

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.04.005

控制器参数对 AGC 调节性能的影响

Influence of controller parameters on AGC regulation performance

曹子飞¹, 杨栋¹, 吴茂坤¹, 王友龙¹, 潘凤萍², 吴振龙^{3*}

CAO Zifeng¹, YANG Dong¹, WU Maokun¹, WANG Youlong¹, PAN Fengping², WU Zhenlong^{3*}

(1. 华电莱州发电有限公司, 山东 烟台 261441; 2. 南方电网电力科技股份有限公司, 广州 510080; 3. 郑州大学
电气工程学院, 郑州 450001)

(1. Huadian Laizhou Power Generation Company Limited, Yantai 261441, China; 2. China Southern Power Grid Technology
Company Limited, Guangzhou 510080, China; 3. School of Electrical Engineering,
Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

摘要:构建新型电力系统,需要吸纳大规模的风能、光伏等新能源,自动发电控制(AGC)要求燃煤机组负荷响应同时满足调节速率、调节精度与响应时间的要求。为进一步提高 AGC 的调节性能,分析了直接能量平衡(DEB)控制结构下控制器参数对 AGC 调节性能的影响。介绍了调节速率、调节精度与响应时间 3 个 AGC 性能指标,并给出了计算方法;分析上述指标的影响因素,并对协调控制系统(CCS)的耦合性、非线性等控制难点进行分析。结合 DEB 控制结构,在已经优化的控制器参数基础上,通过单一变量法分析控制器参数对上述性能指标的影响。仿真结果表明:功率回路的比例和积分增益以及主蒸汽压力回路的比例增益与 AGC 调节性能指标具有明显的关联性。为提高 AGC 调节性能,可以适度增加功率回路的比例增益、功率回路的积分增益以及主蒸汽压力回路的比例增益。上述结论为提高 AGC 调节性能下的燃煤机组控制器参数优化提供了方向性指导,具有较强的工程实践潜力。

关键词:自动发电控制;调节速率;调节精度;响应时间;控制器参数;直接能量平衡;新型电力系统;新能源

中图分类号:TK 39; TM 611; TP 13

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2022)04-0036-07

Abstract:To consume more wind power and PV power, Automatic Generation Control (AGC) makes stricter requires on regulation speed, regulation accuracy and coal-fired units' load response time simultaneously. In order to further enhance the regulation performance of AGC, the influence of controller parameters on the regulation performance of AGC under the Direct Energy Balance (DEB) control structure is analyzed. Firstly, three performance indexes of AGC, regulation rate, regulation accuracy and response time, and their calculation methods are introduced. Analyzing the influencing factors of the indexes above, the control difficulties such as coupling and nonlinearity of the Coordinated Control System (CCS) are summarized. Based on the DEB control structure and optimized controller parameters, the influences of controller parameters on the regulation rate, regulation accuracy and response time are analyzed by single variable method. Simulation results show that the proportional and integral gains of the power loop and the main steam pressure loop have significant correlation with AGC regulation indexes. In order to improve the AGC regulation performance, the proportional gain of the power loop, the integral gain of the power loop and the proportional gain of the main steam pressure circuit can be moderately increased. The conclusions provide direction guidance for controller parameter optimization to enhance the regulation performance of AGC, and which are promising in engineering practices.

Keywords: AGC; regulation speed; regulation precision; response time; controller parameters; direct energy balance; new power system; new energy

0 引言

“双碳”目标下构建新型电力系统,会有风能、

光伏等新能源大规模并入电网,燃煤机组需要通过快速响应的自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)指令来吸纳大规模新能源^[1]。为了衡量机组 AGC 响应过程中的性能,目前国内采用 AGC 调节性能指标对参与 AGC 的机组进行考核^[2]。AGC 调节性能指标主要包括调节速率、调节精度和响应时间,三者均有明确的定义和计算方法。

收稿日期:2021-07-23;修回日期:2021-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52106030);河南省科技攻关项目(212102311052);电力系统国家重点实验室资助课题(SKLD21KM14)

许多学者已对优化AGC运行进行了研究:文献[3]通过分析AGC控制中的常规问题,得到影响控制的关键因素,并对控制回路进行优化;文献[4]考虑通过高压供热机组汽机主控、锅炉主控和燃料主控的控制优化,提升AGC调节性能;文献[5]建立AGC分析模型并提出高比例水电系统的AGC频率偏差系数整定流程,应用验证了该方法的有效性。此外,文献[6]对AGC调节运行中安全措施、指令核对、参数设置等方面可能面临的问题都进行了讨论。

比例-积分(Proportional-Integral, PI)控制器在燃煤机组的控制中占据着主导地位,并在未来一段时间内保持主导地位^[7-8]。分析不同PI控制器参数对AGC调节性能影响,对理论上优化控制器参数具有重要的意义。本文通过单一变量法分析控制器参数对于AGC调节性能的影响,总结参数优化的方法。

