均只采用了负荷指令前馈 + PID 反馈的调节方案,锅炉明显跟不上汽机的能量变化,导致:(1) 机组变负荷率低,难以面对日益提高的电网 AGC 考核要求;(2) 机组主汽压力等重要参数的波动较大,明显影响机组安全性及长期运行寿命;(3) 过热度设置不合理,造成长期低参数运行,明显影响机组效率。

优化控制技术的核心思路在于:采用先进的预测控制技术对锅炉的负荷指令进行优化控制,加快锅炉的热负荷响应速度,从而提高机组的负荷升、降速率;对于超超临界机组,通过新的燃水比调整方法,协调修正燃料量和给水流量,有效抑制分离器温度变化,并尽可能减小对机组负荷的影响;通过智能的神经网络学习技术,不断动态调整控制系统的特性参数和部分机组设定参数,使得在机组运行环境发生改变的情况下,控制系统性能基本保持不变,并使机组始终运行在最合理、经济的工况点。

### 1.1 基于预测控制技术的锅炉主控控制策略

图 1 为基于预测控制技术的锅炉主控控制策略。

在控制结构上,新方案保留了常规锅炉主控方案中的“前馈”+“反馈”的控制模式,但在反馈回路中,采用了先进的广义预测控制器 GPC 代替常规的

收稿日期: 2012-11-28; 修订日期: 2012-12-28

作者简介: 方吉吉(1980-),男,江西乐平人,中电投江西电力有限公司助理工程师。

PID 控制器,为说明 GPC 预测控制器的计算原理,假定主汽压力定值、主汽压力及锅炉负荷指令的变化曲线如图 2 所示。

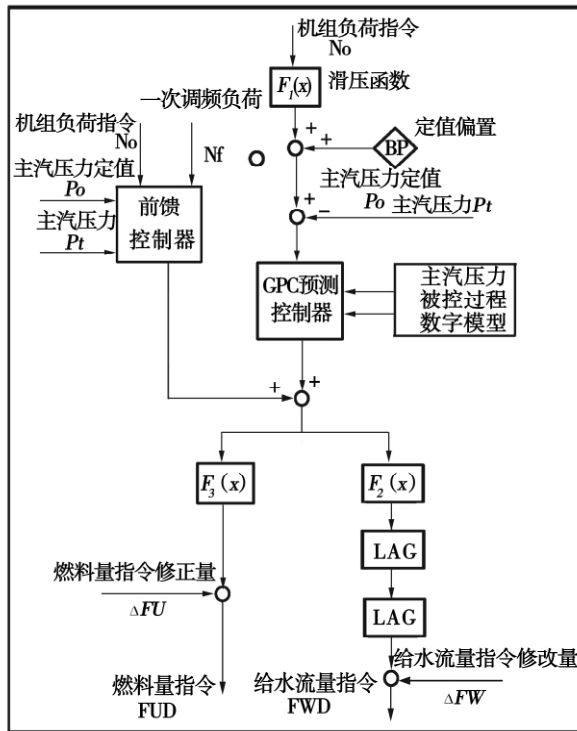


图 1 基于预测控制技术的锅炉主控控制策略

Fig. 1 Tactics for controlling the main controllers of a boiler based on the predictive control technology

图 2 中  $k$  为当前时刻,  $k-1, k-2, k-3, \dots$  为以前各个采样时刻,  $k+1, k+2, k+3, \dots$  为未来各个采样时刻。在  $k$  时刻, GPC 首先根据主汽压力被控过程的动态数学模型及主汽压力、锅炉负荷指令的历史数据(如图中的曲线 1 和曲线 2 数据),并假定在当前时刻锅炉负荷指令保持不变的情况下(如图曲线 4),预测出主汽压力在未来一段时间内的变化(如图曲线 3)。

则预测控制器的输出为:

$$u(k) = u(k-1) + F_1\{e(k), e(k-1), \dots, e(k-m)\} + F_2\{\hat{e}(k+1), \hat{e}(k+2), \dots, \hat{e}(k+n)\} + F_3\{\Delta\hat{e}(k+1), \Delta\hat{e}(k+2), \dots, \Delta\hat{e}(k+n)\}$$

