

# 宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术

刘永红, 李珂

(大唐西北电力试验研究院, 陕西 西安 710065)

**[摘要]** 实际发电机组常处于变工况运行, 工况改变前设置的 PID 控制器参数的控制效果无法满足工况改变后的控制要求, 出现控制系统调节能力变差的问题。为了提升变工况下机组的控制品质, 本文提出宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术, 通过过零点判断逻辑及选取并保持最值逻辑, 自辨识变参数动态修正 PID 控制器的比例参数, 对 PID 控制器的比例作用进行在线、实时、动态调整及优化, 自动寻找最优控制参数。将该技术应用在某 660 MW 机组的锅炉主控 PID 的比例项中, 应用结果表明, 宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术能够更好地调节变负荷过程中主蒸汽压力的变化, 动态调整比例参数, 实现主蒸汽压力的良好控制。说明该技术能够提高变工况下控制器的调节品质, 增强机组的自动控制水平。

**[关键词]** 控制系统; 宽负荷; 变工况; PID 控制; 比例系数; 自适应; 控制效果

**[中图分类号]** TP2 **[文献标识码]** B **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfed.202004093

**[引用本文格式]** 刘永红, 李珂. 宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 144-149. LIU Yonghong, LI Ke. PID proportional adaptive active optimization technology in wide load interval[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 144-149.

## PID proportional adaptive active optimization technology in wide load interval

LIU Yonghong, LI Ke

(Datang Northwest Electric Power Test & Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The actual power generating units are often running under variable operating conditions. When the operating condition of the unit changes, the control effect of PID controller parameters set before the working condition changes cannot meet the control requirements under the current working condition, and the regulation ability of the control system is becoming weak. To improve the control quality of the unit under variable working conditions, this paper proposes a PID proportional adaptive active optimization technology in wide load interval. Through zero-crossing judgment logic and selecting and maintaining the maximum/minimum value logic, self-identifying variable parameters to dynamically modify the proportional parameters of the PID controller, the proportional function of the PID controller is adjusted and optimized online, real-time and dynamically, and the optimal control parameters are automatically searched. This technique is applied to the proportion of boiler master control PID, and the application result shows that, this PID proportion adaptive active optimization technology in wide load range can better adjust the change of main steam pressure, dynamically regulate the proportional parameters, and realize good control of main steam pressure. It can improve the control quality of the controller and enhance the automatic control level of the unit under variable working conditions.

**Key words:** control system, wide load, variable working condition, PID control, proportionality coefficient, self-adaptation, control effect

近年来, 随着新能源发电技术的不断成熟, 火电机组参与深度调峰的性能要求越来越高。在机组快速响应负荷变化过程中, 机组主蒸汽压力、主蒸汽温度、炉膛负压、总风量等参数波动剧烈。这种经常打破各控制参数之间的平衡、改变机组稳定工

况的状态, 对火电机组控制系统的调节品质产生了严重影响。一旦机组原控制参数之间的平衡状态被打破, 在原工况下设置的 PID 控制器比例参数将不适用于现有工况, 在原工况下调节品质优良的控制器的控制效果达不到工况改变后控制系统的调

修回日期: 2020-06-16

第一作者简介: 刘永红(1971), 男, 高级工程师, 主要研究方向为协调控制系统优化、AGC 及一次调频优化设计, 778475287@qq.com。

节品质。基于此，本文提出宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术，该技术通过自辨识、主动、动态修正 PID 控制器的比例参数，对 PID 控制器的比例作用进行在线、实时、动态调整及优化，主动寻找当前运行工况下最优比例控制参数，从而提高控制器的调节品质，增强机组的自动控制水平<sup>[2]</sup>。

### 1 基本原理

宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术利用比例参数自动升逻辑、比例参数自动降逻辑实现对 PID 比例参数的自主、动态调整与优化，使得控制参数在任何工况下始终处于最优状态，实时对控制系统的比例参数强弱进行在线监测。当判断出控制器比例参数过强、过弱时，及时调整比例参数，无扰动地调节控制系统控制品质，不断自动寻优不同工况下的比例参数，保证控制系统的控制效果一直处于最优状态<sup>[3]</sup>。宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术方案为：