协调控制系统(Coordinated Control System, CCS)是燃煤机组参与AGC调节的重要控制回路,基于直接能量平衡(Direct Energy Balance, DEB)的CCS是应用最广泛的控制结构^[9]。结合工程实际,本文研究了DEB结构下控制器参数对AGC调节性能的影响。首先介绍AGC调节性能指标的计算方法,并分析各自的特点;然后介绍了基于DEB结构的CCS,并对CCS的控制难点(如强非线性、强耦合等)进行分析;通过单一变量法分析DEB中6个控制器参数对AGC调节性能的影响,并总结优化AGC调节性能时的参数优化方向;最后对本文工作进行总结和展望。

1 AGC调节性能计算方法

AGC调节性能指标主要包括调节速率、调节精度和响应时间3个指标^[2]。

1.1 调节速率

调节速率是指机组响应AGC指令的速率,一般分为上升速率和下降速率。

煤粉炉在升降负荷的过程中会出现跨启停磨点的过程:若计算机组响应AGC指令时跨启停磨点,调节速率的计算需要消除启停磨的影响,反之则不需要考虑。综上可知,实际调节速率的计算如下

$$v_{i,j} = \begin{cases} \frac{P_{Ei,j} - P_{Si,j}}{T_{Ei,j} - T_{Si,j}} & P_{Si,j} \notin (P_{Ei,j}, P_{Si,j}) \\ \frac{P_{Ei,j} - P_{Si,j}}{(T_{Ei,j} - T_{Si,j}) - T_{di,j}} & P_{Si,j} \in (P_{Ei,j}, P_{Si,j}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $v_{i,j}$ 是第*i*台机组第*j*次响应AGC指令的调节速率, MW/min; $P_{Ei,j}$ 和 $P_{Si,j}$ 分别为*i*机组结束和开始响应时的功率, MW; $T_{Ei,j}$ 和 $T_{Si,j}$ 分别为机组响应AGC结束和开始的时刻, min; $T_{di,j}$ 是第*j*次响应过程中启停磨实际消耗的时间, min。

基于式(1)可以得到调节速率指标

$$K_1^{i,j} = \frac{v_{i,j}}{v_{N,i}}, \quad (2)$$

式中: $v_{N,i}$ 为不同机组的标准调节速率, MW/min。不同类型机组 $v_{N,i}$ 单位时间(1 min)调节量占额定有功功率(P_e)的百分比不同,见表1。一般情况下, $K_1^{i,j}$ 实行最高限制,即 $K_1^{i,j} \leq 1.2$ 。

表1 不同类型机组的标准调节速率

Table 1 Standard regulation rate of different types of units

机组类型	$v_{N,i}$ 单位时间变化量占 P_e 的比例/%
直吹式制粉系统的汽包炉燃煤机组	1.5
带中间储仓式制粉系统的燃煤机组	2.0
循环流化床机组和燃用特殊煤种机组	1.0
超临界定压运行直流炉机组	1.0
其他类型直流炉机组	1.5
燃气机组	4.0
水力发电机组	10.0

1.2 调节精度

调节精度指机组在稳定运行过程中,实际出力和功率设定值之间的差值。

在机组平稳运行过程中,对实际出力和功率设定值的差值进行积分,然后得到的积分除以积分时间,可以得到该稳定过程中的调节偏差量,即

$$\Delta P_{i,j} = \frac{\int_{T_{Si,j}}^{T_{Ei,j}} |P_{i,j}(t) - P_{i,j}| dt}{T_{Ei,j} - T_{Si,j}}, \quad (3)$$

式中: $\Delta P_{i,j}$ 为第*i*台机组在第*j*次稳定运行的偏差量, MW; $P_{i,j}(t)$ 和 $P_{i,j}$ 分别为该稳定时间内机组实际功率和功率设定值, MW; $T_{Ei,j}$ 和 $T_{Si,j}$ 分别为稳定时间结束和开始的时刻。

基于式(3),可以得到调节精度指标

$$K_2^{i,j} = 2 - \frac{\Delta P_{i,j}}{\Delta P_N}, \quad (4)$$

式中: ΔP_N 为调节允许的偏差量上限,一般取 $1.0\%P_e$ 。 $K_2^{i,j}$ 一般实行最低限制,即 $K_2^{i,j} \geq 0.1$ 。

1.3 响应时间

响应时间,是指能量管理系统(Energy Management System, EMS)发出指令后,机组在原出力点的基础上可靠地跨出与调节方向一致的调节死区所用的时间。

第*i*台机组第*j*次响应AGC指令的响应时间

$$t_{i,j} = T_E - T_S, \quad (5)$$

式中: T_S 和 T_E 分别为 AGC 指令下达时间和跨出与调节方向一致的调节死区时刻。

结合式(5),可以得到响应时间指标

$$K_3^{i,j} = 2 - \frac{t_{i,j}}{t_N}, \quad (6)$$

式中: t_N 为 AGC 跨出与调节方向一致的调节死区的标准时间,火电机组 t_N 应小于 1 min,水电机组 t_N 应小于 20 s。 $K_3^{i,j}$ 一般实行最低限制,即 $K_3^{i,j} \geq 0.1$ 。