式中:  $e(k), e(k-1), \dots, e(k-m)$  分别为当前及以前各个采样时刻的控制偏差;  $\hat{e}(k+1), \hat{e}(k+2), \dots, \hat{e}(k+n)$  分别为预测的未来各个时刻的控制偏差;  $\Delta\hat{e}(k+1), \Delta\hat{e}(k+2), \dots, \Delta\hat{e}(k+n)$  为未

来各个时刻的预测误差;  $u(k), u(k-1)$  分别为当前及前一个采样时刻的控制作用,本例中即为锅炉的负荷指令;  $F_1\{\cdot\}$  为计算函数,它是控制作用中与当前及以前各个采样时刻控制偏差相关的分量;  $F_2\{\cdot\}$  为计算函数,它是控制作用中与预测的未来各个时刻的控制偏差相关的分量,预测控制作用主要由这部分分量决定;  $F_3\{\cdot\}$  为计算函数,它是控制作用中与未来各个时刻的预测误差相关的分量。  $F_1\{\cdot\}, F_2\{\cdot\}, F_3\{\cdot\}$  可根据被控过程的动态数学模型推导获得。

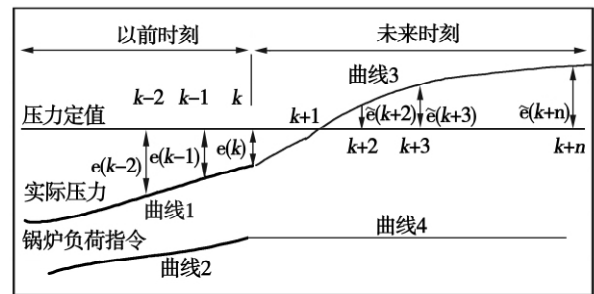


图 2 假定的主汽压力、定值与锅炉负荷指令的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of the main steam pressure, set point and boiler load instruction assumed

### 1.2 新型超超临界机组燃水比调整控制策略

锅炉的燃水比是根据分离器温度的偏差来进行调整的,常规的调整方法有调整给煤量或给水流量两种方法,这两种方法各有优缺点。对于调整给煤量的方法,缺点是给煤量对分离器温度的影响较慢,通过调整给煤量来控制分离器温度的效果相对较差;优点是给煤量对主汽压力和负荷的影响慢,有利于主汽压力和机组负荷的稳定。而对于调整给水流量的方法,给水流量对分离器温度的影响较快,因此,调整给水流量有利于控制分离器的温度,但对机组负荷及主汽压力的影响相对较大。本研究通过综合这两种方法的优点,提出了同时调整给煤量和给水流量的协调解耦控制策略,整个控制方案分为两个部分,首先计算燃水比控制分配系数  $\lambda_w$ ,  $\lambda_w$  是一个数值在 0~1 之间的系数,  $\lambda_w$  表示给水侧的校正强度,  $1 - \lambda_w$  则表示燃料侧的校正强度。燃水比控制分配系数  $\lambda_w$  的计算回路如图 3 所示。从图中不难看出,燃水比控制分配系数的确定遵循如下原则:

- (1) 当分离器温度偏差小时,说明燃水比失配不严重,此时单纯校正燃料侧燃料量来调节燃水比,减小对协调控制系统的扰动;

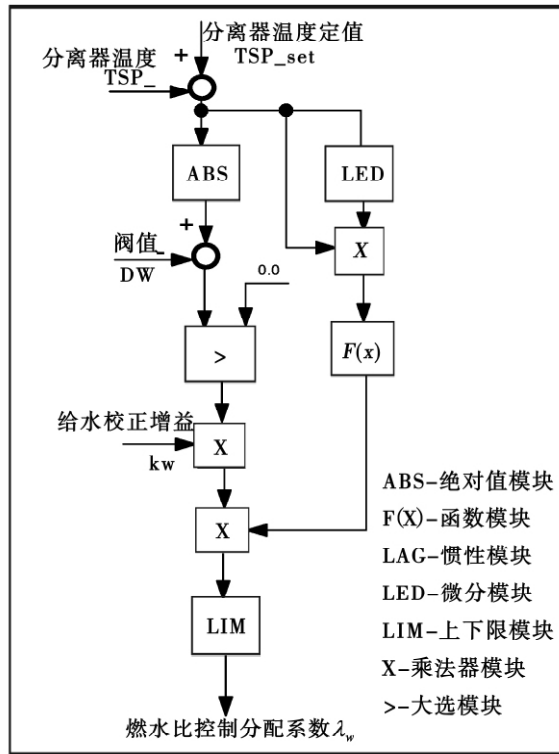


图 3 燃水比控制分配系数的计算回路  
Fig. 3 Loop for calculating the fuel-water ratio control distribution coefficient

