

DOI: 10.19666/j.rlfed.202206110

热电联产机组柔性控制仿真研究

王冠杰, 田亮, 邓拓宇

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北保定 071003)

[摘要] 随着新能源发电大规模发展, 热电联产机组需要灵活运行以平抑新能源接入电网带来的波动。为了满足机组灵活运行时控制要求以及机组运行安全性, 设计了一种基于灵活性评价的热电联产机组柔性控制策略。首先, 根据机组电负荷、热负荷和机前压力的响应特性, 提出一种可以表征机组负荷适应能力以及运行安全性的灵活性评价指标的计算方法, 并以此作为最优柔性因子选取的依据。然后, 仿真分析了单一工况下柔性因子对控制系统性能的影响。最后, 在确定不同工况最优柔性因子的基础上, 设计了随工况变化的自适应柔性因子并应用到柔性控制中。仿真结果表明: 该控制策略不仅在机组大范围工况变化时可以取得较好的控制效果, 也可以对低压缸切缸后的机组实现较好的控制, 满足机组灵活运行的控制要求, 保证机组运行安全性。

[关键词] 柔性控制; 热电联产机组; 灵活运行; 工况变化; 灵活性评价

[引用本文格式] 王冠杰, 田亮, 邓拓宇. 热电联产机组柔性控制仿真研究[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 123-131. WANG Guanjie, TIAN Liang, DENG Tuoyu. Simulation study on flexible control of cogeneration unit[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 123-131.

Simulation study on flexible control of cogeneration unit

WANG Guanjie, TIAN Liang, DENG Tuoyu

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Large-scale grid connection of new energy power generation makes cogeneration units need flexible operation to smooth out the fluctuation brought by new energy access. In order to meet the control requirements of flexible operation of the unit and the safety of the unit operation, a flexible control strategy for cogeneration units based on flexibility evaluation is designed. Firstly, according to the response characteristics of electrical load, thermal load and throttle pressure of the unit, a calculation method of flexibility evaluation indexes which can represent the load adaptability and operation safety of the unit are proposed, and these indexes are used as the basis for selecting the optimal flexibility factors. Then, the influence of flexibility factor on the system performance under a single working condition is simulated. Finally, on the basis of determining the optimal flexibility factors under different working conditions, the adaptive flexibility factors that changing with working conditions are designed and applied to the flexible control. The simulation results show that, the control strategy can not only achieve a better control effect when the unit runs under large-scale conditions change, but also achieve a better control for the unit after the low-pressure cylinder is cut off, which can meet the control requirements of flexible operation of the unit and ensure the safety of the unit operation..

Key words: flexible control; cogeneration unit; flexible operation; conditions change; flexibility evaluation

随着“双碳”目标的提出, 我国明确指出现阶段要大力开发利用风能、光能等新能源, 实现能源清洁化发展^[1]。由于风能、光能等新能源出力具有

随机性和间歇性, 在其大规模接入电网后, 需要火力发电平衡其出力波动, 热电联产机组也需要更加频繁地参与到电网调峰中^[2-3]。但是锅炉最低稳定燃

收稿日期: 2022-06-10 网络首发日期: 2022-09-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2021MS090)

Supported by: Fundamental Research Funds for the Central Universities (2021MS090)

第一作者简介: 王冠杰(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为热电联产机组控制系统优化, 1257552204@qq.com。

通信作者简介: 邓拓宇(1987), 女, 博士, 主要研究方向为供热机组灵活性提升技术、综合能源系统优化控制、大数据应用, dty@ncepu.edu.cn。

烧率的限制和机组存在的热电耦合严重降低了机组参与电网调峰的灵活性,导致“弃风”“弃光”等问题越来越严重^[4-7]。目前解决这些问题的主要措施是对原有机组进行设备改造或对控制系统进行优化,将机组的负荷调节下限拓宽至 40% 或者更低,这也将导致机组低负荷运行更加频繁^[8]。与机组高负荷运行不同,机组低负荷运行时应格外关注其安全性。

实际工程中常采用以锅炉跟随汽轮机为基础的协调控制或直接能量平衡 (DEB) 协调控制^[9],这 2 类控制方案可以满足电网对负荷响应的要求,但是其机前压力波动较大,不利于机组低负荷时安全运行。而以汽轮机跟随锅炉为基础的协调控制虽然可以使机前压力处于相对稳定的状态,但是锅炉本身的惯性和迟延,使得其负荷响应特性不如前 2 种控制方案。基于此,研究者将“柔性”的概念引入机组控制中,提出了可以满足机组不同负荷时不同控制要求的柔性控制。

近年来,关于火电机组柔性控制的研究不断涌现。文献[10]从能量供需平衡的角度出发,提出了机组柔性控制策略,并验证了柔性控制可以明显减弱机组非线性影响。文献[11]在柔性控制的基础上,采用模糊控制器作为锅炉侧和汽轮机侧的主控制器,提高了控制系统的动、静态特性以及鲁棒性。文献[12]采用自抗扰控制器来补偿和估计系统中的扰动,设计了柔性自抗扰控制方案。文献[13]基于传统的“机跟炉”和“炉跟机”控制系统,搭建了柔性控制系统,并分析了柔性因子改变对系统性能的影响。文献[14]将柔性控制分为变结构柔性控制和变参数柔性控制,通过仿真分析了这 2 类控制方式的特点。文献[15]在建立热电联产机组动态和静态模型的基础上,基于热电转换、热态重构和精准能量平衡提出了机组热电协调的柔性控制策略。文献[16]依据机组快速减负荷过程中锅炉的热惯性特点,将变参数柔性控制应用到水煤配比控制中,实现了机组辅机故障减负荷 (runback, RB) 柔性控制。文献[17]在 Smith 预估控制回路添加了柔性因子,使锅炉侧控制器在更偏向于 PID 控制还是更偏向于 Smith 预估控制之间做切换,在低负荷时也可以取得较好的控制效果。文献[18]以柔性控制为基础提出了一种自适应协调控制策略,并采用蒙特卡洛模拟验证了其控制性能。