结合式(2),(4),(6),能够得到机组每次 AGC 动作中的调节性能指标

$$K_p^{i,j} = K_1^{i,j} \times K_2^{i,j} \times K_3^{i,j}. \quad (7)$$

$K_1^{i,j}$ 表征第 i 台机组第 j 次响应 AGC 指令的实际调节速率达到标准调节速率的程度; $K_2^{i,j}$ 表征第 i 台机组第 j 次响应 AGC 指令中稳态运行的实际偏差量达到调节允许偏差量的程度; $K_3^{i,j}$ 表征第 i 台机组第 j 次响应 AGC 的实际响应时间达到标准响应时间的程度。上述 3 个指标分别衡量机组响应 AGC 指令的动态性能、稳态性能和初始响应性能。通过分析控制器参数对 $K_1^{i,j}$ 、 $K_2^{i,j}$ 和 $K_3^{i,j}$ 的影响,可为进一步优化控制器参数和提高 AGC 调节性能提供坚实的基础。

2 基于直接能量平衡的协调控制系统

2.1 CCS 模型状态变量

CCS 是机组参与 AGC 调节的核心系统,具有强非线性、强耦合等控制特点^[10]。以某 300 MW 直吹式制粉系统汽包炉机组的非线性 CCS 模型为例进行分析。该模型是基于能量守恒和物料守恒并通过必要的简化建立,通过 6 个微分方程描述 CCS 动态^[11]

$$\begin{cases} \dot{q}_{m,f} = \frac{1}{22} [u_B(t-43) - q_{m,f}] \\ \dot{D}_b = \frac{1}{380} [2.46k_c q_{m,f}^{1.230} - D_b] \\ \dot{p}_b = \frac{1}{405.7} [D_b - 42.51p_b^{0.956} \sqrt{p_b - p_T}] \\ \dot{p}_T = \frac{1}{510.1} [42.51p_b^{0.956} \sqrt{p_b - p_T} - D_T] \\ \dot{p}_1 = \frac{1}{5} [0.0083\mu_i p_T - p_1] \\ \dot{D}_T = \frac{1}{5} [74.74p_1 - D_T] \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $q_{m,f}$ 、 D_b 、 D_T 分别为煤粉质量流量、汽包蒸汽蒸发量、汽机通汽流量, t/h; p_b 、 p_T 、 p_1 分别为汽包压力、主蒸汽压力、调节级压力, MPa; u_B 为给煤量, t/h; μ_i 为汽机阀门开度, %; k_c 为煤量变化的归一化指标,其标称值为 1。 u_B 、 μ_i 为 CCS 模型的输入量 u_1 、 u_2 ; P_T

和机组功率输出 N_e (MW) 为 CCS 模型的输出量。机组功率输出可以通过下式进行计算

$$N_e = 0.86D_T^{0.852}. \quad (9)$$

此外,机组的给煤量和汽机阀门开度存在执行器饱和约束

$$\begin{cases} 0 \leq u_B \leq 150 \\ -0.3 \leq \dot{u}_B \leq 0.3 \\ 0 \leq \mu_i \leq 100 \\ -0.2 \leq \dot{\mu}_i \leq 0.2 \end{cases}. \quad (10)$$

由于越来越多的燃煤机组参与深度调峰,为分析机组在全工况范围内的 AGC 调节性能,本文展开了 30%~100% 负荷工况下的分析,CCS 在此区间的典型工况参数见表 2。

表 2 CCS 典型工况下的参数

Table 2 Parameters under typical CCS working conditions

工况	N_e /MW	p_T /MPa	u_B /(t·h ⁻¹)	μ_i /%
A(30% P_e)	90.0	13.82	40.7	27.4
B(40% P_e)	120.6	13.82	53.8	38.6
C(65% P_e)	195.3	14.81	85.2	63.4
D(90% P_e)	270.0	16.09	116.1	85.4
E(100% P_e)	300.1	16.09	128.4	96.7

2.2 CCS 变量特性分析

对式(8)描述的 CCS 非线性特性、强耦合以及大范围变工况特性进行分析。

对非线性特性采用 Vinnicombe 间隙度(ν_g)进行定量计算^[12], $\nu_g \geq 0.4$ 时可以认为系统具有较强的非线性^[13]。图 1 为以工况 E(额定工况)和 A(超低工况)为基准工况下 CCS 的 ν_g 分布。由图 1 可知,无论以工况 E 或 A 为基准工况,CCS 会多次出现 $\nu_g \geq 0.4$, 意味着 CCS 具有很强的非线性。