(2) 当分离器温度偏差大于某一阈值时,即  $\Delta T > DW$  时,给水侧校正回路开始投入,弥补燃料侧调节响应慢的缺点,控制汽温偏差在合理范围内;

(3) 当中间点温度差

$\Delta T \geq DW + \frac{1}{Kw * F(LED(\Delta T) * \Delta T)}$  时,  $\lambda_w$  始终为 1,燃水比校正作用完全由给水侧完成;

(4) 在考虑中间点温度偏差的同时,还参考偏差的变化趋势:

若温度差和温度差的变化率的乘积  $LED(\Delta T) * \Delta T$  为正,说明温度差有逐步扩大的趋势,则给水侧校正回路提前投入,相应增加  $\lambda_w$ ;

(5) 若温度差和温度差的变化率的乘积  $LED(\Delta T) * \Delta T$  为负,说明温度差有逐步收敛的趋势,相应减少  $\lambda_w$ ,削弱给水侧校正强度,防止过调。

燃水比控制分配系数计算后,燃料量指令和给水流量指令修改量的控制方案如图 4 所示。

考虑到分离器温度的变化过程是一个大滞后的被控过程,为了提高分离器温度的控制性能,控制方案的反馈回路均采用了广义预测控制器 GPC。

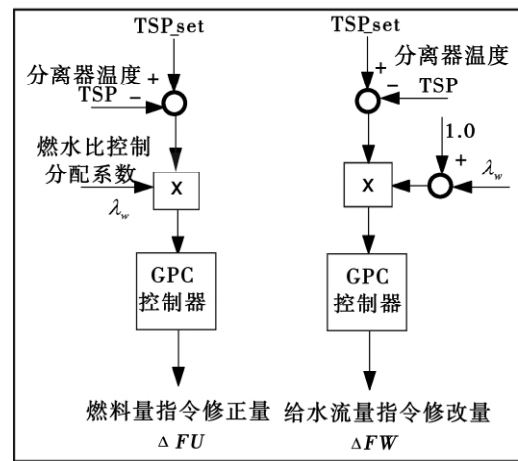


图 4 燃料量指令和给水流量指令修改量的控制方案

Fig. 4 Scheme for controlling the fuel amount and feedwater flow rate modified by using instructions

### 1.3 基于神经网络学习的控制参数和运行工况的自适应调整

对于大型超超临界火电机组复杂的控制对象,更由于国内电厂煤种多变、执行设备质量差的运行特点,整个 AGC 协调被控对象的模型存在非常明显的时变性和非线性特征。在控制策略设计中,若只采用单一静态模型,则无法面对电厂复杂的实际运行环境,控制系统长期投用的性能无法得到保证。为此,本研究采用智能神经网络学习技术,不断动态调整控制系统的特性参数和部分机组设定参数,一方面使控制系统性能始终保持最佳,另一方面也使机组运行工况不断向最经济状态逼近。

#### 1.3.1 控制系统模型及控制参数的自适应机制

采用如下方法校正机组被控模型中的重要参数:

(1) 实时拟合机组真空——汽耗率的函数关系,从而保证锅炉指令——给水指令的前馈/反馈通道的静态增益始终与实际工况保持一致;

(2) 实时拟合机组功率——燃料量的函数关系,从而保证锅炉指令——燃料指令的前馈/反馈通道的静态增益始终与实际工况保持一致;

(3) 通过每次典型升、降负荷时燃料量变化后的实际负荷、主汽压力变化情况,实时计算制粉系统惯性模型的参数,并以此为依据调整机组主汽压力的预测模型和 GPC 预测控制器参数,使控制系统的对象滞后模型与锅炉实际滞后特性保持一致;

