

文章编号:1006-2467(2025)11-1694-13

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.602

# 基于灵活性改造的火电机组参与快速调频的协调控制方案

张建华, 姚 祎, 赵 思, 王永岳  
(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 随着可再生能源在电力系统中普及,提高火电机组的一次调频能力以抑制电网频率波动是目前需要攻克的一个难题.火电厂的灵活性运行在保证电网安全稳定运行方面发挥重要作用,传统的火电机组一次调频策略采用协调控制系统(CCS)和数字电液调节系统(DEH).凝结水节流(CT)和高加给水旁路节流(HPHFB)是当前改造的主要途径,能改善火电机组快速调频特性.因此,本文结合 CCS、DEH、CT、HPHFB 这 4 种控制方式提出新调频策略.此外,为了提高火电机组的快速调频性能,结合万有引力搜索算法和模糊增益调度策略,提出适用于多工况的火电机组快速调频策略,仿真结果验证了改进控制策略的有效性.

**关键词:** 一次调频;灵活性运行;万有引力搜索算法;模糊增益调度

**中图分类号:** TM611 **文献标志码:** A

## A Coordinated Control Scheme for Fast Frequency Regulation of Thermal Power Units Based on Flexibility Transformation

ZHANG Jianhua, YAO Yi, ZHAO Si, WANG Yongyue

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** With the popularization of renewable energy in the power system, improving the primary frequency regulation capability of thermal power units to suppress grid frequency fluctuations is currently a difficult problem to solve. However, the flexibility transformation of thermal power plants plays an important role in ensuring the safe and stable operation of the power grid. Traditional thermal units use coordinated control system (CCS) and digital electro-hydraulic control systems (DEH). With the transformation of condensate throttling (CT) and high-pressure heaters' feedwater bypass (HPHFB), the fast frequency regulation characteristics of thermal units can also be improved. Therefore, in this paper, a new frequency regulation strategy is proposed by combining CCS, DEH, CT, and HPHFB. Additionally, gravitational search algorithm and fuzzy gain scheduling control strategy are combined to suit multiple operating conditions of thermal units to improve the fast frequency regulation performance of thermal units. The simulation results verify the effectiveness of the improved control strategy.

**Keywords:** primary frequency regulation (PFR); operational flexibility; gravitational search algorithm (GSA); fuzzy gain scheduling

收稿日期:2023-11-27 修回日期:2023-12-12 录用日期:2023-12-26

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1505400)资助项目

作者简介:张建华(1969—),教授,博士生导师,从事多调频资源耦合系统快速调频的协同优化及协调控制研究.

通信作者:赵 思,博士生;E-mail:zhaosi@ncepu.edu.cn.

为应对能源短缺、环境污染等一系列严峻问题,我国风、光等可再生能源总装机容量持续增长。然而,其发电的波动性和间歇性给电网频率稳定和安全带来更大挑战<sup>[1-2]</sup>。一次调频(primary frequency regulation, PFR)对于维持频率稳定性、提高应对系统的功率突变能力具有重要作用<sup>[3]</sup>。当电网频率偏离目标频率 50 Hz 时,PFR 可使机组快速改变出力,保证电网频率的稳定<sup>[4]</sup>。虽然火力发电作为我国主要的发电方式,基本上具备一次调频的能力,但在实际运行中,受到运行工况、较大扰动等因素的影响,调频效果也受到限制。有效的控制策略可以增强火力发电机组的灵活性和调节能力,提高其一次调频能力,是确保电网运行安全的有效手段。

协调控制系统(coordinated control system, CCS)和数字电液调节系统(digital electro-hydraulic control system, DEH)是火力发电参与系统一次调频的两种主要方式<sup>[5-6]</sup>,其中 DEH 的频率响应速度快,直接针对频率变化调节有功输出,但容易产生过调;CCS 控制方式根据频率偏差转化为有功功率差额,叠加到给定有功设定值上,但响应速度远不如 DEH 控制方式快。因此,采用 CCS 与 DEH 共同调频的方法,可以结合两者优点提升火电机组调频能力。文献[7]中通过基于 CCS 和 DEH 协调控制的燃煤机组 PFR 能力实时预测,及时改变燃煤机组的运行参数和设备运行方式,避免了频率变化时一次调频能力不足的情况。文献[8]中建立了径向基函数神经网络来预测 CCS 和 DEH 协调控制下的火电机组一次调频能力。

火电机组具有较大的惯性时间常数,导致机组调频响应速度慢、控制精度低,需研究更多高效、经济的快速调频技术以提高机组的快速负荷响应能力。凝结水节流(condensate throttling, CT)和高加给水旁路节流(high-pressure heaters' feedwater bypass, HPHFB)是当前火电机组灵活性改造的主要途径,都是通过启动发电机组中的蓄热装置,来进一步提高对频率变化的快速响应能力。文献[9]中以 1 台 350 MW 热电联产机组为对象研究 10 种工况下不同 CT 流量下的动态模型。文献[10]中发现 CT 会对机组的热效率产生显著影响。对于 HPHFB,虽然其负荷响应速度没有凝结水节流快,但能有效提升机组的输出功率。文献[11]中利用有限元分析方法计算和分析 HPHFB 措施下的热机械应力,为燃煤发电厂在灵活运行期间的安全提供了数据指导。文献[12]中评估了一次调频过程中包括 HPHFB 在内的多种灵活性措施的运行效率。为了提升机组

的负荷跟踪能力,文献[13]中在建立描述给水旁路静态和动态特性的数学模型后,提出结合给水旁路的优化控制策略。

针对整个区域电网,如何根据精细成本和中长期电量评估科学规划灵活性改造容量,成为地区能源管理部门和火电厂共同关注的关键问题。上述研究验证了 CT、HPHFB 是提高火电机组灵活性的有效手段,但其对火电机组的调频效果有待研究。因此,如何同时利用机组的灵活性改造技术辅助原有火电机组一次调频策略成为火电机组快速调频的关键问题。本文提出一种将基于 CT、HPHFB 的灵活性改造技术与 CCS 和 DEH 结合的火电机组参与快速调频的协调控制策略,可弥补 CCS 和 DEH 调频的不足,进一步提高频率响应速度和精度。

除了对火电机组一次调频控制策略的设计外,控制器和死区等参数的选取将直接决定一次调频的动态响应和火电机组出力,进而影响系统调频效果和稳定运行。以往的参数结果多基于经验和工程实践所得,存在一定局限性,特别是针对不同火电机组在实际运行中的各类工况。应用先进的智能优化算法能够更快速、精确地找到最佳参数组合,从而提升调频效果并确保系统的稳定运行。文献[14]中利用分数阶鱼类迁移优化算法来调整比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制器参数,并通过实验证明该算法调整的 PID 具有优越的鲁棒性和控制性能。文献[15]中利用改进粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法优化 PID 参数实现电力系统的二次调频,提升系统频率稳定性。文献[16]中采用基于自适应布谷鸟搜索算法的分数阶 PID 控制器参数整定算法,提高算法收敛速度和计算精度。万有引力搜索算法(gravitational search algorithm, GSA)<sup>[17]</sup>通过考虑与适应度值成正比的粒子所经历的吸引力来更新其位置和速度<sup>[18]</sup>,是一种无记忆算法,缺乏相关的历史经验信息。相反,PSO 可以利用粒子自身的历史经验和群体历史经验进行更新,但其认为适应度值影响较小,并且更新评估与解本身的优劣程度无关。因此,本文结合 PSO 与 GSA 形成一种基于团队合作的 GSA 进行参数寻优<sup>[19]</sup>,提升当前工况下 CT 和 HPHFB 的控制性能。

然而,当机组大范围、变工况运行时,被控对象的非线性特性可能会导致动态响应表现较差,甚至出现不稳定的情况。增益调度控制可以根据系统中调度变量的变化提供自适应控制策略,提升控制系统的鲁棒性。针对增益调度控制实现过程中的时变

时滞和脆弱性问题,文献[20]中在增益调度控制基础上引入马尔可夫跳变模型来描述多个网络连接之间的随机变化,较好地解决了系统运行过程中的时滞和脆弱性问题.文献[21]中设计风电机组的模糊增益调度比例-积分(PI)变桨距控制器,实现风电机组的最大功率跟踪.文献[22]中提出基于模糊增益调度的凝结水节流多回路控制系统,有效弥补机组变负荷初期响应速率慢的缺点.