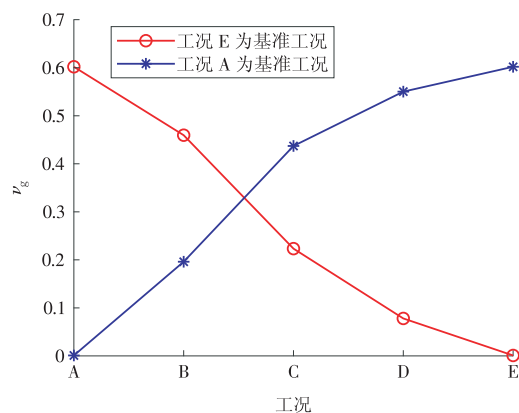


图 1 典型工况下 ν_g 分布

Fig. 1 Distributions of ν_g under different working conditions

采用相对增益矩阵(Relative Gain Array, RGA)分析系统的耦合特性, λ_{ij} 为多变量系统第 i 个输入到第 j 个输出的相对增益。表 2 中 5 个工况的相对增

益矩阵分布如图2所示。由图2可知,所有工况在不同频率段的相对增益值会有一个明显的转折区间:在低频段,主对角占优,即 $|\lambda_{11}|$ 和 $|\lambda_{12}|$ 接近1;在中频段, $|\lambda_{ij}|$ 的值进行转换;在高频段,主对角占优,即 $|\lambda_{11}|$ 和 $|\lambda_{22}|$ 接近1。CCS具有很强的耦合性,在设计控制策略时必须要考虑回路的耦合作用。

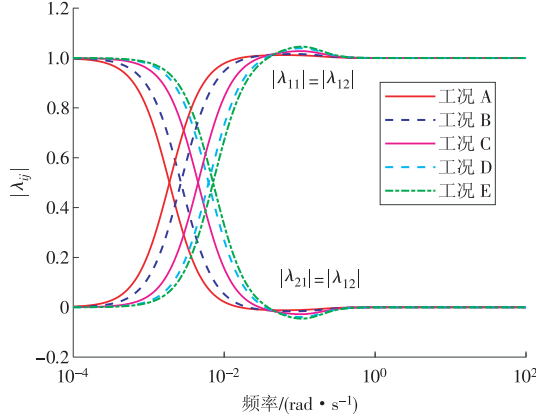


图2 典型工况下 $|\lambda_{ij}|$ 分布

Fig. 2 $|\lambda_{ij}|$ distribution under different working conditions

得到5个工况下线性化模型的开环阶跃响应,如图3所示, u_1 和 u_2 的阶跃值均为1。从图3可知,随着工况变化,协调控制系统的动态特性发生了很大的变化,特别是图3c和3d。此外,由于任一输入量对2个回路均有明显的影响,说明系统存在很强的耦合作用。需要说明的是,机组在高负荷和低负荷时,即负荷在30%~40% P_e 和90%~100% P_e 时,采用定压运行;在中间负荷段采用滑压运行。

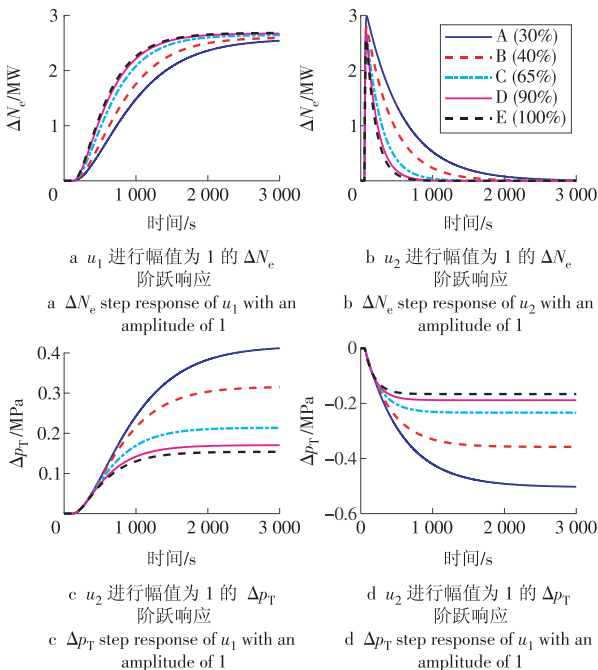


图3 不同工况下系统开环响应

Fig. 3 Open-loop responses under different working conditions

CCS 常用以 DEB 控制结构为基础的控制策略^[14],本文采用的 CCS 控制框图如图4所示,其中主蒸汽压力回路的被控量采用热量信号代替主蒸汽压力,热量信号采用下式计算

$$Q_m = p_1 + C_b \frac{dp_b}{dt}, \quad (11)$$

式中: C_b 为锅炉蓄热系数,取120。

相应地,主蒸汽压力设定值也变成所需热量的信号

$$r_{Q_m} = r_{p_1} \frac{p_1}{p_T}, \quad (12)$$

式中: r_{p_1} 为 p_T 的设定值,可以通过 AGC 中负荷对压力表得到。

当 CCS 稳定运行时,有 $Q_m = r_{Q_m}$ 和 $dp_b/dt = 0$,则由式(11)与式(12)可以得到

$$p_1 = r_{p_1} \frac{p_1}{p_T} \rightarrow r_{p_1} = p_T, \quad (13)$$

即在系统稳态时, p_T 可以收敛到设定值 r_{p_1} 。

3 控制器参数对 AGC 调节性能的分析

CCS 中的控制器为 p_T 回路和 N_e 回路的反馈控制器 $G_{p_T}(s)$ 和 $G_{N_e}(s)$, p_T 回路的前馈控制器 $G_{ff}(s)$,其中 s 为拉普拉斯算子,具体控制流程如图4所示。控制器参数结合优化算法与经验调试的方法,得到其标称值: $G_{N_e}(s) = k_{p1} + k_{i1}/s = 1.95 + 0.11/s$; $G_{p_T}(s) = k_{p2} + k_{i2}/s = 50.1 + 0.025/s$; $G_{ff}(s) = k_{pfd} + k_{dfd}/(52s + 1) = 0.35 + 7.84/(52s + 1)$,其中 k_{p1} 和 k_{i1} 分别为功率回路的比例增益和积分增益; k_{p2} 和 k_{i2} 分别为主蒸汽压力回路的比例增益和积分增益; k_{pfd} 和 k_{dfd} 分别为功率回路前馈控制器的比例增益和微分增益。

本节中所有仿真均是基于 Matlab 和 Simulink 平台展开。此时 CCS 的输出和系统控制量分别如图5和图6所示,可知整个仿真过程中共有5次 AGC 响应过程,包含3次升负荷和2次降负荷过程。整定的控制器能够保证 CCS 具有满意的控制效果,输出功率能够快速跟踪 AGC 设定值,主蒸汽压力在 AGC 指令变化时会有一定的反调。

为了反映 CCS 在运行中的各种扰动,设置煤质波动 $k_e = 1 + 0.05 \sin(0.01t)$,且功率输出存在噪声功率为0.000 1 dBW 的测量噪声。此时,采用单一变量对 $G_{p_T}(s)$, $G_{N_e}(s)$ 和 $G_{ff}(s)$ 的6个参数进行逐一分析,如图7—12所示,其中: $K_m^{i,j}$ 的上标表示第 i 台机组在 j 次响应 AGC 的动作,下标 m 为1,2,3和p,分别表示 AGC 调节性能的调节速度、调节精度、响应时间和总性能指标。各自参数的设置变化分别为:

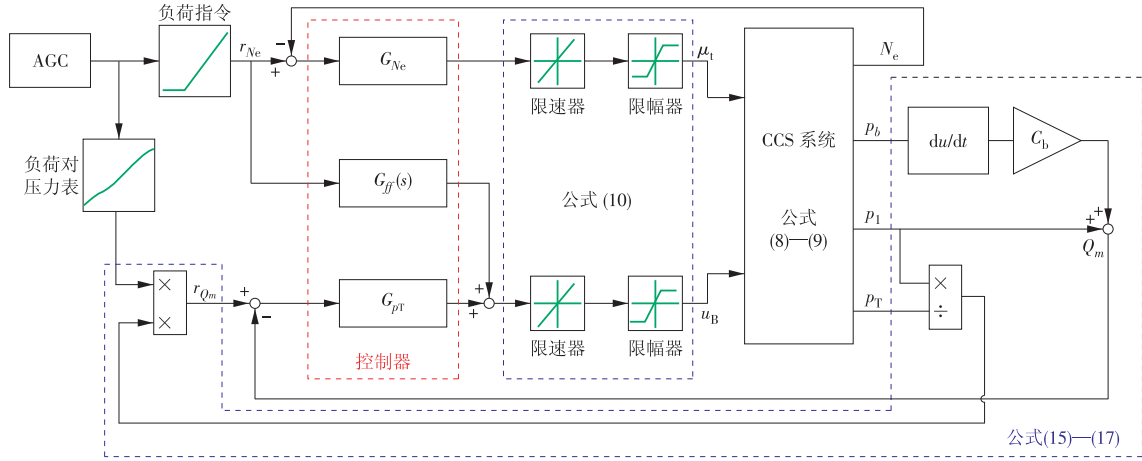


图4 基于DEB的CCS控制流程

Fig. 4 The control structure of the CCS based on DEB

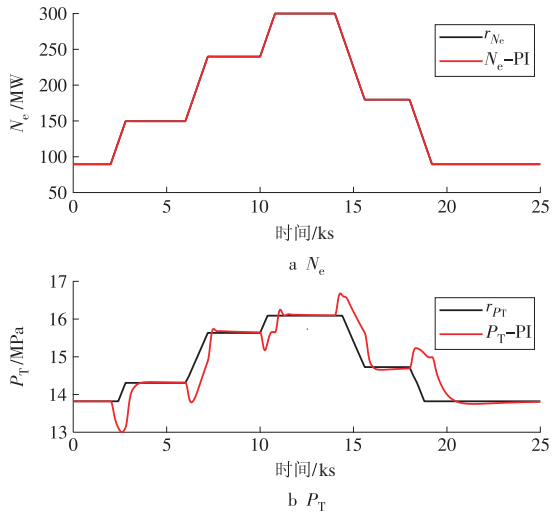


图5 标称参数时CCS输出

Fig. 5 CCS outputs with nominal parameters

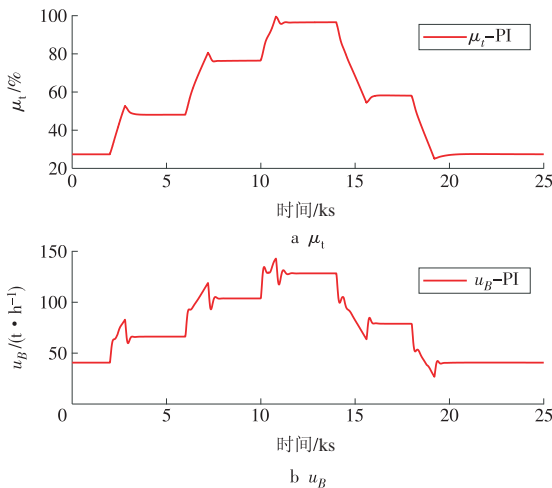


图6 标称参数时CCS控制量

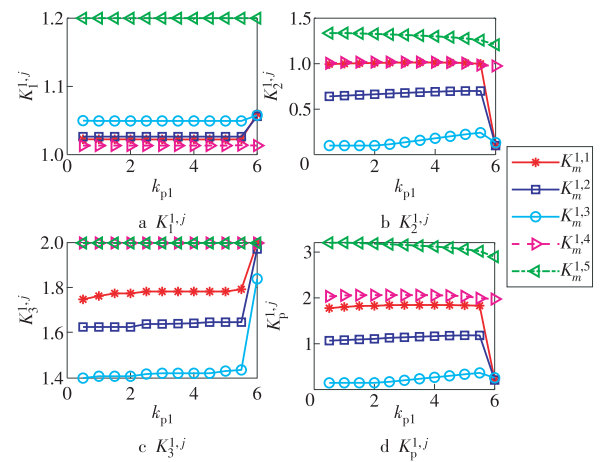
Fig. 6 CCS control signals with nominal parameters

$k_{p1} \in [0.6, 6.0]$, $k_{i1} \in [0.05, 0.15]$, $k_{p2} \in [20, 70]$, $k_{i2} \in [0.005, 0.060]$, $k_{pfd} \in [0.1, 0.6]$, $k_{dfd} \in [2, 12]$ 。需要说明的是,当其中一个参数变化时,其他参数均为标称值。

由图7可知, k_{p1} 会对AGC的调节性能产生明显影响:随着 k_{p1} 的增加, $K_1^{1,j}$ 和 $K_3^{1,j}$ 会逐渐增加,当达到一定程度时, $K_1^{1,j}$ 和 $K_3^{1,j}$ 的上升速度快速加快;由于 $K_2^{1,j}$ 先增加后快速下降,导致 $K_p^{1,j}$ 先增加后快速下降。

由图8可知, k_{i1} 与AGC的4个调节性能指标均呈现正相关,特别是与 $K_2^{1,4}$ 和 $K_p^{1,j}$ 的相关性更强。

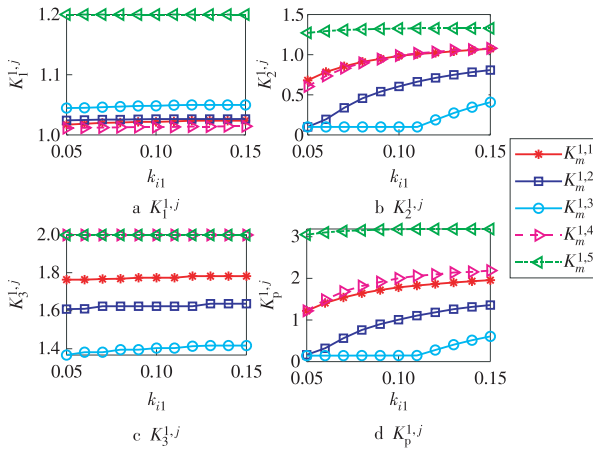
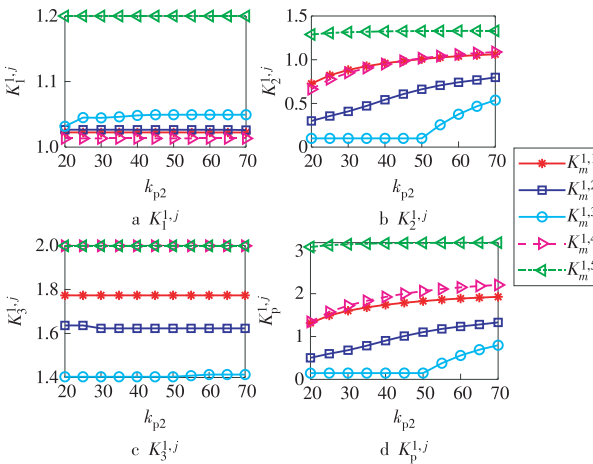
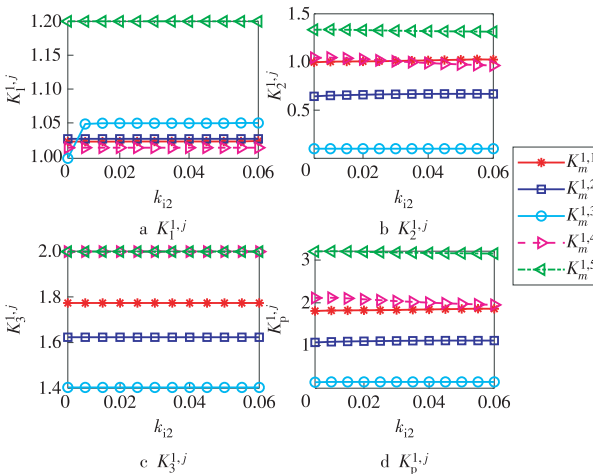
由图9可知,随着 k_{p2} 的增加, $K_2^{1,4}$ 表现为明显上升,而 $K_1^{1,4}$ 和 $K_3^{1,4}$ 的变化不确定,在不同工况下会有不同的趋势,但整体变化幅值较小。由于 k_{p2} 变化占据 $K_p^{1,j}$ 的主导地位,使得 $K_p^{1,j}$ 的变化与 k_{p2} 保持一致。

图7 AGC调节性能指标随 k_{p1} 变化趋势Fig. 7 AGC regulation performance indexes varying with k_{p1}

从图10可知,当 k_{i2} 在变化范围内,所有AGC调节性能指标波动较小,在第4次AGC响应过程中, $K_2^{1,4}$ 和 $K_p^{1,4}$ 表现为较弱负相关,变化幅值较小。

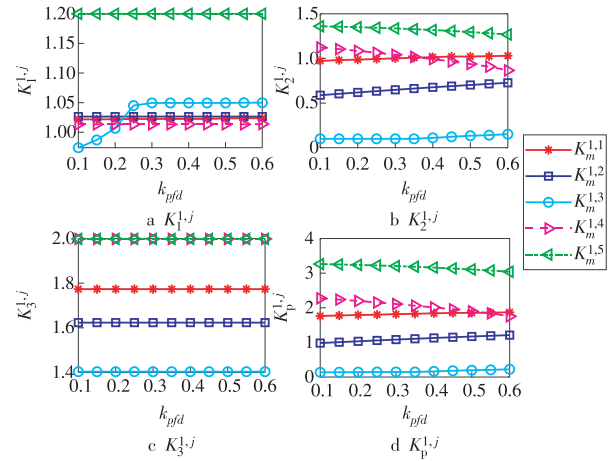
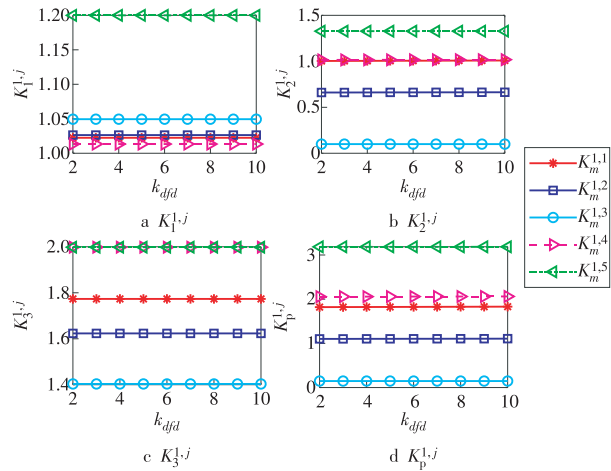
图11表明 k_{pfd} 的变化时, $K_2^{1,4}$ 和 $K_p^{1,4}$ 表现为一定的负相关,和 $K_1^{1,3}$ 表现为正相关,在更多的不同工况下与AGC各调节性能指标关联性较小。

图12表明 k_{dfd} 与所有AGC调节性能指标均未表

图8 AGC调节性能指标随 k_{i1} 变化趋势Fig. 8 AGC regulation performance indexes varying with k_{i1} 图9 AGC调节性能指标随 k_{p2} 变化趋势Fig. 9 AGC regulation performance indexes varying with k_{p2} 图10 AGC调节性能指标随 k_{i2} 变化趋势Fig. 10 AGC regulation performance indexes varying with k_{i2}

现有明显的关联性。

总的来讲, k_{p1} 、 k_{i1} 和 k_{p2} 对AGC调节性能指标具有明显的关联性。为提高AGC调节性能,建议适度增加 k_{p1} 、合理增加 k_{i1} 和 k_{p2} 。 k_{i2} 、 k_{pfd} 和 k_{dfd} 对AGC调节性能指标的影响不明显,在参数调整时,调整 k_{i2} 、 k_{pfd} 和 k_{dfd} 对于提升AGC调节性能作用不明显。

图11 AGC调节性能指标随 k_{pfd} 变化趋势Fig. 11 AGC regulation performance indexes varying with k_{pfd} 图12 AGC调节性能指标随 k_{dfd} 变化趋势Fig. 12 AGC regulation performance indexes varying with k_{dfd}

4 结论

本文关注基于DEB控制结构的控制器参数对于燃煤机组AGC调节性能的影响。首先对AGC调节性能指标:调节速率、调节精度与响应时间的定义与计算方式进行介绍。基于此,介绍CCS模型,并对CCS的耦合性、非线性等控制难点进行分析。结合直接能量平衡控制结构,在已经优化的控制器参数基础上,通过单一变量法分析控制器参数对调节速率、调节精度与响应时间的影响。

本文主要结论如下:功率回路的比例和积分增益以及主蒸汽压力回路的比例增益对于AGC调节性能指标具有明显的关联性,为提高AGC调节性能,可以适度增加功率回路的比例增益,合理增加功率回路的积分增益以及主蒸汽压力回路的比例增益。主蒸汽压力回路的积分增益、前馈回路的比例增益和微分增益对AGC调节性能指标的影响不明显,调整上述参数对于提升AGC调节性能作用不明显。

上述结论为提高 AGC 调节性能时的燃煤机组控制器参数优化提供了方向性指导, 下一步工作考虑将上述结论应用于实际机组的 AGC 调节性能优化。

参考文献:

- [1] 刘吉臻, 曾德良, 田亮, 等. 新能源电力消纳与燃煤电厂弹性运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5385-5394.
LIU Jizhen, ZENG Deliang, TIAN Liang, et al. Control strategy for operating flexibility of coal-fired power plants in alternate electrical power [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5385-5394.
- [2] 山东能源监管办. 山东电力辅助服务市场运营规则(试行)(2020 年修订版) [S], 2020.
- [3] 周建玉, 朱能飞, 乐凌志, 等. 三河发电有限公司#1 机组 AGC 优化[J]. 华电技术, 2015, 37(6): 57-61.
ZHOU Jianyu, ZHU Nengfei, LE Lingzhi, et al. Optimization of AGC of unit No. 1 in Sanhe Power Generation Company Limited [J]. Huadian Technology, 2015, 37(6): 57-61.
- [4] 刘恩仁, 李然磊, 周长来, 等. 高供热负荷超临界机组 AGC 控制优化策略[J]. 山东电力技术, 2020, 47(9): 61-66.
LIU Enren, LI Ranlei, ZHOU Changlai, et al. AGC control optimization strategy for supercritical units with high heating load [J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(9): 61-66.
- [5] 杨荣照, 陈亦平, 夏成军, 等. 高比例水电系统 AGC 稳定性分析及控制策略优化 [J]. 电网技术, 2020, 44(3): 880-886.
YANG Rongzhao, CHEN Yiping, XIA Chengjun, et al. AGC stability analysis and control strategy optimization of high proportion hydropower system [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 880-886.
- [6] 杨玉柱, 许伟. 某电厂 AGC 调节异常原因分析与防范措施[J]. 华电技术, 2019, 41(7): 77-79.
YANG Yuzhu, XU Wei. Cause analysis and preventive measures of abnormal regulation of AGC in a power plant [J]. Huadian Technology, 2019, 41(7): 77-79.
- [7] SUN L, LI D, LEE K Y. Optimal disturbance rejection for PI controller with constraints on relative delay margin [J]. ISA transactions, 2016, 63: 103-111.
- [8] MA D, CHEN J. Delay margin of low-order systems achievable by PID controllers [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(5): 1958-1973.
- [9] WU Z, LI D, XUE Y, et al. Gain scheduling design based on active disturbance rejection control for thermal power plant under full operating conditions [J]. Energy, 2019, 185: 744-762.
- [10] 秦海山, 栾丛超, 侯晓宁, 等. 单抽供热机组负荷控制系统的解耦设计及动态响应特性研究[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 40-47.
QIN Haishan, LUAN Congchao, HOU Xiaoning, et al. Decoupling design of the load control system in a single-extraction heating unit and its dynamic response characteristics [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 40-47.
- [11] SUN L, LI D, LEE K Y, et al. Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit [J]. Control Engineering Practice, 2016, 55: 38-55.
- [12] ANDERSON B D O, BRINSMEAD T S, BRUYNE F D. The Vinnicombe metric for nonlinear operators [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(9): 1450-1465.
- [13] WU Z, LI D, XUE Y, et al. Modified active disturbance rejection control for fluidized bed combustor [J]. ISA Transactions, 2020, 102: 135-153.
- [14] SUN L, HUA Q, LI D, et al. Direct energy balance based active disturbance rejection control for coal-fired power plant [J]. ISA Transactions, 2017, 70: 486-493.

(本文责编: 陆华)

作者简介:

曹子飞(1991), 男, 助理工程师, 从事火电发电行业控制方面的研究, 530457651@qq.com;

吴振龙*(1992), 男, 副教授, 博士, 从事工业大数据分析利用、自抗扰控制、热力系统和新能源系统优化控制等方面的研究, wuzhenlong2020@zzu.edu.cn。

*为通信作者。