通过上述技术的应用,整个控制系统将始终处

于在线学习的状态,控制性能不断向最优目标逼近。

### 1.3.2 机组工况的自适应调整

超超临界机组中间点温度(通常是汽水分离器出口温度)的设定值是决定机组运行状况的重要参数,在原DCS协调设计中,该设定值仅是分离器压力的静态函数,在机组煤质、磨组合、工况改变时,该函数必然将偏离实际运行工况,从而导致机组不能运行在最经济的工况点上。

为解决上述问题,本研究设计了中间点温度设定值的智能动态校正策略,主要规律如下:

首先根据机组运行的历史数据,通过滚动优化拟合出基本的“分离器压力、磨煤机组合、燃料热值——过热度”的多元函数关系;

在机组日常运行中,按照如下规律(优先级从上至下递减)动态调整过热度设定值,尽可能使机组运行在最合理、经济性最高的模式下:

- (1) 调整过热度,使机组主汽温能达到设定值;
- (2) 调整过热度,使机组再热汽温能达到设定值,同时再热减温水量尽量为零;
- (3) 调整过热度,使机组的过热减温水量随负荷点的不同维持在合理数值;

通过上述技术的应用,可使机组自动调整工况,始终运行在最合理、经济的模式下。

## 2 优化控制系统的实施方式

本工程选用了“INFIT”优化控制系统作为优化控制策略现场实施的软硬件平台。“INFIT”控制系统采用MODBUS通讯方式与DCS系统交换数据,从而以类似扩展DPU的方式接入到DCS中,完成实际的优化控制功能。

### 2.1 优化系统的软、硬件平台

硬件方面 “INFIT”实时优化控制系统选用 Siemens S7 系列 PLC 为硬件平台,系统采用“双冗余电源 + CPU 模块 + modbus 通讯模块”的硬件配置。

软件方面:在 Siemens Step7 编程环境中采用 SCL、STL 语言开发了所有的高级算法模块,并通过面向对象的封装技术,建立了类似一般 DCS 系统的组态函数库(但功能更为强大),之后可通过函数调用以类似 DCS 组态的方式完成具体机组负荷性能优化工程的建立。

### 2.2 采用独立硬件平台的优点

“INFIT”系统采用这种独立于 DCS 系统的硬件平台,具有如下优点:

(1) DCS 只能实现常规的 PID 控制,控制性能有明显的局限性;而“INFIT”优化装置可实现任何先进的控制算法,是应用先进的现代控制技术来解决火电机组疑难控制问题的必备平台;

(2) 采用“INFIT”后,整个优化控制系统的调试过程十分简单,由于不需要在 DCS 中反复在线下载控制组态,调试过程中机组的安全性大大提高,完全避免了由于下载不当而导致机组跳机事故的发生;

(3) “INFIT”是作为一个扩充的分散处理单元融入到整个 DCS 系统中,运行人员的操作方式保持不变;

(4) 采用“INFIT”后,无需改变原有 DCS 中的控制策略,运行人员可方便地在原有控制方案和新的优化控制方案之间无扰动地切换,增加了系统的灵活性和安全性。

## 3 现场应用效果

本研究所设计的控制方案均已通过“INFIT”实时优化平台成功实施于中电投景德镇发电厂 1 号、2 号机组。图 5 和图 6 分别是机组以 12MW/min 速率进行变负荷试验的运行曲线。变负荷中的各项控制指标列于表 1。

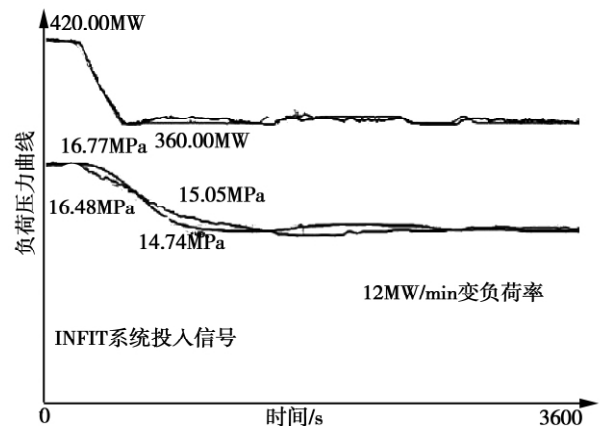


图 5 12 MW/min 变负荷运行曲线 1

Fig. 5 Load-variation operation curve No. 1 at a speed of 12 MW/min

结合图 4、5 以及表 1 的数据可以看出,应用新型先进控制策略后,机组变负荷率由原先的 5 MW/min 提高至 12 MW/min,并且在变负荷过程中控制性能非常优秀,各项指标均远优于国家行业标准。