1) 通过对设定值、测量值、测量值的滞后值三者之间的曲线特性进行分析，结合曲线过零点特征，研究并设计参数过零点判断逻辑，并具体判断为正向过零点和负向过零点两者情况；

2) 通过对测量值典型曲线分区示意图的研究和分析，通过选取并保持最小值逻辑、选取并保持最大值逻辑选择某段区域内测量值的最小值和最大值，进而通过比例参数自动降逻辑、比例参数自动升逻辑触发比例系数修正逻辑，对控制系统的比例作用进行自主、动态调整<sup>[4]</sup>。

宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术工作原理为：通过过零点判断逻辑，在测量值正向过零点或者负向过零点的时候，通过比例作用强判断逻辑、比例作用弱判断逻辑对比例作用的强弱进行判断，通过判断的结果触发比例作用自动升逻辑、比例作用自动降逻辑，对比例参数自主、实时、动态修正<sup>[5]</sup>。

### 2 辅助判断技术方法

#### 2.1 过零点判断逻辑

某一控制系统的测量值与设定值相减，两者的差值在一个足够小的偏差范围内时，可以认为两者的差值为零，说明此时测量值通过零点。

过零点判断逻辑分为正向过零点和负向过零点<sup>[6]</sup>。以正向过零点逻辑为例具体说明，正向过零

点的限定条件为：1) 测量值曲线经过零点；2) 测量值速率变化为正判断为正向变化。图 1 为测量值过零点判断逻辑，根据图 1，过零点判断逻辑的实现方法如下。

1) 测量值曲线经过零点 测量值通过 SUM2 减去设定值，两者的差值经过 H/L 高低限幅模块、取非模块 N 后，如果两者差值在 ±0.05 范围内，说明测量值此时正在经过零点；

2) 测量值正向变化判断 经过 LEADLAG 滞后的测量值（被减数）与测量值两者求差，差值大于高限模块 H/设定值 0.1 时输出 1，表明测量值曲线正向变化。实际上，该逻辑通过微分作用求取测量值的变化率，通过变化率的正、负值判断测量值的变化方向。

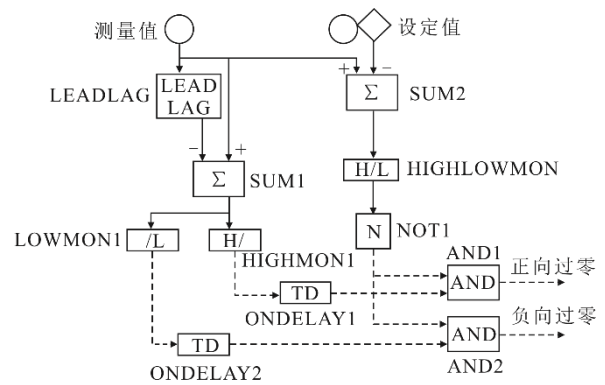


图 1 测量值过零点判断逻辑  
Fig.1 The judgment logic of measurement value crossing zero point

图 2 为过零点示意。由图 2 可见，测量值曲线经过零点时，测量值和设定值近似相等，两者差值在足够小的偏差范围内。

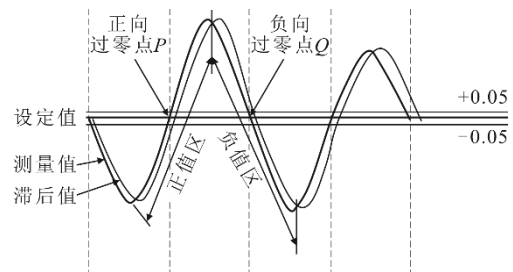


图 2 过零点示意  
Fig.2 Schematic diagram of zero crossing

正向过零点说明测量值在经过零点时，测量值由低值向高值变化。图 2 中 P 点为正向过零点，Q 点为负向过零点<sup>[7]</sup>。

### 2.2 选取并保持最值逻辑

图 3 为测量值典型曲线分区示意，图 3 中的几个特性点命名：“0”为正向过零点，“1”为正向最大值，“2”为负向过零点，“3”为负向最小值<sup>[8]</sup>。根据测量值相对设定值的变化过程，将 1 个典型波动的测量值曲线分为一区、二区、三区、四区 4 个特性区域。其中，一区为正值增长区，二区为正值衰减区，三区为负值衰减区，四区为负值增长区，上述 4 个区测量值波动为 1 个周期。

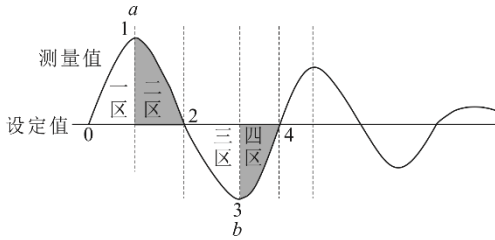


图 3 测量值典型曲线分区示意

Fig.3 Schematic diagram of typical curve partition of the measured values

选取并保持最值逻辑包括选取并保持最大值逻辑和最小值逻辑，用以实现比例作用自动升逻辑及比例作用自动降逻辑。本文以选取并保持最大值逻辑为例具体说明。

选取并保持最大值逻辑主要记录某一时刻的最大值并保持，直到下一时刻出现比上一时刻更大的值，此时清除上一时刻的值，记录并保持当前时刻更大的数值，依次类推，经过 1 个完整的波形后，输出该段波形内的最大值。

图 4 为最大值选择逻辑。由图 4 可见，选取并保持最大值逻辑实现过程为：正向过零信号通过脉冲块 TP、延迟块 TD 后，触发选择块 T，输出 Y 路测量值的当前值，通过高值选择块“>”对 Y 路输出的当前值与测量值进行比较，取两者的大值输出。在正向过零信号触发时间内，Y 路输出的当前值等于测量值，亦等于设定值，因此该时刻输出为设定值。当正向过零信号消失后，选择功能块 T 通过 N 路选择上一时刻高值选择块的输出值，高值选择块对上一时刻高值选择块的输出值与当前测量值比较后，选取两者较大值输出，从而实现始终输出测量值的最大值。

根据图 3 所示，当正向过零信号消失后，在一区，由于测量值不断变大，经过高值选择模块输出的值不断增大，直至到达 1 点，即最高点 a，此时高值选择模块输出 a 点值并保持；之后曲线进入二

区，由于测量值不断减小，此时高值选择块输出 a 点值保持不变，在后续的二区和四区，高值选择模块一直保持输出最大值 a 点值不变<sup>[9]</sup>。

选取并保持最小值逻辑与此类似。

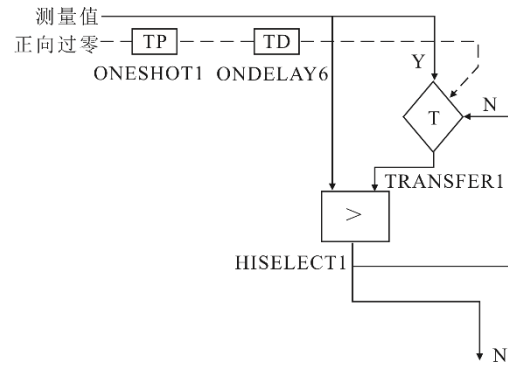


图 4 最大值选择逻辑

Fig.4 The logical graph for maximum value selection

### 3 宽负荷区间 PID 比例系数自动寻优逻辑

经过过零点判断逻辑、选取并保持最大值逻辑、选取并保持最小值逻辑对现场采集数据的分析及处理后，根据比例自动作用的升、降判断逻辑，对宽负荷区间 PID 比例系数进行在线动态实时修正与优化<sup>[10-11]</sup>。

图 5 为扰动波动曲线。图 5 中  $\left| \frac{a}{b} \right|$  可以反映比例作用的强弱，当  $\left| \frac{a}{b} \right|$  大于设定的阈值时，认为比例作用过大；当  $\left| \frac{a}{b} \right|$  小于设定的阈值时，认为比例作用过小。根据自动控制系统稳定性原理，同时兼顾比例作用的控制效果，一般当  $\left| \frac{a}{b} \right| > \frac{4}{0.8}$  时，认为比例作用较大，需要适当减小比例作用；当  $\left| \frac{a}{b} \right| < \frac{4}{2}$  时，则认为比例作用较小，需要适当放大比例作用<sup>[12]</sup>。

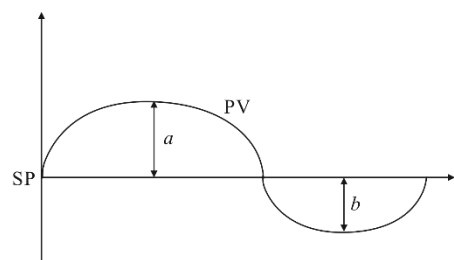


图 5 扰动波动曲线示意

Fig.5 The disturbance fluctuation curve

### 3.1 比例作用自动降逻辑

图 6 为触发比例降逻辑示意。条件①测量值正向过零点和条件②DIVIDE1 数值大于 HIGHMON3 模块设定的阈值同时满足后，触发比例作用自动降逻辑。

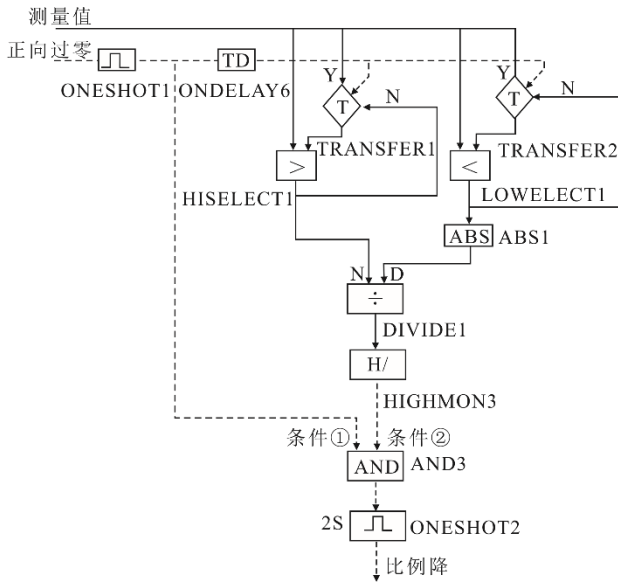


图 6 比例降逻辑触发

Fig.6 The trigger diagram of proportional drop logic

由图 6 可见，通过最大值选择逻辑和最小值选择逻辑后，所选取的最大值与最小值，为 1 个周期内的 2 个最值，最大值 $+a$ ，最小值 $-b$ ，依据自动控制原理， $\left| \frac{+a}{-b} \right|$ 的值  $c$  能够反映比例作用的强弱。据此设定“高选模块”，此处设定当  $c$  值大于 5 时，条件②满足并输出。如图 7 所示，HISELECT1 块选择并输出的最大值送入除法块的 N 端，LOWSELECT1 块选择并输出的最小值取经 ABS1 块取绝对值后送入除法块 D 端，对 N 端的值与 D 端的值做除法运算，两者的商送入 HIGHMON3 块进行高值报警模块判断，当大于设定值时，条件②满足触发<sup>[13]</sup>。测量值曲线“正向过零点”时，当条件①满足时，触发 2S 脉冲。条件①的另一个作用为：当测量值在触发下一个“正向过零点”时，测量值已经经过 1 个周期，在“正向过零点”时触发比例降逻辑，对比例作用  $P$  值进行修改，此时由于设定值与测量值近似相等，因此对系统造成的扰动最小，实现无扰动优化。当条件①和条件②均满足，说明 PID 自动控制参数比例作用 ( $P$ ) 偏强，AND3 条件满足，比例降信号触发。

### 3.2 比例作用自动升逻辑

比例作用自动升逻辑的触发有 2 个条件，当任意一个条件满足后，触发比例增作用，对自动控制系统进行调节。图 7 为触发比例升逻辑示意。

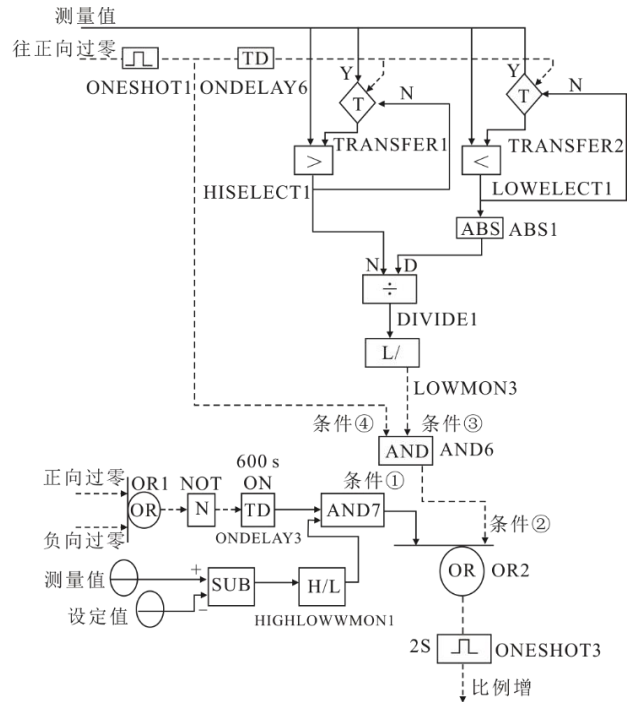


图 7 比例升逻辑触发

Fig.7 The trigger diagram of proportional increase logic

条件①触发比例作用升的逻辑为：在 600 s 内，自动寻优逻辑未检测到测量值的曲线通过正向过零点或者负向过零点，且当测量值与设定值的偏差大于或小于 HIGHLOWMON1 高低限幅模块上限值或下限值时，说明当前的控制器参数对控制系统的调节能力偏弱，需要触发比例升逻辑<sup>[14]</sup>。

当条件③、条件④同时满足时，条件②满足，触发比例升逻辑：

当条件③通过上述最大值选择逻辑、最小值选择逻辑所选取的最大值与最小值，恰为类似于正弦曲线 1 个周期内的 2 个最值，即最大值 $+a$ ，最小值 $-b$ ，依据自动控制原理， $\left| \frac{+a}{-b} \right|$ 的值能够反映比例作用的强弱，据此设定“低选模块”，此处设定当 $\left| \frac{+a}{-b} \right|$ 的值小于设定值 2 时，条件③满足并输出。同时当测量值曲线正处于“正向过零点”时，触发一个 2S 脉冲，此时条件④满足，在“正向过零点”时触发比例升逻辑，对比例作用比例系数进行修改，修改比例系数对控制系统造成的扰动最小，能够实现无扰动优化。

### 3.3 比例系数修正逻辑

图8为比例系数修正逻辑。由图8可见,当比例升脉冲信号触发时,切换块 TRANSFER3 的 Y 路导通,切换值 0.1 叠加进  $\Sigma$  模块 SUM6,对原有的比例系数  $k$  加上常数 0.1,从而增强比例作用,比例升信号每触发 1 次,比例系数  $k$  增加 0.1,直到系统稳定,比例升信号停止触发。当比例降脉冲信号触发时,切换块 TRANSFER4 的 Y 路导通,切换值 0.1 乘以  $-1$  后叠加进  $\Sigma$  模块 SUM6,对原有的比例系数  $k$  减去常数 0.1,从而减弱比例作用,比例降信号每触发 1 次,比例系数  $k$  减少 0.1,直到系统稳定,比例降信号停止触发。

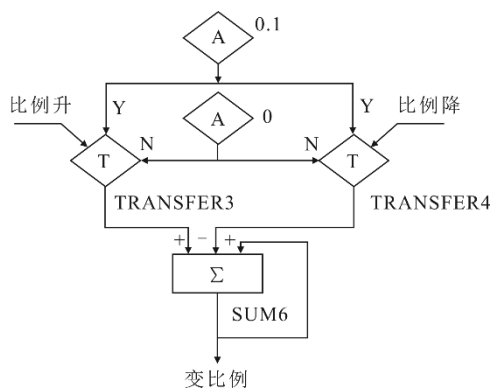


图8 比例系数修正逻辑

Fig.8 The proportional coefficient correction logic

## 4 扰动试验

为验证宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术的实际应用效果,对某 600 MW 机组进行变负荷扰动曲线试验。图9为应用宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术优化前,350~430 MW 升负荷扰动曲线。由图9可见,在变负荷过程中,主蒸汽压力最大动态偏差为 1.45 MPa,最大稳态偏差为 0.66 MPa,调节品质较差。

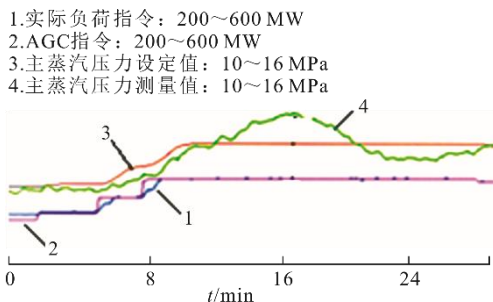


图9 优化前变负荷扰动曲线

Fig.9 The variable load disturbance curve before optimization

图10为应用宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术优化后 280~350 MW 升负荷扰动曲线。由图10可见,在变负荷过程中,主蒸汽压力最大动态偏差为 0.45 MPa,最大稳态偏差为 0.16 MPa。优化前曲线图10中,为了快速响应负荷指令、滑压曲线的变化,锅炉主控 PID 根据既定的比例参数不断调节燃料量,无法根据运行工况的变化优化自身比例参数,加之主蒸汽压力控制系统的大惯性特性,当主蒸汽压力实际值超过主蒸汽压力设定值时,实际加入系统的燃料量早已大于系统所需要的燃料量,造成变负荷结束后主蒸汽压力超压。宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术可以根据工况的改变自主寻找最适合目前运行工况的控制参数,更好地调节变负荷过程中主蒸汽压力的变化,根据机组实际运行工况,动态调整比例参数,从而实现主蒸汽压力的良好控制,避免过调、欠调现象的发生,主蒸汽压力能够在《火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程》(DL/T 657—2015)所规定的要求内变化<sup>[15]</sup>。

- 1.实际负荷指令: 200~600 MW
- 2.AGC指令: 200~600 MW
- 3.主蒸汽压力设定值: 10~16 MPa
- 4.主蒸汽压力测量值: 10~16 MPa

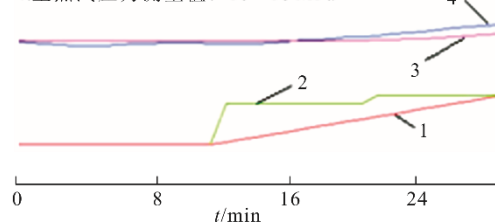


图10 优化后变负荷扰动曲线

Fig.10 The variable load disturbance curve after optimization

## 5 结 语

宽负荷区间 PID 比例自适应主动寻优技术通过自辨识、变参数动态修正 PID 控制器的比例增益,从而对 PID 控制器的比例作用进行在线、实时、动态调整及优化,在不需要人工干预的情况下,通过 1 套完整的控制逻辑自主对控制参数进行修正及整定,提升控制系统的响应速率,提高控制系统的控制精度及调节品质,增加了火电机组的经济效益,适用于智慧电厂智慧化控制的需求,具有广阔的应用前景。

### [参考文献]

- [1] 朱晓星, 寻新, 王伯春. 国产超临界 600 MW 机组主要自动调节系统控制优化[J]. 热力发电, 2008, 37(4): 68-70.  
ZHU Xiaoxing, XUN Xin, WANG Bochun. Control optimization of main automatic regulating systems for

- home-made supercritical 600 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(4): 68-70.
- [2] 秦成果. 蒙华海电 2×200 MW 机组协调控制系统介绍[J]. 内蒙古电力技术, 2003(7): 63-67.  
QIN Chengguo. Coordination control system for 2×200 MW units in Menghua Haibouwan Power Station[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2003(7): 63-67.
- [3] 肖寒, 马平, 刘建国. 300 MW 机组 MCS 系统优化设计及应用[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2009, 14(4): 11-13.  
XIAO Han, MA Ping, LIU Jianguo. Optimization design and application of MCS system in 300 MW unit[J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2009, 14(4): 11-13.
- [4] 张鲁凡, 谢克明. 河津电厂火电机组协调控制系统负荷摆动试验研究[J]. 山西电力, 2005(3): 27-29.  
ZHANG Lufan, XIE Keming. Research of experiment on automatic power control in Hejin Power Plant[J]. Shanxi Electric Power, 2005(3): 27-29.
- [5] WANG C S, KIM D W. A design of robust two-degree-freedom boiler-turbine control system using h-infinity optimization method[C]//Proceedings of the 34th Sice Annual Conference: International Session Papers. USA: Society of Instrument and Control Engineers, 1995: 1263-1268.
- [6] 韩忠旭, 黄焕袍, 张智, 等. 基于状态观测器的状态反馈控制在300 MW单元机组协调控制系统中的应用[J]. 中国电力, 2004, 37(4):60-65.  
HAN Zhongxu, HUANG Huanpao, ZHANG Zhi, et al. Application of state feedback based on state observer in the coordinated control system of 300 MW unit plant[J]. Electric Power, 2004, 37(4): 60-65.
- [7] YIN L, XU Q, WEN Z, et al. Analysis of primary air fan run-back in 1 000 MW ultra supercritical coal fired generation unit[C]. Power & Energy Engineering Conference. IEEE, 2012.
- [8] GIRI F, ROCHDI Y, BROURI A, et al. Parameter identification of Hammerstein-like systems containing backlash operators with arbitrary-shape parametric borders[J]. Automatica, 2011, 47(8): 1827-1833.
- [9] 黄红艳, 陈华东. 600 MW 机组超临界直流锅炉的控制策略[J]. 热力发电, 2006, 35(5): 44-46.  
HUANG Hongyan, CHEN Huadong. Control strategy of super critical once-through boiler for 600 MW units[J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(5): 44-46.
- [10] 罗德柱, 马宪民, 卢文科. 600 MW 机组协调控制系统分析[J]. 热力发电, 2006, 35(10): 35-39.  
LUO Dezhu, MA Xianmin, LU Wenke, et al. Analysis of 600 MW unit coordinated control system[J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(10): 35-39.
- [11] SON W K, KWON H K. Control of nonlinear systems via feedback linearization and constrained model predictive control[C]//Proceedings of the 14th Triennial World Congress, Beijing, 1999: 103-108.
- [12] 杨凯翔. 超临界机组控制特性和控制策略分析[J]. 中国电力, 2007, 40(7): 74-78.  
YANG Kaixiang. Control characteristics and its strategy analysis of supercritical units[J]. Electric Power, 2007, 40(7): 74-78.
- [13] LIU H B, LI S Y, CHAI T Y. Control of power-plant main steam pressure and power output based on fuzzy reasoning and auto-tuning[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 2003: 1395-1400.
- [14] YU D R, XU Z J. Nonlinear coordinated control of drum boiler power unit based on feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(1): 204-210.
- [15] 王伯春, 寻新, 朱晓星, 等. 600 MW 超临界机组 MCS 系统控制策略分析[J]. 湖南电力, 2008, 28(4): 15-19.  
WANG Bochun, XUN Xin, ZHU Xiaoxing, et al. Analysis of MCS control strategy in 600 MW supercritical unit[J]. Hunan Electric Power, 2008, 28(4): 15-19.

(责任编辑 杜亚勤)