柔性控制的重点是确定不同机组或者同一机

组不同运行工况下的最优柔性因子。在确定最优柔性因子后,其对于不同机组、不同运行工况都可以通过调节柔性因子,得到满足机组控制要求的控制系统,达到较优的控制效果。但是之前的文献大多没有对最优柔性因子的选取方法做深入探讨,且大多只针对纯凝机组的单一工况进行研究,而热电联产机组不仅在选取最优柔性因子时需要考虑供热稳定性问题,而且在参与调峰时工况变化十分频繁。针对上述问题,本文提出了一种最优柔性因子的选取方法,并在此基础上设计了一种适用于机组大范围工况变化的柔性控制策略。首先,根据热电联产机组电、热负荷以及机前压力的响应特性,提出一种热电联产机组灵活性评价指标的计算方法,将其作为最优柔性因子选择的依据。然后,选取机组的 4 个典型工况,在采用灵活性评价指标确定工况切换时最优柔性因子的基础上,设计了随工况变化的自适应柔性因子并应用到柔性控制中,仿真验证了其在工况大范围变化时的控制效果。

1 热电联产机组动态模型

热电联产机组兼具发电、供热、工业抽汽等功能,盈利模式多元化,且可以为风电、光伏发电等可再生能源发电并网提供容量支撑,符合当前能源的发展趋势。但是此类机组是一个多输入多输出、具有大惯性和大迟延的非线性对象,且发电负荷、供热负荷、工业抽汽负荷存在严重耦合,使得其控制十分困难。图 1 为热电联产机组供热、供汽部分热力系统结构。

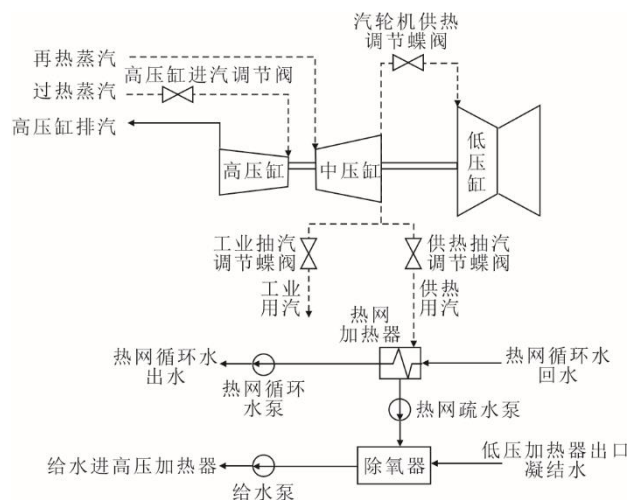


图 1 热电联产机组供热、供汽部分热力系统结构
Fig.1 Structural diagram of thermodynamic system of heating and steaming parts of the cogeneration unit

与纯凝机组或传统的供热机组不同, 热电联产机组的中压缸排汽分为 3 部分: 一部分进入低压缸内发电; 一部分加热热网循环水供热; 一部分进入周围工厂, 供工厂使用。

为了设计适合机组大范围工况变化运行的控制策略, 通常需要采用机理分析法得到其模型。本文采用典型的亚临界 300 MW 供热机组的非线性动态模型^[19]:

$$r_M = u_B(t - \tau) \quad (1)$$

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

$$C_b \frac{dp_d}{dt} = -K_3 p_t u_T + K_1 r_B \quad (3)$$

$$p_t = p_d - K_2 (K_1 r_B)^{1.5} \quad (4)$$

$$T_t \frac{dN_E}{dt} = -N_E + (1 - K_5) K_3 p_t u_T + K_6 p_e u_L \quad (5)$$

$$T_e \frac{dp_e}{dt} = K_3 K_5 p_t u_T - K_6 p_e u_L - \quad (6)$$

$$K_7 p_e u_E - K_8 p_e u_s \quad (7)$$

$$q_h = K_4 K_7 p_e u_E \quad (7)$$

$$q_s = K_4 K_8 p_e u_s \quad (8)$$

式中, 5 个控制输入变量: 锅炉燃料量 u_B , t/h; 汽轮机高压调节阀开度 u_T , %; 汽轮机供热调节蝶阀 (LV 阀) 开度 u_L , %; 供热抽汽调节蝶阀 (EV 阀) 开度 u_E , %; 工业抽汽调节蝶阀 (SV 阀) 开度 u_s , %。5 个状态输出变量: 汽轮机机前压力 p_t , MPa; 汽轮机中压缸排汽压力 (供热抽汽压力) p_e , MPa; 发电功率 N_E , MW; 供热抽汽流量 q_h , t/h; 工业抽汽流量 q_s , t/h。2 个中间变量: 制粉系统实际进入磨煤机煤量 r_M , t/h; 锅炉燃烧率 r_B , t/h。2 个其他输出变量: 一级压力 p_1 , MPa; 汽包压力 p_d , MPa。5 个动态参数: 制粉延迟时间 τ , s; 制粉惯性时间 T_f , s; 锅炉蓄热系数 C_b , MJ/MPa; 汽轮机惯性时间 T_t , s; 热网加热器蓄热系数 T_e , MJ/MPa。 $K_1 - K_8$ 为 8 个静态参数。

该模型涵盖了热电联产机组的多种运行工况, 如供热抽汽工况、常规供热工况、纯凝工况、低压缸切缸后工况等。

在模型中, 控制输入变量和输出变量 (包括 5 个状态输出变量和 2 个其他输出变量) 的取值与机组的运行工况有关, 动态参数的取值需要通过扰动实验来得到, 静态参数的取值可以通过式(1)一式(8)中左侧的微分项置零来计算。当机组的运行工况介于低压缸切缸深调峰工况与额定供热抽汽工况之间

时, 输入变量和输出变量的取值、动态参数和静态参数的取值分别见表 1 和表 2。

表 1 模型中输入变量和输出变量的取值

Tab.1 The values of input and output variables in the model

项目	数值
锅炉燃料量 u_B /(t·h ⁻¹)	74.29~160.00
汽轮机高压调节阀开度 u_T /%	44.24~80.00
汽轮机供热调节蝶阀开度 u_L /%	0~55.22
供热抽汽调节蝶阀开度 u_E /%	100
工业抽汽调节蝶阀开度 u_s /%	100
汽轮机机前压力 p_t /MPa	14.00~16.67
汽轮机中压缸排汽压力 p_e /MPa	0.265~0.350
发电功率 N_E /MW	90~235
供热抽汽流量 q_h /(t·h ⁻¹)	226.8~300.0
工业抽汽流量 q_s /(t·h ⁻¹)	75.6~100.0
一级压力 p_1 /MPa	6.18~13.33
汽包压力 p_d /MPa	14.15~18.17

表 2 模型中动态参数和静态参数的取值

Tab.2 The values of dynamic and static parameters in the model

项目	数值
制粉延迟时间 τ /s	20
制粉惯性时间 T_f /s	100
锅炉蓄热系数 C_b /(MJ·MPa ⁻¹)	3 600
汽轮机惯性时间 T_t /s	12
热网加热器蓄热系数 T_e /(MJ·MPa ⁻¹)	1 600
燃料量增益 K_1	1.875
压差拟合系数 K_2	0.000 289
汽轮机增益 K_3	0.225
供热、供热抽汽流量系数 K_4	6.154
低压缸做功占比 K_5	0.353 2
低压缸蒸汽做功增益 K_6	2.119
热网循环水有效比热容 K_7	1.392 75
工业抽汽增益 K_8	0.464 25

2 模型特性分析

在 MATLAB/Simulink 平台中搭建对象的仿真模型, 并加入输入扰动信号以分析系统的动态特性。考虑到 EV 阀和 SV 阀的扰动对系统动态特性的影响类似, 供热抽汽流量和工业抽汽流量的变化特性也近似呈线性关系, 因此只分析燃料量、汽轮机高压调节阀开度、LV 阀和 EV 阀对系统的影响。

图 2 为额定供热抽汽工况下燃料量和汽轮机高压调节阀开度扰动响应曲线。图 2 分别表示了燃料量阶跃减少 10 t/h、汽轮机高压调节阀开度阶跃增大 10%时的响应曲线。由图 2 可见, 当燃料量减少时, 进入机组的能量会减少, 由于锅炉本身固有的

大惯性和迟延,机前压力、发电功率、供热抽汽流量和工业抽汽流量等输出参数均呈现有大惯性大迟延的自平衡特性。当汽轮机高压调节阀开度增大时,进入汽轮机的蒸汽量会迅速变多,但是锅炉提供给汽轮机的蒸汽量存在一定的延时而不会立刻增加,因此机前压力下降,锅炉释放蓄热,机组发电功率、供热抽汽流量和工业抽汽流量均会迅速上升,但是由于此时燃料量并没有增加,上述输出参数会在一段时间后恢复到原来的稳定状态。锅炉和汽轮机高压调节阀开度的响应速度差异也是机组稳定性和负荷适应能力之间存在矛盾的重要原因之一。

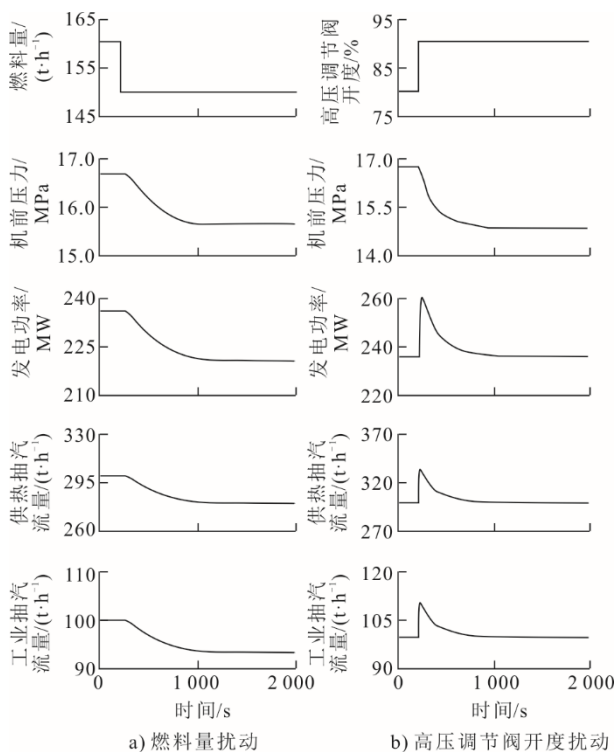


图2 燃料量和汽轮机高压调节阀开度扰动响应曲线
Fig.2 Response curves of fuel flow disturbance and opening disturbance of turbine governor valve

图3为额定供热抽汽工况下LV阀和EV阀开度扰动响应曲线,图3表示了LV阀和EV阀开度阶跃变化10%的响应曲线。由图3可见,当LV阀开度增加时,进入低压缸做功的蒸汽量变多,发电功率增大,供热抽汽和工业抽汽2个通路的流量均下降。当EV阀开度减小时,供热抽汽流量下降,进入低压缸和工业抽汽通路的蒸汽增加,发电功率和工业抽汽流量均会增大,SV阀的影响与之相似。这说明中压缸排汽侧的3个通路之间存在强耦合,其中进入低压缸做功和供热的2个通路存在耦合,这也是限制机组调峰能力的主要因素。

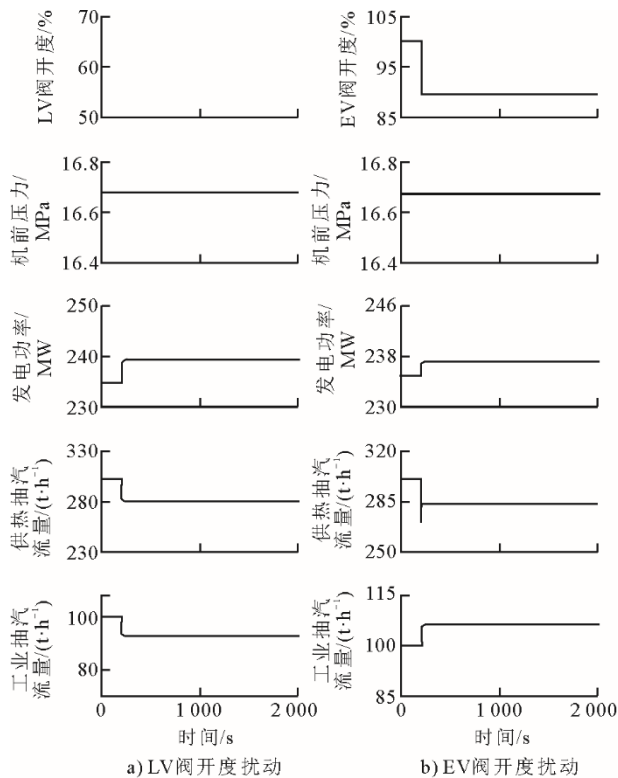


图3 LV阀和EV阀开度扰动响应曲线
Fig.3 Response curves of the opening disturbances of LV and EV valve

3 大范围变工况柔性控制策略

3.1 柔性控制结构

柔性控制可以根据约束条件的变化来协调不同的控制系统,从而满足被控对象不同的性能要求,本质上属于多目标控制范畴。大范围变工况柔性控制策略结构如图4所示。

该控制策略在传统的“炉跟机”和“机跟炉”协调控制策略基础之上增加了柔性因子 K (图4中红色实线框所示),该因子可以用于协调能量转换过程中的不平衡,从而保证机组在大范围变工况运行下保持良好的运行性能。图4中绿色实线框部分表示5个控制输出变量的控制回路所对应的PID控制器。

图4中蓝色实线框部分是执行机构的传递函数。考虑到控制系统一般采用惯性环节约束调节阀的开度变化速率,数字电液系统(DEH)、LV阀执行机构、EV阀执行机构、SV阀执行机构均用一阶惯性环节表示。实际的燃料控制比较复杂,为了便于分析也用一阶惯性环节来表示。

3.2 控制器设计

柔性控制系统控制器的设计主要包括PID控制器的设计以及柔性因子 K 的确定。

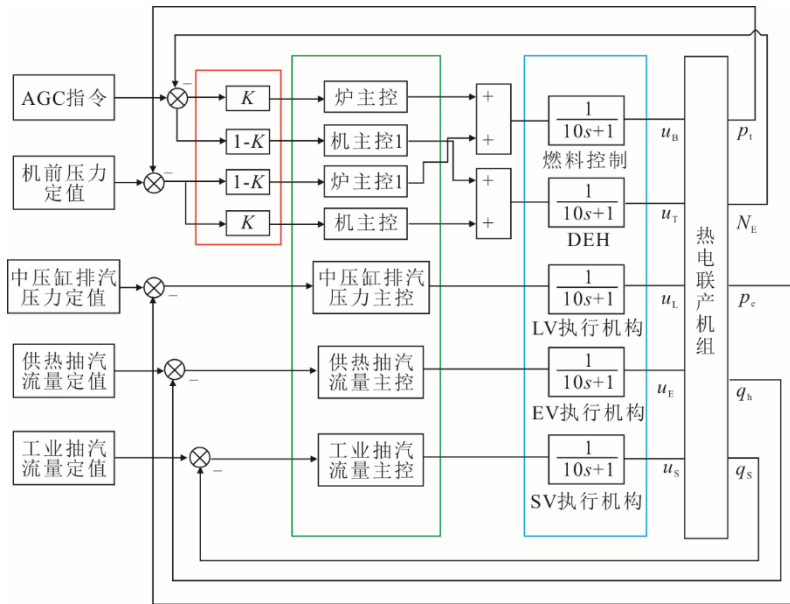


图 4 大范围变工况柔性控制策略结构

Fig.4 Structural diagram of the flexible control strategy under large-scale variable operating conditions

本控制策略中采用 7 个不同的 PID 控制器共同实现五入五出被控对象的柔性控制。其中，不同 PID 参数的求解方法如下：

1) 中压缸排汽压力、供热抽汽流量和工业抽汽流量分别采用不同 PID 进行控制，其控制器参数需要在不同的 K 值下分别进行调节，并综合不同参数的控制效果以得到最佳参数。

2) 锅炉主控和汽轮机主控的参数在柔性因子 $K=1$ 时整定，该参数代表机组工作在“机跟炉”方式下的控制参数。

3) 锅炉主控 1 和汽轮机主控 1 的参数在柔性因子 $K=0$ 时整定，该参数代表机组工作在“炉跟机”方式下的控制参数。

对于 K 值的确定，采用基于灵活性指标的性能评价方法选取不同工况下的最优的 K 值。

4 热电联产机组灵活性评价指标

热电联产机组的灵活性通常指其运行灵活性，在机组高负荷运行时主要体现为机组适应负荷大范围波动的能力，而在机组低负荷运行时则体现为机组保持运行安全性的能力^[20]。本文以文献[21]提出的时域指标性能评价体系为基础，提出衡量热电联产机组运行灵活性的评价指标。此灵活性评价指标将发电功率、供热抽汽流量作为机组电、热负荷适应能力的指标，机前压力作为机组运行安全性的评价指标。考虑到不同负荷下机组灵活性评价的侧重点不同，在定义灵活性评价指标时加入权重

因子，使该评价指标可以更好地表征机组高负荷运行时的负荷适应能力以及低负荷运行时安全性。

4.1 机组电负荷适应能力评价指标

机组的发电功率需要保证其能够尽快适应需求负荷的变化并达到新的稳定状态。因此选择调节时间、最大动态偏差以及误差平方积分作为发电功率性能评价指标的基本计算参数。评价函数为：

$$\eta_N = \lambda_{N1} t_s^* + \lambda_{N2} \delta_{\max \text{err}N}^* + \lambda_{N3} \zeta_{\text{ISEN}}^* \quad (9)$$

式中： η_N 为发电功率性能评价指标； t_s^* 、 $\delta_{\max \text{err}N}^*$ 、 ζ_{ISEN}^* 分别为调节时间、发电功率最大动态偏差以及误差平方积分的理想值与实际值的比值（相对值）； λ_{N1} 、 λ_{N2} 、 λ_{N3} 均为常数。

机组的负荷响应特性可以分为有超调量和无超调量 2 种情况，下面分别进行分析。

1) 负荷响应有超调

根据大量的仿真实验以及机组发电功率在有超调情况下的动态性能指标要求，上述参数的取值为： $\lambda_{N1}=0.15$ ， $\lambda_{N2}=0.425$ ， $\lambda_{N3}=0.425$ ， $t_s^*=1000/t_s$ ， $\delta_{\max \text{err}N}^*=4/\delta_{\max \text{err}N}$ ， $\zeta_{\text{ISEN}}^*=8/(\zeta_{\text{ISEN}})^{0.2}$ 。其中： t_s 、 $\delta_{\max \text{err}N}$ 、 ζ_{ISEN} 分别表示调节时间、发电功率最大动态偏差以及误差平方积分的实际值。

2) 负荷响应无超调

当负荷响应无超调时，不考虑最大动态偏差，因此相应的权值 λ_{N2} 为 0，此时参数的取值为： $\lambda_{N1}=0.4$ ， $\lambda_{N2}=0$ ， $\lambda_{N3}=0.6$ ， $t_s^*=(1000/t_s)^{0.5}$ ， $\zeta_{\text{ISEN}}^*=5/(\zeta_{\text{ISEN}})^{0.2}$ 。

4.2 机组热负荷适应能力评价指标

供热抽汽的作用是流入热网加热器作为热网的一次热源为用户供热。考虑到热网中的大量管道和换热设备中储存着大量的热量,在供热抽汽流量产生小波动的十几分钟到几十分钟内并不会对用户造成明显影响^[22]。因此供热抽汽流量的控制性能主要取决于其波动大小,一般不需要考虑其是否能快速调节。选用最大动态偏差和误差平方积分作为供热抽汽流量的评价指标:

$$\eta_q = \lambda_{q1} \delta_{\max \text{errq}}^* + \lambda_{q2} \zeta_{\text{ISEq}}^* \quad (10)$$

式中: η_q 为供热抽汽流量性能评价指标; $\delta_{\max \text{errq}}^*$ 、 ζ_{ISEq}^* 分别为供热抽汽流量的最大动态偏差和误差平方积分的理想值与实际值的比值; λ_{q1} 、 λ_{q2} 均为常数, $\lambda_{q1}=0.2$, $\lambda_{q2}=0.8$, $\zeta_{\text{ISEq}}^*=4/(\zeta_{\text{ISEq}})^{1/6}$, $\delta_{\max \text{errq}}^*=15/\delta_{\max \text{errq}}$ 。其中, $\delta_{\max \text{errq}}$ 、 ζ_{ISEq} 分别表示供热抽汽流量的最大动态偏差和误差平方积分。

4.3 机组运行安全性评价指标

机前压力是代表汽轮机和锅炉能量平衡的重要标志,其波动的大小是机组运行安全性的重要判断指标,需要尽量减小压力的动态偏差并限制其变化速率。

在负荷扰动下,机前压力的响应曲线一般呈现衰减震荡特性。因此,选择峰值时间、最大动态偏差、衰减比和误差平方积分作为机前压力性能评价指标的基本计算参数。可以得到机前压力的性能评价指标,即为:

$$\eta_p = \lambda_{p1} t_p^* + \lambda_{p2} \delta_{\max \text{errp}}^* + \lambda_{p3} c_p^* + \lambda_{p4} \zeta_{\text{ISEP}}^* \quad (11)$$

式中: η_p 为机前压力性能评价指标; t_p^* 、 $\delta_{\max \text{errp}}^*$ 、 c_p^* 、 ζ_{ISEP}^* 分别为机前压力在负荷扰动下的峰值时间、最大动态偏差、衰减比以及误差平方积分理想值与实际值的比值(相对值)。

根据火电机组对机前压力动态性能的要求,式(11)中相关参数的取值为: $\lambda_{p1}=0.25$, $\lambda_{p2}=0.15$, $\lambda_{p3}=0.10$, $\lambda_{p4}=0.50$, $t_p^*=350/t_p$, $\delta_{\max \text{errp}}^*=0.25/\delta_{\max \text{errp}}$, $c_p^*=c_p/10$, $\zeta_{\text{ISEP}}^*=10/\zeta_{\text{ISEP}}$ 。其中, t_p 、 $\delta_{\max \text{errp}}$ 、 c_p 、 ζ_{ISEP} 分别表示峰值时间、最大动态偏差、衰减比以及误差平方积分的实际值; λ_{p1} 、 λ_{p2} 、 λ_{p3} 、 λ_{p4} 均为常数。

4.4 机组灵活性评价指标

定义热电联产机组的灵活性评价指标 η 为:

$$\eta = \omega_1 \eta_N + \omega_2 \eta_q + \omega_3 \eta_p \quad (12)$$

式中: ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为 3 种性能评价指标的权重

因子。其取值如下:

1) 发电负荷处于额定发电功率的 75% 以上时,此时控制的重点是发电和供热负荷的适应能力,而不需要考虑安全性问题,且供热负荷的短暂波动不会对用户造成可察觉的影响,因此主要考虑发电负荷的适应能力。此时 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的取值分别为 0.8、0.2 和 0。

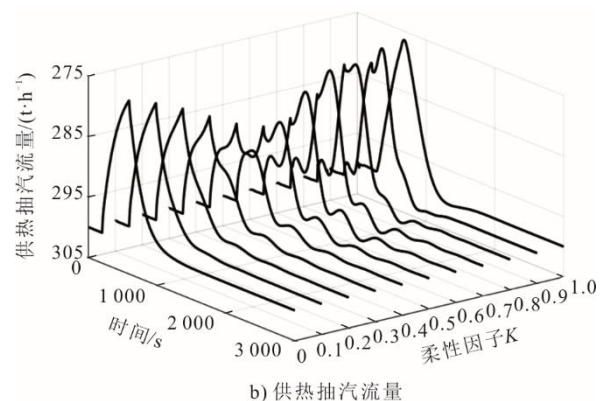
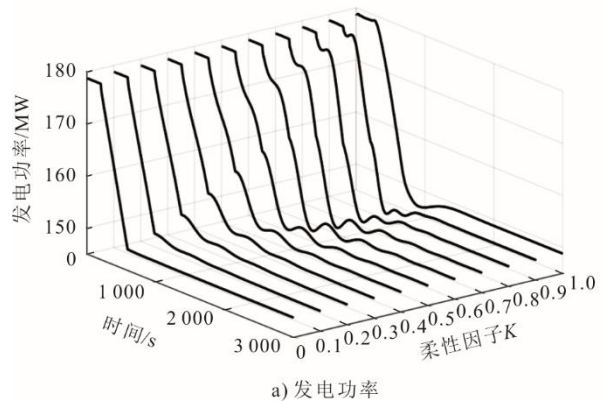
2) 发电负荷处于 50%~75% 额定负荷时,需要综合考虑机组的负荷适应性和安全性,但仍以发电负荷的适应能力为控制重点。 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的取值分别为 0.5、0.3 和 0.2。

3) 发电负荷处于 35%~50% 额定负荷时,锅炉容易出现灭火、水动力安全性降低等问题。此时舍弃机组的负荷适应能力,重点考虑运行的安全性以及深度调峰下机组供热的稳定性。 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的取值分别为 0、0.2 和 0.8。

5 仿真研究

5.1 单一工况控制效果分析

当系统处于额定供热抽汽最小电出力工况,200 s 时在负荷侧加入 30 MW 的扰动(变化速率为 1.5%Pe/min),此时各个输出所对应的响应曲线如图 5 所示。



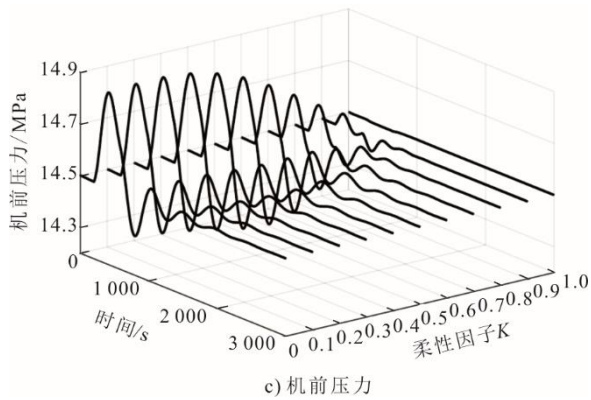


图 5 额定供热抽汽最小电出力工况下的机组主要参数响应曲线

Fig.5 The response curves of main parameters of the unit under the minimum electric output condition with rated heating and steam extraction

由图 5 可以看到，当柔性因子 K 取值为 0~0.3 时发电负荷响应曲线无超调，柔性因子取值为 0.4~1.0 时发电负荷响应曲线存在超调，需要根据有无超调时的参数，采用式(9)分别计算电负荷适应能力评价指标的取值。机组热负荷适应能力评价指标、安全性评价指标和灵活性评价指采用式(10)一式(12)计算，得到机组主要性能指标见表 3。

表 3 不同柔性因子下机组的评价指标
Tab.3 Evaluation indexes of tge unit with different flexibility factors

柔性因子 K	η_N	η_q	η_P	η
0	1.000	0.802	0.573	0.855
0.1	0.958	0.836	0.523	0.834
0.2	0.893	0.877	0.483	0.740
0.3	0.876	0.913	0.645	0.841
0.4	0.863	0.923	0.775	0.863
0.5	0.680	0.899	0.776	0.765
0.6	0.624	0.852	0.824	0.732
0.7	0.560	0.821	0.916	0.710
0.8	0.603	0.816	0.947	0.736
0.9	0.632	0.802	0.989	0.754
1.0	0.646	0.794	1.000	0.761

由表 3 可见，当柔性因子从 0 到 1.0 变化时，机组的响应特性逐步从较好的负荷适应性过渡到较好的安全性，而供热抽汽流量在任意柔性因子下都可以取得比较好的控制效果，当柔性因子取 0.4 时，控制效果达到最优。但是其某一项控制性能并不是单调递增或递减的，具体表现为：在柔性因子为 1.0、0.9、0.8、0.7 时，发电负荷的适应性反而会变差；柔性因子为 0、0.1、0.2 时，机组的运行安全性也会出现变差的情况。

5.2 大范围工况变化时控制效果分析

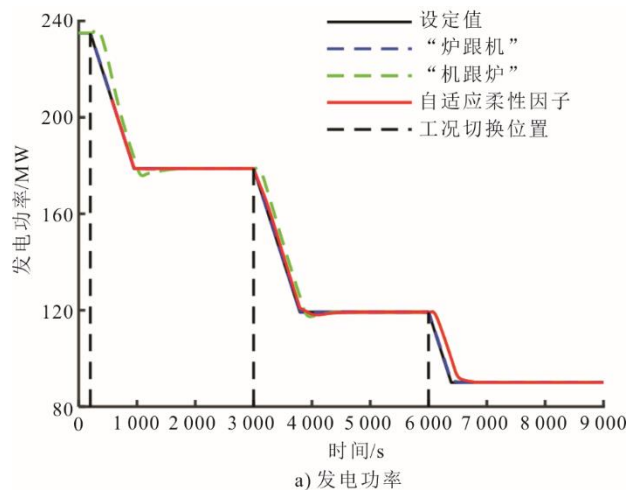
为了满足大范围工况变化时的不同控制要求，本文提出在柔性控制基础上添加随工况变化的自适应柔性因子的控制策略。在确定其取值时，首先采用灵活性评价指标分析不同柔性因子下的控制效果，然后将控制效果最优时的柔性因子作为该工况下自适应柔性因子的取值。

为了验证该控制策略的控制效果，选取机组的 4 个典型工况进行仿真并与传统的“炉跟机”控制和“机跟炉”控制策略进行对比。表 4 为机组不同运行工况的基本参数，其中工况点 1 为额定供热抽汽工况，工况点 2 为额定供热抽汽最小电出力工况，工况点 3 为低压缸切缸后额定供热抽汽最小电出力工况，工况点 4 为低压缸切缸后深度调峰工况。

表 4 不同运行工况的基本参数
Tab.4 Basic parameters of different operating conditions

参数	工况点 1	工况点 2	工况点 3	工况点 4
N_E/MW	235.0	178.8	119.2	90.0
$q_h/(t \cdot h^{-1})$	300.0	300.0	300.0	226.8
p_t/MPa	16.67	14.50	14.17	14.00
p_e/MPa	0.350	0.350	0.350	0.265
$u_B/(t \cdot h^{-1})$	160.00	130.00	98.29	74.29
$u_T/\%$	80.00	74.43	57.78	44.24
$u_L/\%$	55.22	28.47	0	0
$u_E/\%$	100	100	100	100
$u_S/\%$	100	100	100	100

分别在 200、3 000、6 000 s 时进行工况切换，且在工况切换的过程中，机组采用滑压运行，限制发电负荷变化速率为 1.5%Pe/min，自适应柔性因子分别取 0、0.3 和 1.0，可以得到不同控制策略下仿真曲线如图 6 所示。计算得到不同控制策略下机组的评价指标取值，见表 5。



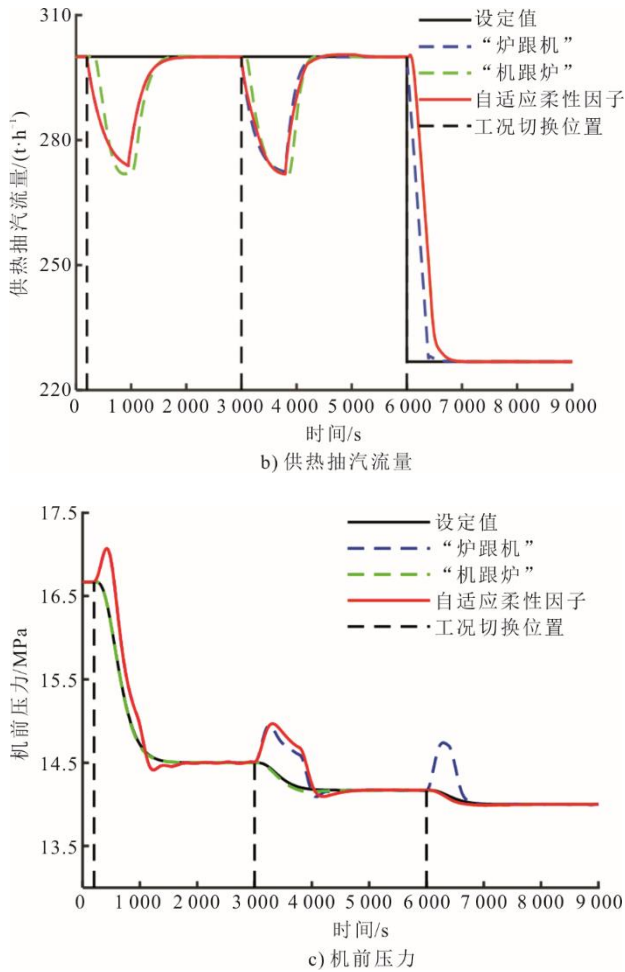


图 6 不同控制策略下机组主要参数响应曲线对比

Fig.6 Comparison of response curves of main parameters of the unit under different control strategies

表 5 不同控制策略下的机组评价指标

Tab.5 Evaluation indexes of the unit under different control strategies

控制策略	工况	η_N	η_i	η_P	η
加入自适应 柔性因子的 柔性控制	1→2	1.000	0.815	0.585	0.963
	2→3	0.974	0.853	0.520	0.847
	3→4	0.614	0.845	1.000	0.969
“炉跟机” 控制策略	1→2	1.000	0.815	0.585	0.963
	2→3	1.000	0.802	0.523	0.845
	3→4	1.000	0.893	0.535	0.607
“机跟炉” 控制策略	1→2	0.632	0.803	1.000	0.666
	2→3	0.683	0.812	1.000	0.704
	3→4	0.614	0.845	1.000	0.969

由表 5 可以得到：当机组工作于“炉跟机”为基础的协调控制方式下时，灵活性评价指标的取值分别为 $\eta=0.963$ 、 0.845 、 0.607 ，机组具有较好的负荷适应性，但是机前压力的波动使得其在低负荷时控制效果较差；当采用以“机跟炉”为基础的协调控制时，灵活性评价指标的取值分别为 $\eta=0.666$ 、

0.704 、 0.969 ，机组在以常规负荷运行的负荷响应特性较差。而加入自适应柔性因子的柔性控制策略在工况变化时灵活性评价指标的取值分别为 $\eta=0.963$ 、 0.847 、 0.969 ，本文控制策略在全工况均可以取得较好的控制效果，满足机组灵活运行的要求。

6 结 论

1) 分析发现机组动态特性主要体现为机组负荷适应能力和运行安全性之间存在矛盾，而且中压缸排汽侧的 3 个通路相互影响。在设计控制系统时，应该根据实际的控制要求，合理选择控制的侧重点。

2) 提出了一种机组灵活性评价指标的计算方法，并将其作为最优柔性因子的选取依据。该灵活性评价指标在高负荷时侧重于机组的负荷适应能力，低负荷时则侧重于机组的运行安全性，可以较好的表征机组的运行灵活性。

3) 针对大范围工况变化的情况，设计了自适应柔性因子，并应用到柔性控制策略中。仿真结果表明，该控制策略可以满足机组不同工况的不同控制目标，符合机组灵活运行的要求。

【参 考 文 献】

[1] 王哮江, 刘鹏, 李荣春, 等. “双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 52-59. WANG Xiaojiang, LIU Peng, LI Rongchun, et al. Research progress and prospects of advanced power generation technology under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 52-59.

[2] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9. SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.

[3] 帅永, 赵斌, 蒋东方, 等. 中国燃煤高效清洁发电技术现状与展望[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 1-10. SHUAI Yong, ZHAO Bin, JIANG Dongfang, et al. Status and prospect of coal-fired high efficiency and clean power generation technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 1-10.

[4] WANG Y C, LOU S H, WU Y W, et al. Flexible operation of retrofitted coal-fired power plants to reduce wind curtailment considering thermal energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1178-1187.

[5] 王漪, 薛永锋, 邓楠. 供热机组以热电调峰范围的研究[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 59-62. WANG Yi, XUE Yongfeng, DENG Nan. Study on heat-load-based peak regulation for cogeneration units[J]. Electric Power, 2013, 46(3): 59-62.

[6] 毕庆生, 李邓超, 朱侃, 等. 基于供热系统热惯性供热机组短时深度参与电网调峰及风电消纳研究[J]. 热能

- 动力工程, 2018, 33(9): 72-78.
- BI Qingsheng, LI Dengchao, ZHU Kan, et al. In-depth grid power peak regulation with heating unit in wind power consumption based on thermal inertia characteristics[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(9): 72-78.
- [7] 牟春华, 居文平, 黄嘉驹, 等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 1-7.
- MOU Chunhua, JU Wenping, HUANG Jiasi, et al. Review and prospect of technologies of enhancing the flexibility of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 1-7.
- [8] 李玲, 刘鑫屏. 新能源大规模并网条件下火电机组深度调峰控制策略优化[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 155-161.
- LI Ling, LIU Xinping. Optimization of depth peak-shaving control strategy for thermal power unit under large-scale grid connection of new energy[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 155-161.
- [9] 张瑞亚, 田亮. 直接能量平衡(DEB)协调控制系统参数整定[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 85-91.
- ZHANG Ruiya, TIAN Liang. Parameters tuning of direct energy balance (DEB) coordinated control system[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44(4): 85-91.
- [10] 于达仁, 翁一武, 王仲奇. 火电单元机组的柔性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002(7): 129-133.
- YU Daren, WENG Yiwu, WANG Zhongqi. A study on flexible control method for a boiler-turbine units[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 129-133.
- [11] 金建涛. 单元机组负荷柔性协调控制系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005: 27-59.
- JIN Jiantao. Research on flexible coordinated control system of unit load[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005: 27-59.
- [12] 董君伊, 孙立, 李东海. 火电单元机组机炉协调柔性自抗扰控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(9): 3503-3512.
- DONG Junyi, SUN Li, LI Donghai. Flexible active disturbance rejection control for boiler-turbine unit[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(9): 3503-3512.
- [13] 张瑞亚. 超低负荷下火电机组协调控制系统优化[D]. 保定: 华北电力大学, 2018: 39-43.
- ZHANG Ruiya. Optimization of coordinated control system for thermal power unit under ultra-low load[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018: 39-43.
- [14] 刘海喆. 超临界供热机组调峰运行控制[D]. 保定: 华北电力大学, 2019: 21-32.
- LIU Haizhe. Peak load regulating operation control of supercritical heating unit[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019: 21-32.
- [15] WANG W, LIU J Z, GAN Z Y, et al. Flexible control of combined heat and power units based on heat power estimation and coordination[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 123: 106261.
- [16] 邢智炜, 骆意, 王立, 等. 超超临界机组柔性快减负荷控制策略的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊1): 204-210.
- XING Zhiwei, LUO Yi, WANG Li, et al. Research and application of flexible RB control strategy for the ultra-supercritical units[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(Suppl.1): 204-210.
- [17] 冯荣荣, 田亮. 柔性 Smith 预估控制在循环流化床机组协调控制系统中的应用设计[J]. 广东电力, 2021, 34(2): 108-114.
- FENG Rongrong, TIAN Liang. Application design of flexible Smith predictive control in coordinated control system of circulating fluidized bed unit[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(2): 108-114.
- [18] 张国斌, 刘永江, 杜鸣, 等. 火电机组的工况自适应协调控制策略[J]. 控制工程, 2021, 28(10): 1939-1945.
- ZHANG Guobin, LIU Yongjiang, DU Ming, et al. Condition-adaptive coordinated control strategy to operation conditions of coal-fired power unit[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(10): 1939-1945.
- [19] 田亮, 冯荣荣. 多热电联产机组建模及热动态耦合特性分析[J]. 动力工程学报, 2022, 42(1): 75-82.
- TIAN Liang, FENG Rongrong. Modeling of multi-cogeneration unit and analysis of thermoelectric dynamic coupling characteristics[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(1): 75-82.
- [20] 潘尔生, 田雪沁, 徐彤, 等. 火电灵活性改造的现状、关键问题与发展前景[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 58-68.
- PAN Ersheng, TIAN Xueqin, XU Tong, et al. Status, critical problems and prospects of flexibility retrofit of thermal power in China[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 58-68.
- [21] 李士哲, 王印松, 张涛, 等. 基于时域指标的负荷控制系统性能评价[J]. 控制工程, 2016, 23(6): 864-869.
- LI Shizhe, WANG Yinsong, ZHANG Tao, et al. Performance assessment of load control system based on time domain indexes[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(6): 864-869.
- [22] JIE P F, TIAN Z, YUAN S S, et al. Modeling the dynamic characteristics of a district heating network[J]. Energy, 2012, 39(1): 126-134.

(责任编辑 杜亚勤)