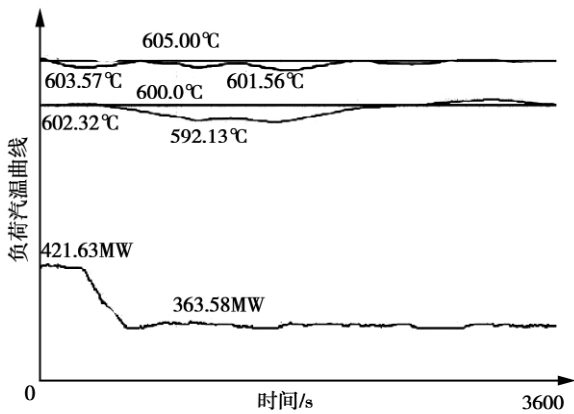


图 6 12 MW/min 变负荷运行曲线 2

Fig. 6 Load - variation operation curve No. 2 at a speed of 12 MW/min

表 1 12 MW/min 速率降负荷试验数据

Tab. 1 Load reduction test data at a speed of 12 MW/min

项目	设定值	实际值		考核值
		最大正偏差	最大负偏差	
变负荷率 /%	2.0	1.90		> 1.5
变负荷初始纯延时 /s	N/A	< 20		< 90
负荷动态偏差 /%	N/A	< 1.5		< 1.5
负荷稳态偏差 /%	N/A	< 0.5		< 0.5
主汽压力 /MPa	滑压	0.31	-0.29	< ±0.5
主汽温度 /°C	605	0.0	-3.4	< ±10
再热汽温度 /°C	600	2.3	-7.9	< ±12

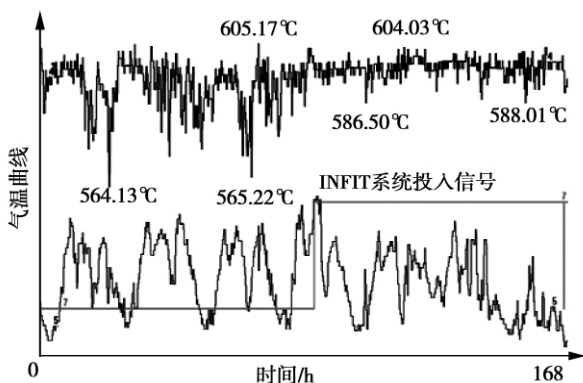


图 7 投用新型控制策略前后的主汽温度控制对比

Fig. 7 Comparison of the main steam temperature control before and after new control tactics have been put into use

图 7 是投用新型 INFIT 协调控制系统前后一周时间内机组主汽温度的运行曲线。其中前 3.5 天投

用原 DCS 协调控制,可以看出主汽温度波动幅度很大,最低可达 564°C;后 3.5 天投用新型 INFIT 协调控制,主汽温度控制明显稳定的多。从新型控制系统投用前后的对比也可以看出平均主汽温度提升非常明显。根据电厂 SIS 数据统计,投用 INFIT 协调后,1 号、2 号机组的主、再热平均汽温均提高约 5°C,机组的运行经济性获得极大的提高。

#### 4 结 论

本研究所提出的大型火电机组 AGC 优化控制策略,依靠先进的“INFIT”实时优化控制平台,成功实现了锅炉主控回路的预测控制技术、燃水比控制中的新型解耦技术、控制模型参数和机组工况的自适应调整等多种先进控制技术,使机组协调控制系统性能得到明显提高。在中电投景德镇发电厂 1 号、2 号机组上的实际应用中表明,在“INFIT”新型优化系统控制下,机组运行稳定,各项考核指标均符合要求,为厂里带来了明显的经济效益。并且由于“INFIT”系统的独立性和与 DCS 的完美融合性,使其具有非常好的推广前景。