综上,本文针对火电机组在大范围、变工况运行条件下一次调频动态响应慢、控制效果差的问题,提出结合 CCS、DEH 与 CT 和 HPHFB 的协调控制系统,利用 GSA 优化控制器参数,同时采用模糊增益调度控制来解决动态响应能力差的问题,进而提升火电机组的快速调频能力,避免可再生能源并网时引起的电网频率波动.

## 1 基于灵活性改造的火电机组快速调频控制系统设计

以辽宁庄河两台超临界 600 MW 火电机组为研究对象进行机组运行的灵活性改造,600 MW 超临界直流锅炉机组如图 1 所示.图中:GEN 为发电机; $p_T$  为主蒸汽压力; $C_V$  为主蒸汽阀门开度; $D_{wc}$  为凝结水改变后的流量; $D_{fw}$  为给水流量; $a$  为从给水流量中分配到旁路给水流量的比例; $C_{V_{hph}}$  为高加给水旁路阀门开度; $D_i$  为锅炉给水泵汽机的抽汽量; $D_b$  为第  $b$  个加热器的抽汽量; $P$  为汽轮机输出功率; $r_B$  为给煤率.锅炉出口蒸汽参数为 26.25 MPa/605 °C/603 °C,汽轮机采用由哈尔滨汽轮机厂生产制造的一次再热、凝汽式 600 MW 超临界汽轮机,该汽轮机主要参数如表 1 所示.

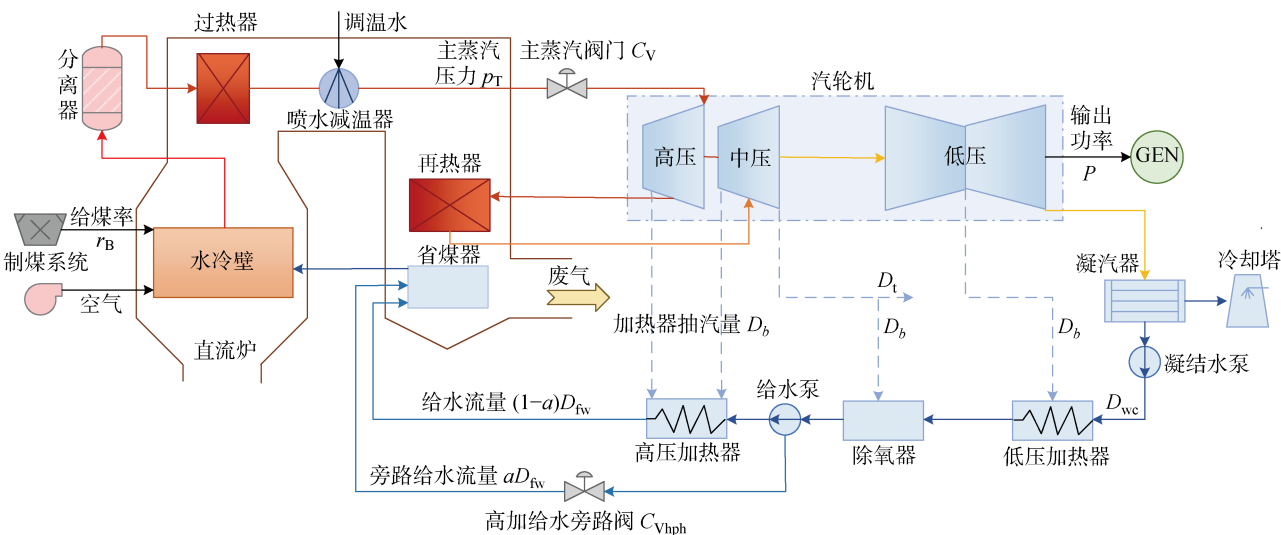


图 1 600 MW 超临界直流炉机组

Fig. 1 600 MW supercritical once-through boiler unit

表 1 600WM 超临界机组主要参数

Tab. 1 Main parameters of 600WM supercritical unit

参数名称	取值
$p_T$ /MPa	25
额定主蒸汽温度/°C	600
额定再热蒸汽温度/°C	600
再热蒸汽压力/MPa	4.27
额定功率/MW	600
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 000
额定主蒸汽流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	763
改造前机组爬坡速率/(MW·min <sup>-1</sup> )	6~9

为了实现对火电机组快速调频的快速、有效控制,火电机组在 CCS、DEH 协同控制的基础上,增加了凝结水节流和高加给水旁路节流的控制实现机组的灵活性改造.将凝结水节流技术的快速响应优势与高加给水旁路节流技术有效增加机组出力的优点相结合,可减少汽轮机侧的用汽,弥补释放锅炉侧节流压降不足问题,从而快速增大机组发电出力,提升机组运行灵活性.由于汽轮机抽汽量的大小取决于汽轮机抽汽点的压力与回热加热器内汽侧压力的压差,所以可通过凝结水和高加给水旁路节流实现火电机组一次调频<sup>[23]</sup>,使灵活性改造后的机组爬坡率提高到额定容量的 3%,机组的最低技术出力达到额定容量的 35%.

## 2 基于模糊增益调度的火电机组快速调频优化策略

经过灵活性改造后的火电机组快速调频控制系统仍存在以下几点问题:①系统的被控对象具有非线性,相关参数的设定直接影响系统的控制性能,并会随着运行工况的变化而变化;②单一典型工况下的线性模型不能良好地呈现控制系统在变负荷过程中的动态特性;③各工况下数学模型设计的控制器也仅适用于相应工况点以及附近小范围内工况。

当机组大范围变工况运行时,被控对象呈现的非线性必然导致动态品质恶化.需要利用智能优化算法得到当前工况下火电机组灵活性改造的控制器和限幅的最优参数,以机组运行工况作为调度变量,利用模糊增益调度控制方法为不同工况下火电机组灵活性改造环节的控制器分配相应权重,并与控制器的输出进行线性组合,提出基于增益调度的火电机组快速调频优化策略,以保证系统在变工况下依然能有良好控制效果。

### 2.1 基于 GSA 的控制器参数优化

所提火电机组快速调频控制系统包括基于 GSA 参数优化的凝结水节流和高加给水旁路节流最优控制器、CCS 和 DEH 的协同控制、锅炉-汽轮机

系统和一次调频过程,其中凝结水节流和高加给水旁路节流控制环节是火电机组灵活性改造的部分.凝结水节流和高加给水旁路节流控制环节的传递函数分别可表示为  $G_{ct}(s) = K_{p1} + T_i/s, G_{hphfb}(s) = K_{p2} + T_d s$ ,其中: $s$ 为拉普拉斯变换域中的频率; $K_{p1}$ 、 $T_i$ 分别为 CT 控制环节中 PI 控制器的比例、积分时间常数; $K_{p2}$ 、 $T_d$ 分别为 HPHFB 控制环节中 PD 控制器的比例、微分时间常数.系统采用基于智能算法的 CT/HPHFB 最优控制器和 CCS、DEH 的协调控制实现快速调频.采用 GSA 分别计算火电机组各工况点下运行时的性能指标  $J$ ,将  $J$  作为优化算法中的适应度,考虑机组运行约束,整定出  $K_{p1}$ 、 $T_i$  和限幅  $C_{max, Vct}$  以及  $K_{p2}$ 、 $T_d$  和限幅  $C_{max, Vhph}$ ,从而获取对应各个工况点的最优控制器.基于 GSA 设计控制器和限幅的方案如图 2 所示.图中: $u_{CT}$ 、 $u_{HPHFB}$ 、 $u_{DEH}$ 、 $u_{CCS}$  分别为凝结水节流控制环节输出的一次调频控制信号、高加给水旁路节流控制环节输出的一次调频控制信号、传统 DEH 输出的一次调频控制信号和传统 CCS 输出的一次调频控制信号; $C_{Vct}$  为凝结水节流阀阀门开度; $B_0$  为锅炉主控的输出信号; $T_0$  为汽轮机主控的输出信号; $p_{T0}$  为主蒸汽压力参考值; $p_1$  为汽轮机调节级压力; $P_{e0}$ 、 $P_{e,deh}$  分别为发电机功率的参考值和测量值; $\omega$ 、 $\omega_0$ 、 $\Delta\omega$  分别为发电机

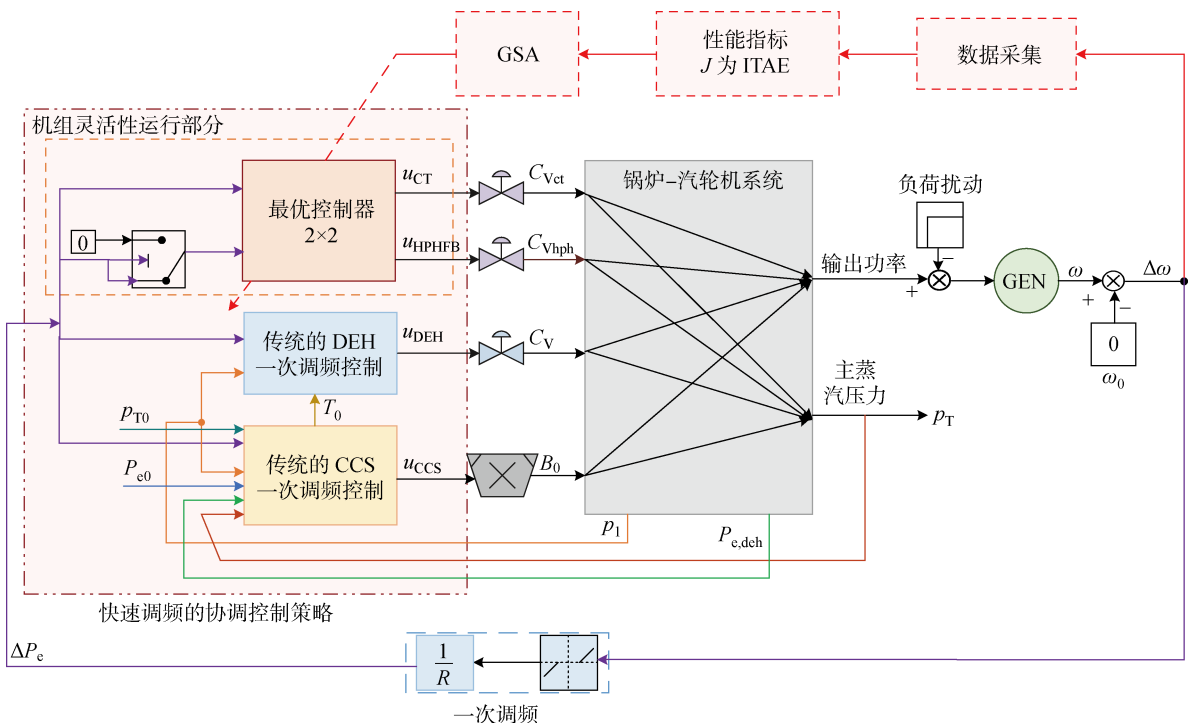


图 2 基于 GSA 的控制器和限幅优化方案图

Fig. 2 Schematic diagram of optimizing controller based on GSA

转速、参考值和转速偏差;  $R$  为火电机组的调差系数;  $\Delta P_c$  为一次调频环节输出的功率变化量; ITAE 为时间乘以绝对误差的积分, 是性能指标。

**2.1.1 目标函数与约束条件** 为了提高一次调频的快速性和准确性, 以 ITAE 作为目标函数, 并在满足一定约束条件的情况下, 找到实现目标函数的最优解, 其表达式如下:

$$\min J = \int_0^t |\Delta f| dt \quad (1)$$

式中:  $\Delta f$  为系统频率偏差;  $t$  为时间. 为保证机组正常运行, 制定了以下约束条件<sup>[24]</sup>:

(1) 火电机组出力约束. 由于操作灵活性降低了机组最小技术输出, 扩大了有效输出范围, 所以约束保证了机组的输出 ( $P$ ) 在最小技术输出和额定输出的范围内:

$$(1-x)P_{\min} + x\hat{P}_{\min} \leq P \leq P_{\max} \quad (2)$$

式中:  $x$  表示机组是否进行了灵活性改造,  $x=1$  代表进行了灵活性改造,  $x=0$  表示尚未实施灵活性改造;  $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  分别为机组改造前的额定出力和最小技术出力;  $\hat{P}_{\min}$  为机组改造后的最小技术出力。

(2) 火电机组爬坡速率. 该约束保证机组前后时刻的功率不超过机组的最大爬坡速率:

$$P(t) - P(t-1) \leq P_c + x(\hat{P}_c - P_c) \quad (3)$$

式中:  $P_c$  和  $\hat{P}_c$  分别为火电机组改造前后的最大爬坡功率。

(3) 灵活性改造的幅度限制. 为了保证机组运行的安全性和稳定性, 分别对凝结水节流和高加给水旁路节流的流量阀门开度进行限制:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq C_{Vct} \leq C_{\max, Vct} \\ 0 \leq C_{Vhph} \leq C_{\max, Vhph} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

**2.1.2 万有引力搜索算法** GSA 将优化问题的解视为一组在空间运行的粒子, 它们之间通过万有引力相互作用, 重力导致所有粒子向质量更大的物体, 即性能更高的物体整体移动. 对于一个最小化问题, 这些粒子的质量被粒子的性能所替代, 即在位置  $(x_1, x_2)$  处目标函数值  $f_{obj}$  越小, 粒子的质量就越大, 如图 3 所示. 为了简化计算, 假设主动、被动引力质量与惯性质量相等, 则每个粒子的标准化质量  $M_i$  由下式计算得到:

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i, \quad i = 1, 2, \dots, N_{pop} \quad (5)$$

$$m_i(t) = \frac{f_{fit,i}(t) - f_{worst}(t)}{f_{best}(t) - f_{worst}(t)} \quad (6)$$

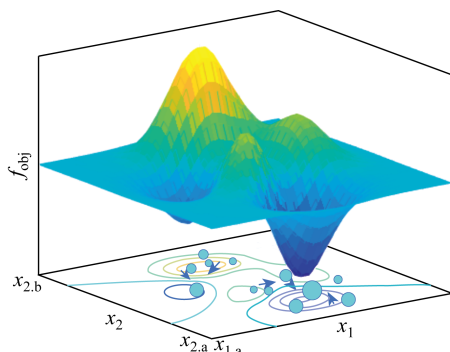


图 3 最小化问题中对象的质量计算

Fig. 3 Mass calculation of objects in a minimization problem

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_j m_j(t)}, \quad 0 \leq M_i(t) < 1 \quad (7)$$

式中:  $M_{ai}$ 、 $M_{pi}$ 、 $M_{ii}$  分别为第  $i$  个粒子的主动引力质量、被动引力质量和惯性质量;  $N_{pop}$  为粒子总数, 即种群规模;  $m_i(t)$ 、 $m_j(t)$  分别为第  $i$ 、 $j$  个粒子在  $t$  时刻的惯性质量;  $f_{fit,i}(t)$  为第  $i$  个粒子的适应度函数值, 本文采用目标函数作为适应度函数;  $t$  时刻,  $N_{pop}$  个粒子中适应度值最优和最差值分别由  $f_{best}(t)$  和  $f_{worst}(t)$  表示. 对于一个最小化问题,  $f_{best}(t)$  和  $f_{worst}(t)$  定义为

$$\left. \begin{aligned} f_{best}(t) &= \min_{i=1,2,\dots,N_{pop}} f_{fit,i}(t) \\ f_{worst}(t) &= \max_{i=1,2,\dots,N_{pop}} f_{fit,i}(t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

假设在一个  $N$  维的搜索空间中, 第  $i$  个粒子的位置为

$$\mathbf{X}_i = [x_{i,1} \quad x_{i,2} \quad \dots \quad x_{i,N}] \quad (9)$$

则在  $t$  时刻, 第  $j$  个粒子作用在第  $i$  个粒子上的引力大小可以定义为

$$F_{ij,n}(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) + M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (x_{j,n}(t) - x_{i,n}(t)), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中:  $R_{ij}(t)$  为这两个粒子之间的欧氏距离,

$$R_{ij}(t) = \|\mathbf{X}_j(t) - \mathbf{X}_i(t)\| \quad (11)$$

为了避免  $R_{ij}(t) = 0$  导致分母为 0 的情况, 在  $R_{ij}(t)$  中添加一个很小的常数项  $\epsilon$ ;  $G(t)$  为万有引力常数, 是关于时间的常数项, 随着时间的增加  $G(t)$  的值逐渐收敛到万有引力常数初始值  $G_0$ . 定义  $G(t)$  如下:

$$G(t) = G_0 e^{-\frac{\alpha t}{t_{\max}}} \quad (12)$$

式中:  $\alpha$  为用来控制算法搜索速度和精度的常数,

$\alpha > 0$ ;  $G_0$  根据搜索空间的范围来确定;  $t_{max}$  为最大迭代时间.

GSA 算法引入随机特性,使得算法搜索更加合理,此时  $F_{i,n}(t)$  的计算公式更新如下:

$$F_{i,n}(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^m r_j F_{ij,n}(t) \quad (13)$$

式中:  $r_j$  为  $[0, 1]$  之间的随机数.

根据牛顿第二定理,第  $i$  个粒子在第  $n$  维上的加速度如下:

$$a_{i,n}(t) = \frac{F_{i,n}(t)}{M_{ii}(t)} \quad (14)$$

再根据经典力学,分别更新粒子的位置和速度:

$$x_{i,n}(t+1) = x_{i,n}(t) + v_{i,n}(t+1) \quad (15)$$

$$v_{i,n}(t+1) = r_i v_{i,n}(t) + a_{i,n}(t) \quad (16)$$

GSA 在迭代更新过程中缺乏历史经验信息,因此,可以利用粒子群算法中粒子自身的历史经验和群体历史经验来更新其位置和速度,从而提高参数寻优的精度. 速度和位置更新公式可分别改为

$$v_{i,n}(t+1) = \omega r_i v_{i,n}(t) + c_1 r_1 (x_{best,i,n} - x_{i,n}(t)) + c_2 r_2 (x_{best,g,n} - x_{i,n}(t)) + a_{i,n}(t) \quad (17)$$

$$x_{i,n}(t+1) = x_{i,n}(t) + v_{i,n}(t+1) \quad (18)$$

式中:  $x_{best,i}$  为个体极值;  $x_{best,g}$  为群体极值;  $\omega$  为非负惯性权重;  $c_1$ 、 $c_2$  分别为个体、社会学习因子.

GSA 的运算流程如图 4 所示. 按照优化算法流程,首先对算法中的参数进行初始化. GSA 的初始参数设定值如表 2 所示. 通过仿真得到 30%、50%、75% 和 90% 工况下的控制器参数和限幅环节的设定值如表 3 所示.

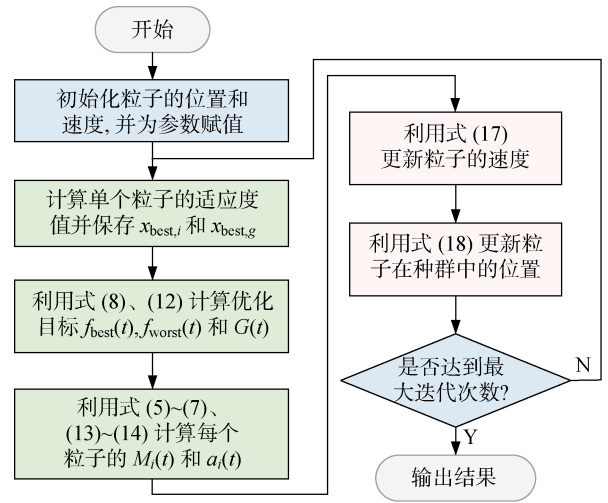


图 4 GSA 流程

Fig. 4 Flow chart of GSA

表 2 GSA 初始参数设定

Tab. 2 Initial parameter setting of GSA

参数	取值
$N_{pop}$	20
迭代次数 $K$	15
$c_1$	2
$c_2$	2
$\alpha$	3
$G_0$	2
优化参数个数 $N_{opt}$	6
粒子寻优上限 $p_{pop,max}$	[20 5 0.3 10 20 0.12]
粒子寻优下限 $p_{pop,min}$	[0 0 0 0 0 0]
寻优速度上限 $v_{max}$	[1 0.1 0.01 0.1 1 0.01]
寻优速度下限 $v_{min}$	[-1 -0.1 -0.01 -0.1 -1 -0.01]
采样时间 $T_s$	0.1

表 3 不同工况下 GSA 优化后的参数设定值

Tab. 3 GSA optimized parameter setting values under different working conditions

工况	CT				HPHFB			
	$K_{p1}$	$T_i$	传递函数	限幅	$K_{p2}$	$T_d$	传递函数	限幅
30%	17.907 0	1.004 8	$\frac{17.907 0(s+0.995 2)}{s}$	[0 0.247 4]	8.226 5	22.286 1	$8.226 5+183.336 6s$	[0 0.118 6]
50%	17.901 1	23.364 5	$\frac{17.901 1(s+0.042 8)}{s}$	[0 0.216 4]	9.087 0	19.588 9	$9.087 0+178.004 3s$	[0 0.108 2]
75%	17.549 9	49.751 2	$\frac{17.549 9(s+0.020 1)}{s}$	[0 0.219 1]	9.045 3	19.720 7	$9.045 3+178.379 6s$	[0 0.118 4]
90%	17.348 8	11.520 7	$\frac{17.348 8(s+0.086 8)}{s}$	[0 0.212 8]	9.942 5	19.929 6	$9.942 5+198.150 0s$	[0 0.119 6]

## 2.2 模糊增益调度控制

将火电机组不同工况下的 CT/HPHFB 灵活性改造环节分别作为一个子控制器,增益调度控制可以通过子控制器的参数化和结构化,建立反映控制

器参数和结构要求的全局控制器网络. 采用该方法得到的全局控制器具有离线计算量相对减少和集中的特点,同时又保证非典型工况点处的闭环控制性能以及在各典型工况点来回切换时控制系统的平滑

过渡。

基于模糊增益调度的 CT/HPHFB 快速调频结构如图 5 所示。控制方式主要由模糊增益调度控制器、CT/HPHFB 全局控制器、锅炉-涡轮系统和一次调频过程 4 部分组成。模糊增益调度作为上级控制器，以不同运行工况  $\bar{N}$  作为调度变量，分配下级子控制器的输出权重  $a_i$ ，基于智能优化算法的多工况子控制器输出调节量  $u_i^* = [u_{CT,i}^* \quad u_{HPHFB,i}^*]^T$  与对

应工况的权重加权求和，集成为一个适用于可变工况的全局控制器，生成适用于当前工况的调节量  $u_i = [u_{CT,i} \quad u_{HPHFB,i}]^T$ ，即凝结水/高加给水旁路节流环节的全局控制器输出。不同运行工况下的 PID<sub>1</sub>、PID<sub>2</sub>、PID<sub>3</sub>、PID<sub>4</sub> 控制器和相应的限幅环节分别对应 2.1 节中通过 GSA 算法得到的 30%、50%、75%、90% 工况下的凝结水/高加给水旁路节流环节的控制参数和限幅。

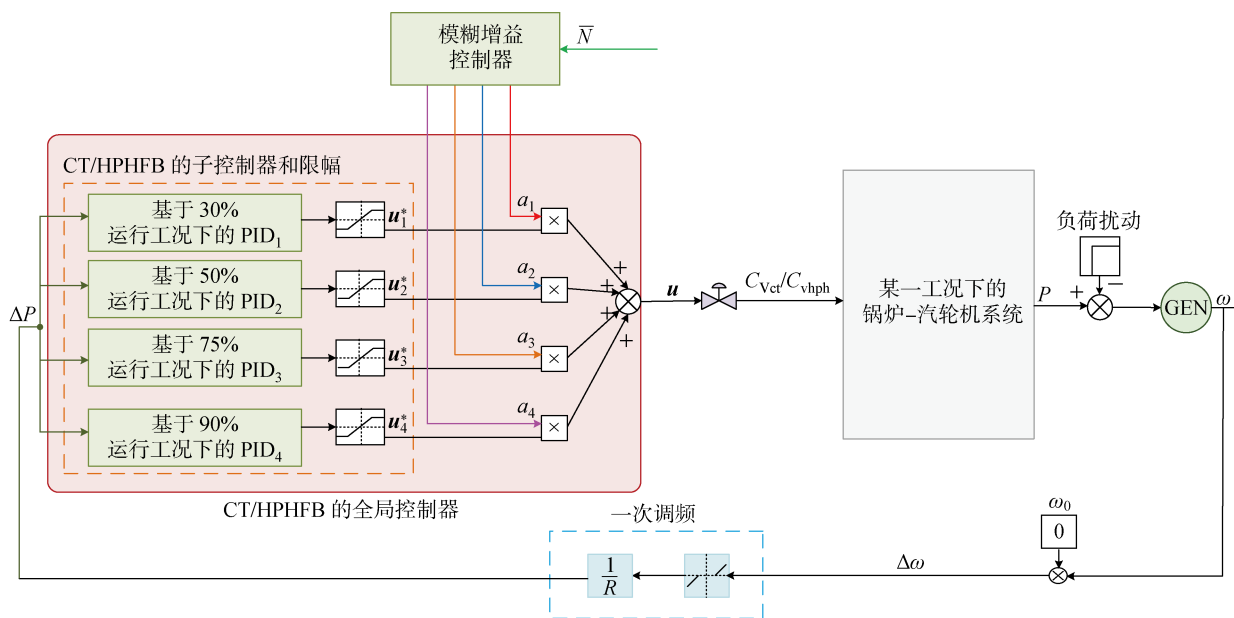


图 5 基于模糊增益调度的 CT/HPHFB 的一次调频控制结构

Fig. 5 Structure of PFR control of CT/HPHFB based on fuzzy gain scheduling

为实现协调控制系统的增益调度控制，保证增益调度在各工况点间切换时系统平滑过渡，将模糊增益控制器的调度变量  $\bar{N}$  的论域设定为  $d \in [0, 0.9]$ ，并定义 4 个模糊子集  $\{B, L, M, H\}$ ，各个模糊子集的隶属度函数分别采用如下所示的数学表达式表示：

$$B = \begin{cases} \frac{d}{0.295} & 0 \leq d < 0.295 \\ 1 & 0.295 \leq d < 0.305 \\ \frac{0.495 - d}{0.19} & 0.305 \leq d < 0.495 \\ 0 & d \geq 0.495 \end{cases} \quad (19)$$

$$L = \begin{cases} 0 & 0 \leq d < 0.305 \\ \frac{d - 0.305}{0.19} & 0.305 \leq d < 0.495 \\ 1 & 0.495 \leq d < 0.505 \\ \frac{0.745 - d}{0.24} & 0.505 \leq d < 0.745 \\ 0 & d \geq 0.745 \end{cases} \quad (20)$$

$$M = \begin{cases} 0 & d < 0.505 \\ \frac{d - 0.505}{0.24} & 0.505 \leq d < 0.745 \\ 1 & 0.745 \leq d < 0.755 \\ \frac{0.895 - d}{0.14} & 0.755 \leq d < 0.895 \\ 0 & d \geq 0.895 \end{cases} \quad (21)$$

$$H = \begin{cases} 0 & d < 0.755 \\ \frac{d - 0.755}{0.14} & 0.755 \leq d < 0.895 \\ 1 & 0.895 \leq d \leq 0.9 \end{cases} \quad (22)$$

在  $t$  时刻，工况为  $\bar{N}$  时，CT/HPHFB 环节的全局控制器输出表示为

$$u_i = \sum_{l=1}^4 k_l(\bar{N}(t)) u_i^*, \quad 0 \leq k_l \leq 1, \quad \sum_{l=1}^4 k_l = 1 \quad (23)$$

与工况相关的各子控制器输出权重的模糊推理规则如表 4 所示，表中 S、M、B 分别表示小、中、大。

表 4 模糊推理规则  
Tab. 4 Fuzzy inference rules

$\bar{N}$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
B	B	S	S	S
L	S	B	S	S
M	S	S	B	S
H	S	S	S	B

### 3 仿真验证

#### 3.1 基于灵活性改造的火电机组快速调频仿真

为验证火电机组灵活性改造后的控制效果,分别对 CCS+DEH、CCS+DEH+CT、CCS+DEH+HPHFB 以及 CCS+DEH+CT+HPHFB 这 4 种快速调频方式进行仿真验证,机组在 90% 工况下运行 1 200 s. 考虑机组运行的安全性,高加给水旁路节流和凝结水节流控制仅在调频初期作用 120 s,并且将凝结水节流阀和高加给水旁路的阀门最大开度限制在 50%. 假设系统在 100 s 时受到如图 6 所示的负荷阶跃扰动,得到 4 种控制方式下的主蒸汽压力变化曲线、功率变化曲线以及频率变化曲线对比图分别如图 7~9 所示.

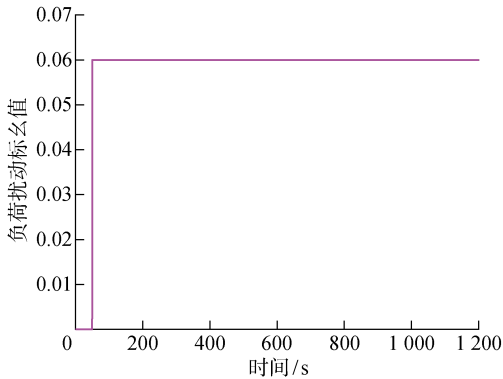


图 6 6%的负荷扰动变化曲线

Fig. 6 Variation of 6% load disturbance

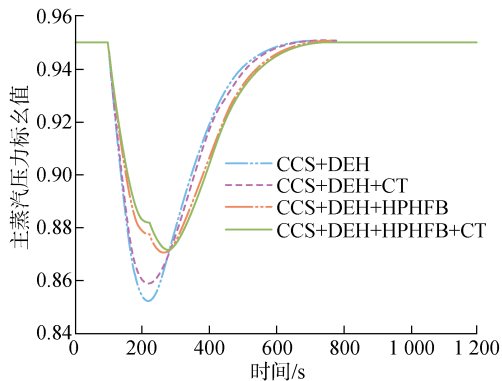


图 7 主蒸汽压力变化曲线

Fig. 7 Variation of main steam pressure

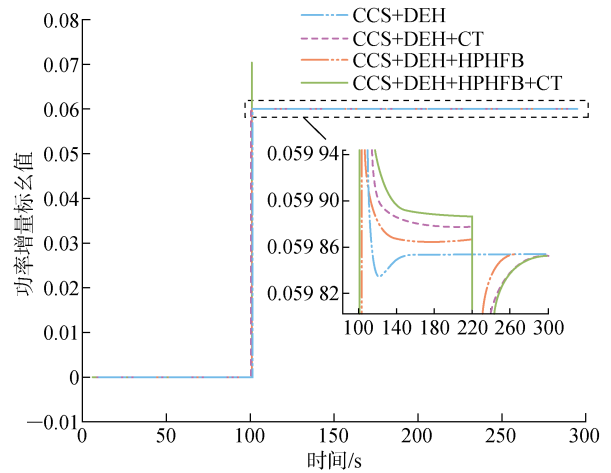


图 8 功率增量变化曲线

Fig. 8 Variation of power increment

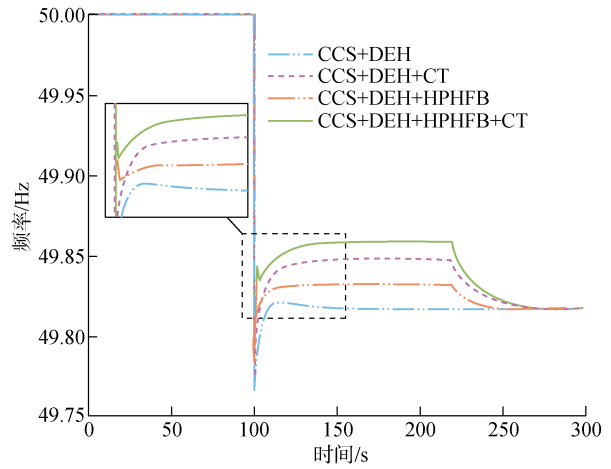


图 9 频率变化曲线

Fig. 9 Variation of frequency

由图 7 可见 CCS+DEH 的控制方式对主蒸汽压力产生的影响最大,其次是 CCS+DEH+CT 的控制方式. 有 HPHFB 参与影响较小,这是由于 HPHFB 利用汽侧蓄热相对更多,从而减少了对锅炉侧蓄热的影响. 由于 CCS 的作用,主蒸汽压力在 200 s (CCS+DEH、CCS+DEH+CT) 或者 300 s 之后 (CCS+DEH+HPHFB、CCS+DEH+HPHFB+CT) 开始回升,直到大约 800 s 后趋于稳定.

由图 8 可知 CCS+DEH+HPHFB+CT 产生的功率增量最大,其次是 CCS+DEH+HPHFB、CCS+DEH+CT 和 CCS+DEH. 在 220 s 去除 HPHFB 和 CT 后,功率增量逐渐恢复到 CCS+DEH 控制方式的值. 图 9 中频率变化曲线均能在 60 s 前恢复稳定,满足火电机组的调频要求,并且在 CCS+DEH+CT 和 CCS+DEH+HPHFB+CT 控制方式下频率变化曲线具有较快的响应速度,而

在 CCS+DEH+HPHFB 和 CCS+DEH+HPHFB 作用下两条曲线具有较小的稳态偏差。由此可见, CCS+DEH+HPHFB+CT 快速调频效果最佳。

### 3.2 基于模糊增益调度控制的火电机组快速调频仿真

由于采用了模糊增益调度控制器,所以所提基于灵活性改造的火电机组参与快速调频的协调控制系统适用范围从单一工况点扩展为 30%~90% 工况范围。设置两种场景来验证基于灵活性改造火电机组的快速调频的协调控制系统在变工况运行情况下的有效性。场景 1 中,系统受到电网侧 +6% 负荷的干扰;场景 2 中,系统受到电网侧 -6% 负荷的干扰。具体如下。

场景 1: 系统受到电网侧 6% 的升负荷扰动。初始工况设置为 40%, 在该工况下稳定运行 50 s 后, 加入 6% 的负荷扰动。此时, 工况以每分钟增长 3% 的速度逐渐上升到 46% 后在该工况下继续稳定运行, 实际调频过程中只在调频初期引入 CT 和 HPHFB 的节流控制, 它们的动作时间设置为 120 s。测试的总持续时间为 1 200 s。工况变化曲线如图 10 所示, 负荷扰动变化曲线如图 11 所示。

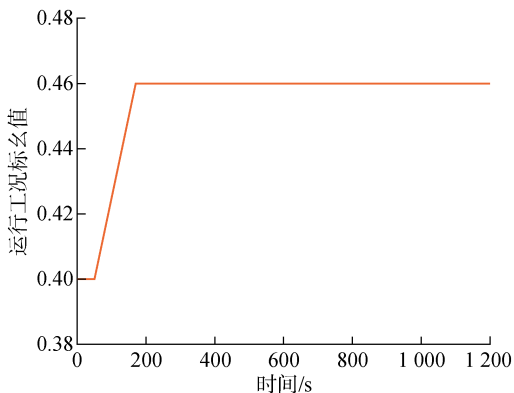


图 10 场景 1 运行工况变化曲线

Fig. 10 Variation of operating conditions in Scenario 1

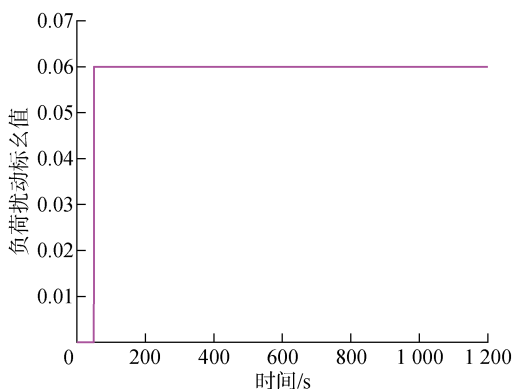


图 11 +6% 的负荷阶跃扰动信号

Fig. 11 Signal of +6% load disturbance

得到加权因子的变化曲线如图 12 所示。由图可见, 在 40% 工况上升到 46% 工况的过程中, 30% 与 50% 工况下的控制器输出的控制信号被线性组合后, 产生了新的控制量, 来对当前变工况运行下的机组进行控制。

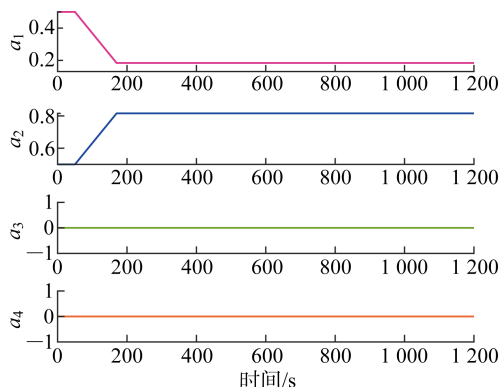


图 12 场景 1 中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  随工况变化曲线图

Fig. 12 Variation of  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , and  $a_4$  under different working conditions in Scenario 1

控制信号作用到执行器上后, 得到 0~220 s 内的 CT 和 HPHFB 的阀门开度变化曲线如图 13 所示。由图可见, 凝结水节流阀阀门开度减小, 流入低压加热器内部的凝结水减少, 导致低压加热器对汽轮机的抽汽量降低, 汽轮机的出力增加; 高加给水旁路的节流阀打开, 部分给水走旁路, 使得流入高压加热器中的给水流量减少, 高加对汽轮机的抽汽量减少, 从而增加了汽轮机的输出功率。

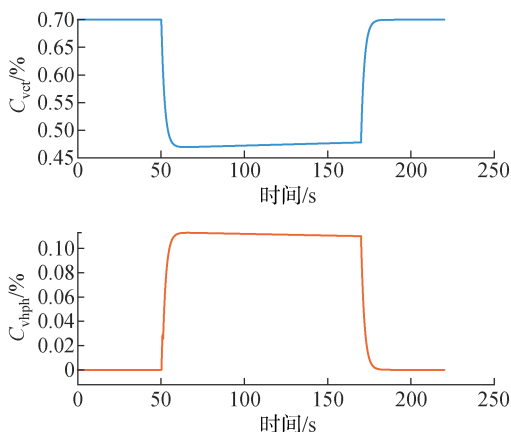


图 13 场景 1 中 CT 和 HPHFB 阀门开度变化曲线

Fig. 13 Variation of CT and HPHFB valve opening in Scenario 1

该过程中主蒸汽压力变化曲线如图 14 所示。主蒸汽压力在调频开始前一直保持稳定在标么值 0.46 的位置, 收到升负荷指令后, 开始进行频率调节, 机组运行工况逐渐上升, 使得主蒸汽压力也跟着

快速上升;在 170 s 时 CT 和 HPHFB 节流控制被切除后,只剩下 CCS+DEH 控制环节;170 s 后,锅炉侧的蓄热与之前相比消耗更多,主汽压力先有所下降,直到 400 s 左右时主蒸汽压力才因为 CCS 的控制而开始回升;最终,主蒸汽压力花费约 800 s 才稳定在与当前机组运行工况的相对应主蒸汽压力值处。

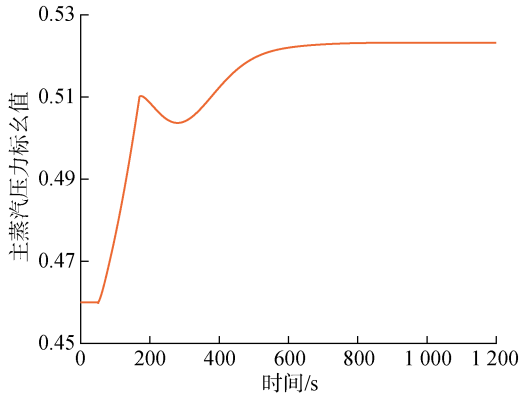


图 14 场景 1 主蒸汽压力变化曲线

Fig. 14 Variation of main steam pressure in Scenario 1

图 15 和图 16 分别为 0~220 s 内功率、频率变化曲线.在图 15 中,15 s 内频率极值点对应的负荷调整幅度为 0.059 9,大于一次调频理论负荷的 90%,满足《东北区域发电厂并网运行管理实施细则》的要求.由图 16 可见,受扰动后频率经 30 s 左右趋于稳定,完全满足对一次调频稳定时间小于 60 s 的要求. CT 和 HPHFB 控制作用的切除,使得两条曲线在 170 s 时会产生一定波动,然后又逐渐回到只有 CCS+DEH 控制方式作用的曲线上。

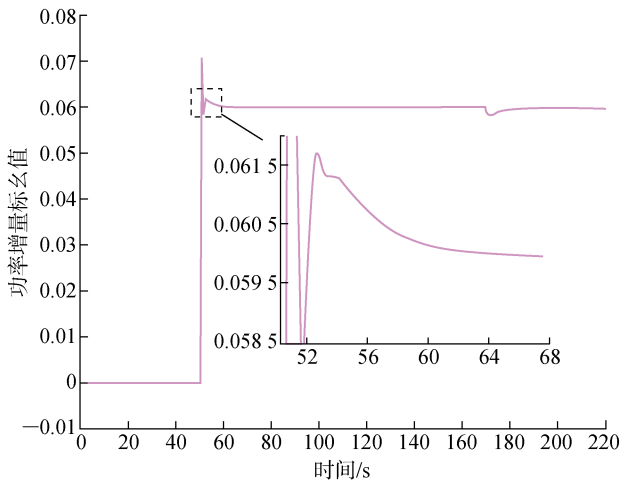


图 15 场景 1 功率增量变化曲线

Fig. 15 Variation of power increment in Scenario 1

场景 2:系统受到电网侧 6% 的降负荷扰动.初始工况设置为 80%,在该工况下稳定运行 50 s 后,

加入 -6% 的负荷干扰,调频开始动作,工况开始以每分钟减少 3% 的速度下降到 74% 后在该工况下保持稳定运行.与场景 1 相同,将 CT 和 HPHFB 节流的动作时间限制在 120 s 以内,0~1 200 s 运行工况变化曲线如图 17 所示,负荷扰动变化曲线如图 18 所示。

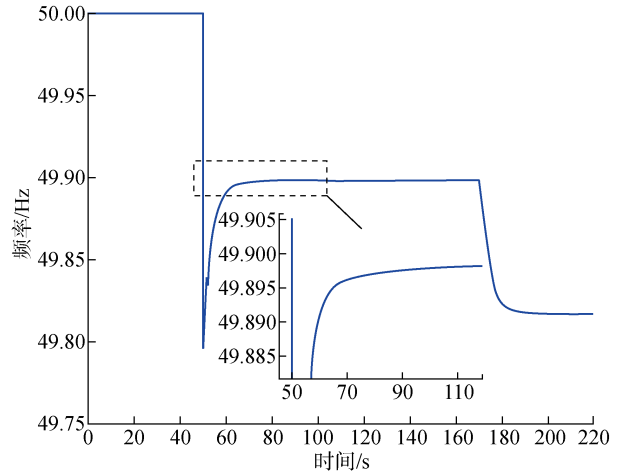


图 16 场景 1 频率变化曲线图

Fig. 16 Variation of frequency in Scenario 1

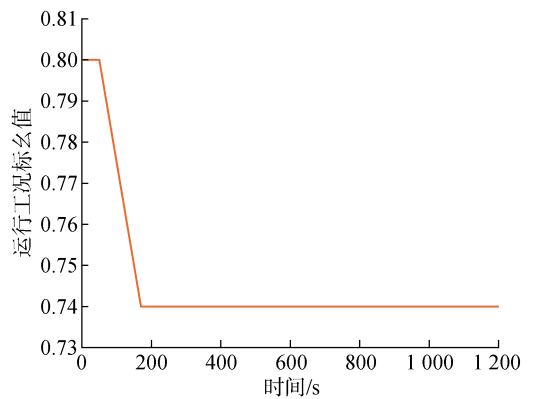


图 17 场景 2 运行工况变化曲线

Fig. 17 Variation of operating conditions in Scenario 2

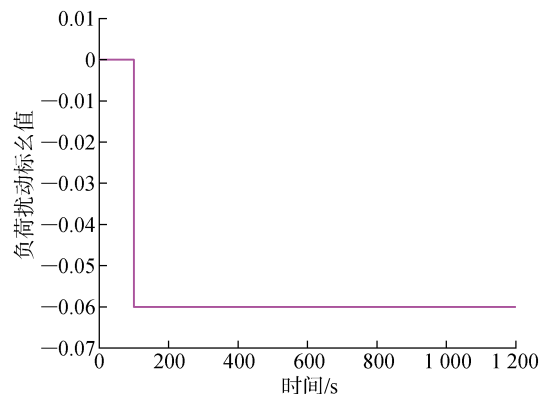


图 18 -6% 的负荷阶跃扰动信号

Fig. 18 Signal of -6% load disturbance

图 19 所示为加权因子的变化曲线. 由图可见, 在 80% 工况下降到 74% 工况的过程中, 50%、75% 和 90% 工况下控制器输出的控制信号被线性组合后, 产生了新的控制量, 来对当前变工况运行下的机组进行控制.

当新的控制信号作用到执行器上后, 得到 0~220 s 内的 CT 和 HPHFB 的阀门开度变化曲线如图 20 所示, 由于场景 2 中机组收到的是降负荷的调频指令, 而 HPHFB 只能参与升负荷的调频过程, 所以此时的 HPHFB 控制方式不起作用, 图 20 中高加给水旁路的阀门开度为 0%.

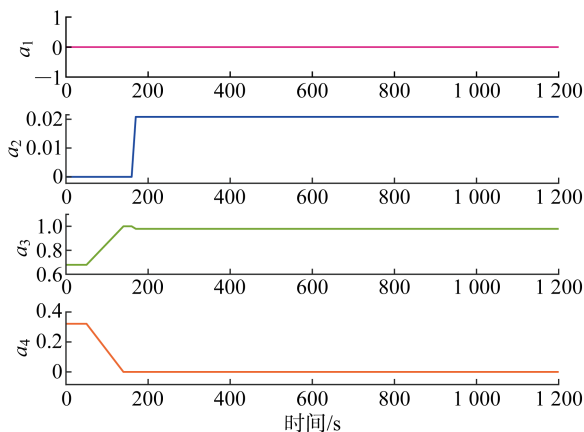


图 19 场景 2 中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  随工况变化曲线图

Fig. 19 Variation of  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , and  $a_4$  under different working conditions in Scenario 2

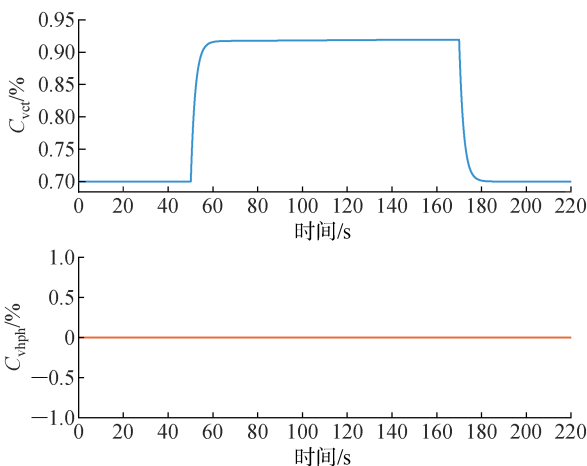


图 20 场景 2 中 CT 和 HPHFB 阀门开度变化曲线

Fig. 20 Variation of CT and HPHFB valve opening in Scenario 2

该过程中主汽压力变化曲线如图 21 所示, 表明在开始调频前主汽压力稳定在标么值 0.855. 调频动作后, 主汽压力迅速下降, 机组运行工况随之发生变化. 最终, 主蒸汽压力在 700 s 附近稳定在与机组

当前运行状况相对应的值.

图 22 为功率增量变化曲线, 图 23 为频率变化曲线. 从图 22 可以看出, 15 s 内频率极值点对应的负荷调整幅度约为 -0.059 9, 也符合《东北地区电厂管理实施细则》要求; 图 23 中频率曲线稳定所需

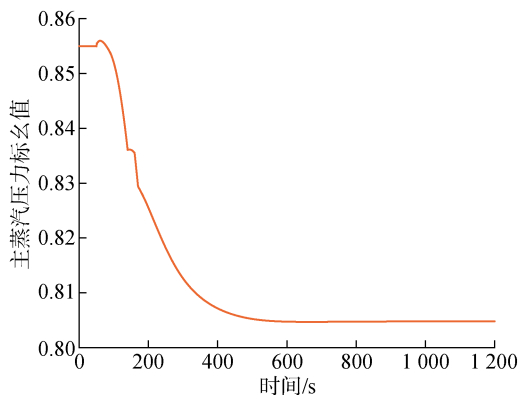


图 21 场景 2 主蒸汽压力变化曲线

Fig. 21 Variation of main steam pressure in Scenario 2

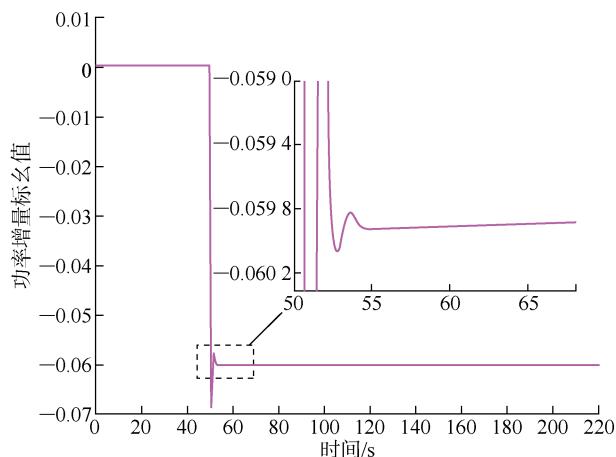


图 22 场景 2 功率增量变化曲线

Fig. 22 Variation of power increment in Scenario 2

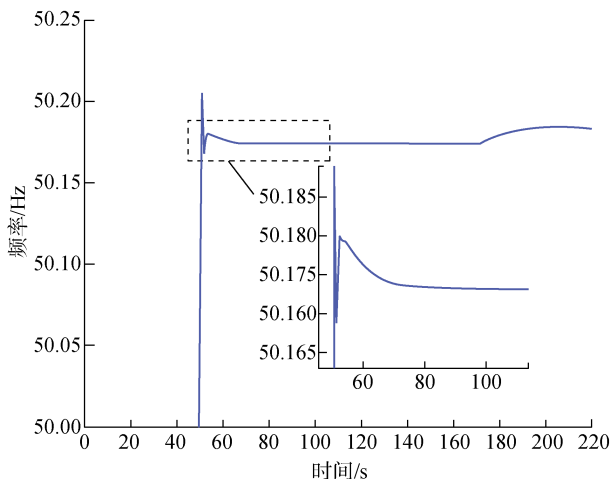


图 23 场景 2 频率变化曲线图

Fig. 23 Variation of frequency in Scenario 2

的时间在 60 s 以内. 与场景 1 类似, 去除 CT 后, 两条曲线都有一定波动, 但由于单独应用 CT, 对功率增量影响不大, 波动小于场景 1.

## 4 结语

提出一种由 CCS、DEH、凝结水节流和高加给水旁路节流组成的火电机组参与快速频率调节的协调控制策略, 并将其应用到 600 MW 的超临界火电机组中, 获得优于传统 CCS+DEH 控制方式的一次调频效果. 但是, 由于凝结水节流和高加给水旁路节流中的控制在机组单一工况运行的情况下设计, 控制效果无法满足机组在大范围、变工况运行时的要求. 因此, 提出采用以运行工况为调度变量的模糊增益调度控制方法, 根据调度变量的变化输出权重, 并以减小受到扰动后产生的频率偏差为目标, 利用 GSA 优化各个典型工况点下的子控制器和限幅环节参数, 通过子控制器输出与增益调度控制输出权重进行加权求和, 得到最终控制量, 实现机组大范围、变工况的稳定运行. 最后, 通过仿真验证在变工况运行的情况下, 所提火电机组参与快速调频的协调控制系统能迅速响应频率变化, 维持电网频率稳定. 本文对增益调度控制方法仅做了初步的研究, 在后续研究工作中, 可通过增加多个调度变量来对增益调度的控制方法进行改进研究.

## 参考文献:

[1] 陆文安, 朱清晓, 李兆伟, 等. 基于卷积神经网络的新型电力系统频率特性预测方法[J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(10): 1500-1512.  
LU Wen'an, ZHU Qingxiao, LI ZhaoWei, *et al.* A prediction method of new power system frequency characteristics based on convolutional neural network [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2024, 58(10): 1500-1512.

[2] 刘传斌, 矫文书, 吴秋伟, 等. 基于模型预测控制的风储联合电场参与电网二次调频策略[J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(1): 91-101.  
LIU Chuanbin, JIAO Wenshu, WU Qiuwei, *et al.* Strategy of wind-storage combined system participating in power system secondary frequency regulation based on model predictive control [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2024, 58(1): 91-101.

[3] 赵永亮, 张利, 刘明, 等. 660 MW 燃煤机组热力系统构型调整对一次调频性能的影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12): 3587-3598.  
ZHAO Yongliang, ZHANG Li, LIU Ming, *et al.* Effects of regulating thermal system configuration for

660 MW coal-fired power units on the performance of primary frequency control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(12): 3587-3598.

[4] CHENG Y, AZIZIPANAH-ABARGHOOEE R, AZIZI S, *et al.* Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review [J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115798.

[5] LIAO J L, YIN F, LUO Z H, *et al.* The parameter identification method of steam turbine nonlinear servo system based on artificial neural network [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering*, 2018, 40(3): 165.

[6] ZHAO X H, WEI H, QI J J, *et al.* Frequency stability constrained optimal power flow incorporating differential algebraic equations of governor dynamics [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 1666-1676.

[7] GAO S, WANG J, WANG M, *et al.* Prediction technology and application of primary frequency regulation capability of thermal power unit [J]. *IOP Conference Series: Earth & Environmental Science*, 2020, 446(4): 042040.

[8] LIAO J L, LUO Z H, YIN F, *et al.* Primary frequency control ability evaluation of valve opening in thermal power units based on artificial neural network [J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(3): 576-586.

[9] HAN Z H, XIANG P. Modeling condensate throttling to improve the load change performance of cogeneration units [J]. *Energy*, 2020, 192: 116684.

[10] ZHANG K Z, ZHAO Y L, LIU M, *et al.* Flexibility enhancement versus thermal efficiency of coal-fired power units during the condensate throttling processes [J]. *Energy*, 2021, 218: 119534.

[11] ZHAO Y L, FAN P P, WANG C Y, *et al.* Fatigue lifetime assessment on a high-pressure heater in supercritical coal-fired power plants during transient processes of operational flexibility regulation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 196-208.

[12] ZHAO Y L, LIU M, WANG C Y, *et al.* Exergy analysis of the regulating measures of operational flexibility in supercritical coal-fired power plants during transient processes [J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113487.

[13] WANG W, LIU J Z, ZENG D L, *et al.* Flexible electric power control for coal-fired units by incorporating feedwater bypass [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 91225-91233.

- [14] GUO B Y, ZHUANG Z J, PAN J S, *et al.* Optimal design and simulation for PID controller using fractional-order fish migration optimization algorithm[J]. **IEEE Access**, 2021, 9: 8808-8819.
- [15] 符杨, 丁枳尹, 米阳. 计及储能调节的时滞互联电力系统频率控制[J]. **上海交通大学学报**, 2022, 56(9): 1128-1138.  
FU Yang, DING Zhiyin, MI Yang. Frequency control strategy for interconnected power systems with time delay considering optimal energy storage regulation[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2022, 56(9): 1128-1138.
- [16] 吴立飞, 杨晓忠. 基于自适应布谷鸟搜索算法的分数阶PID控制器设计[J]. **控制工程**, 2023, 30(9): 1673-1678.  
WU Lifei, YANG Xiaozhong. Design of fractional order PID controller based on adjusting cuckoo search algorithm[J]. **Control Engineering of China**, 2023, 30(9): 1673-1678.
- [17] RASHEDI E, NEZAMABADI-POUR H, SARYAZ-DI S. GSA: A gravitational search algorithm[J]. **Information Sciences: An International Journal**, 2009, 179(13): 2232-2248.
- [18] ALI KHAN T, LING S H. A novel hybrid gravitational search particle swarm optimization algorithm [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2021, 102: 104263.
- [19] ZHANG X Z, WANG Z Y, LU Z Y. Multi-objective load dispatch for microgrid with electric vehicles using modified gravitational search and particle swarm optimization algorithm [J]. **Applied Energy**, 2022, 306: 118018.
- [20] SHEN H, WANG T, CAO J D, *et al.* Nonfragile dissipative synchronization for Markovian memristive neural networks: A gain-scheduled control scheme [J]. **IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems**, 2019, 30(6): 1841-1853.
- [21] 李庚达, 林忠伟, 陈振宇, 等. 大型风电机组的模糊增益调度PI控制器设计[J]. **中国电力**, 2020, 53(6): 107-113.  
LI Gengda, LIN Zhongwei, CHEN Zhenyu, *et al.* Fuzzy gain-scheduling PI controller design for large-scale wind turbine[J]. **Electric Power**, 2020, 53(6): 107-113.
- [22] 赵征, 于悦波, 孙昊天. 基于凝结水节流的新型协调优化控制策略[J]. **动力工程学报**, 2021, 41(2): 107-112.  
ZHAO Zheng, YU Yuebo, SUN Haotian. Optimization of a new coordinated control strategy based on condensate throttling[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2021, 41(2): 107-112.
- [23] 刘吉臻, 王耀函, 曾德良, 等. 基于凝结水节流的火电机组AGC控制优化方法[J]. **中国电机工程学报**, 2017, 37(23): 6918-6925.  
LIU Jizhen, WANG Yaohan, ZENG Deliang, *et al.* An AGC control method of thermal unit based on condensate throttling[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2017, 37(23): 6918-6925.
- [24] 徐浩, 李华强. 火电机组灵活性改造规划及运行综合随机优化模型[J]. **电网技术**, 2020, 44(12): 4626-4638.  
XU Hao, LI Huaqiang. Planning and operation stochastic optimization model of power systems considering the flexibility reformation[J]. **Power System Technology**, 2020, 44(12): 4626-4638.

(本文编辑:王历历)