#### 参考文献:

- [1] KWU LPSC Technology Center. PROFI Unit Coordinated Control System [R]. Siemens AG 2000.
- [2] 张铁军,吕剑虹,华志刚. 机炉协调系统的模糊增益调度预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 158-165. ZHANG Tie-jun, LÜ Jian-hong, HUA Zhi-gang. Fuzzy gain dispatching predictive control of a boiler-turbine coordinated system [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2005, 25(4): 158-165.
- [3] 吕剑虹. 预测控制在热工过程控制中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 1990. LU Jian-hong. Study of applications of the predictive control in the thermal process control [D]. Nanjing: Southeast University, 1990.
- [4] 姚峻,高磊,陈维和,等. 900 MW 超临界机组协调控制及 AGC 策略的研究与应用[J]. 中国电力, 2005, 38(8): 62-65. YAO Jun, GAO Lei, CHEN Wei-he, et al. Coordinated control of a 900 MW ultra-supercritical unit and study and applications of AGC strategies [J]. China Electric Power, 2005, 38(8): 62-65.
- [5] 吴波,吴科,吕剑虹. 一种补偿递归模糊神经网络及其学习算法[J]. 中国科学(F 辑), 2009, 39(7): 694-703. WU Bo, WU Ke, LU Jian-hong. A compensation-based regression fuzzy neural network and its learning algorithm [J]. China Science (F edition), 2009, 39(7): 694-703.
- [6] 张志勇,陈钢,邱文超. 基于现代控制技术的 AGC 实时优化控制系统及其应用[J]. 华东电力, 2011, 39(1): 153-156. ZHANG Zhi-yong, CHEN Gang, QIU Wen-chao. AGC real-time optimization control system based on modern control technology and its applications [J]. East China Electric Power, 2011, 39(1): 153-156.

head ,efficiency and rotating speed etc. of various pumps under different operating conditions being derived. Through a case of a 300 MW engineering project ,the authors have conducted a safety and energy-saving analysis of the version proposed ,thus it is proved that the version under discussion is feasible and necessary. **Key words:** heating-power cogeneration ,feedwater system ,sliding pressure operation ,variable speed regulation ,water pump cavitation

先进预测控制在超超临界机组机炉协调系统上的应用 = **Application of an Advanced Predictive Control in Turbine-boiler Coordination Systems Destined for Ultrasupercritical Units** [刊 ,汉] FANG Ji-ji ( Jingdezhen Power Plant ,Jiangxi Electric Power Co. Ltd. ,China Electric Power Investment Corporation ,Jingdezhen ,China ,Post Code: 333000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(4) . - 381 ~ 385

In the light of such problems as low load variation speed ,large fluctuation of the main control parameters and excessively low temperature of the main reheat steam existing in a 660 MW ultrasupercritical unit of Jingdezhen Power Plant owned by China Electric Power Investment Corporation ,presented was an advanced solution to modern large-sized ultrasupercritical units adopting AGC control by organically fusing the predictive control technology and neural network learning technology with the self-adaptive control technology. By utilizing a INFIT ( a PLC-based advanced thermodynamic control and application platform) real-time optimization control system ,the control scheme above-mentioned was successfully accomplished on the spot. The practical application in the units shows that to use INFIT platform to realize the advanced control technology can obviously improve the load regulation performance ,operation stability and average main and reheat steam temperatures of the units ,thus enhancing in a comprehensive way the safety and cost-effectiveness of the units as a whole. **Key words:** ultrasupercritical unit ,automatic power generation control ( AGC) ,predictive control ,self-adaptive control ,fuel/water ratio

Super304H 钢高温蒸汽氧化研究 = **Study of the Oxidation of Super304H Steel Caused by Steam at a High Temperature** [刊 ,汉] LI Xue-dong ,WANG Shu-zhong ( College of Energy Source and Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) ,LIN Wen ( Thermochemical Technology Engineering Research Institute ,Wuhan Kaidi Engineering Technology Research Academy Co. Ltd. ,Wuhan ,China ,Post Code: