

基于半正定松弛与高斯随机化的电制燃料设施联合 煤发电机组优化经济调度方法

张鹏飞^{1,2},王顺超¹,张瑞卿¹,何肇¹,方晓松¹,张宁²

(1. 电力规划设计总院,北京 100120;2. 清华大学 电机系,北京 100084)

摘要:给出一种电制燃料设施与煤发电机组联合运行的方案,可在产生电力、甲醇等重要二次能源的同时,提高发电系统灵活性。为了对联合机组进行合理调度,实现提升灵活性的同时确保经济性最优,提出了电制燃料设施联合煤发电机组参与调频服务的优化经济调度方法。在充分考虑调频服务市场规则的情况下,构建了电制燃料设施与煤发电机组联合参与单次调频的优化经济调度模型,相比已有研究该模型更加准确;针对含max函数的NP-hard非线性模型求解困难的问题,提出了采用分类转换并利用半正定松弛对原问题进行松弛,通过高斯随机化求解的方案。算例分析表明所提方法具有准确、高效的优势,为灵活能源设施与煤发电机组联合运行的优化经济调度提供了参考。

关键词:电力系统;灵活性;电制燃料设施;调频服务;半正定松弛;高斯随机化;优化经济调度

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202211012

0 引言

在“双碳”目标下,电力系统中新能源比例不断提升,风电、光伏等新能源的显著间歇性与波动性给系统安全稳定运行带来巨大挑战^[1]。电力系统灵活性指系统在面临供需急剧波动的情况下维持功率平衡的能力,其中发电侧是系统灵活性的主要来源^[1]。在高比例新能源接入下,发电系统需持续提升灵活性,以满足高比例可再生能源接入下电力系统快速增加的分钟级调频服务需求^[2-4],本文中调频服务指电力系统二次调频服务。

由于煤粉、燃烧、汽水等高惯性环节的存在,煤发电机组自身的灵活性较低^[5],而通过本体改造提升灵活性则面临物理特性的固有限制^[6],无法满足调频服务的需求。为进一步提升功率调节能力,应充分发挥煤电系统的平台优势,包括能量形态多元、自动化水平高、配套设施完善等,将可快速变功率的灵活能源设施与煤电平台联合以实现发电侧灵活性提升,从而满足电力系统日益增长的分钟级调频服务需求。电储能设施由于能够快速、准确地跟踪调度发出的自动发电控制(automatic generation control, AGC)信号,成为当前煤电集成设施提升灵活性的研究焦点,然而造价昂贵、容量有限、安全性等限制了其在多场景下的通用性^[7]。电制燃料以电解制氢技

术为基础,结合二氧化碳,将氢气进一步转化为甲醇、氨等重要燃料产品,其中,电制燃料设施的功率调节灵活性主要来自于可高质量响应功率变化指令的制氢电解槽^[8-9]。目前,针对电力系统灵活性提升,已有研究主要利用电制燃料或电解制氢设施满足系统调峰需求^[10-14]。

基于电制燃料设施功率调节灵活性高的特点,本文提出电制燃料设施联合煤发电机组提供调频服务,其中电制燃料设施通过煤发电机组供电并产生高品质燃料,且通过降低或提升设施运行功率配合电力系统功率上调或下调需求;同时,给出联合机组参与调频服务的优化经济调度方法,当存在不同调频需求时,通过本文方法对煤发电机组与电制燃料设施进行合理调度,从而为电力系统提供优质的调频服务。不同于储能,由于电制燃料设施与电网之间不存在能量双向流动的问题,故本文研究电制燃料设施参与调频服务时忽略了不同时刻的关联问题,针对联合机组响应调度单次调频信号进行最优经济调度分析。根据调频市场规则与设施调频特性,联合机组参与调频服务的优化调度模型求解属于含max函数的NP-hard非线性问题。针对此,本文提出通过分类讨论将其转化为非凸二次约束二次规划(quadratically constrained quadratic programming, QCQP)问题,并基于半正定松弛(semidefinite relaxation, SDR)与高斯随机化进行求解的方案,通过与蒙特卡罗模拟法求解对比验证本文方法的正确性与高效性。

1 电制燃料设施与煤发电机组联合运行方案

通过功率调节灵活的电制燃料设施与煤发电机组

收稿日期:2022-05-13;修回日期:2022-09-06

在线出版日期:2022-11-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0125900);中国博士后科学基金资助项目(2022M710599)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2019YFE0125900) and China Postdoctoral Science Foundation(2022M710599)

联合,可在产生电力、甲醇等重要二次能源的同时,提高发电系统灵活性。考虑不同设施的运行特性提出联合运行方案,如图1所示。

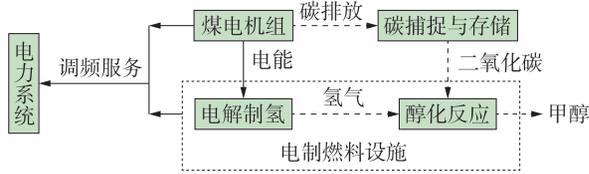


图1 电制燃料设施与煤电机组联合运行方案

Fig.1 Scheme of combined operation of E-fuel facility and coal-fired power unit

本文方案中,电制燃料设施由煤电机组供电,通过电解制氢环节获取氢气,并将氢气与煤电机组碳捕捉与存储(carbon capture and storage, CCS)^[15]环节产生的固碳进行醇化反应、精馏处理,最终产生甲醇产品;同时,电制燃料设施利用具有较强动态响应能力的质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解槽^[16-17],与煤电机组共同响应电网调频的AGC信号,通过降低或提升电制燃料设施运行功率配合电力系统功率上调或下调需求。其中,利用氢气存储装置与传输管道可平抑因提供调频服务导致的供氢波动问题。

本文方案优势如下:

- 1)通过联合运行提升煤电平台灵活性,支撑电力系统安全稳定运行,提高煤电的调频服务收益;
- 2)利用燃煤机组CCS固碳制取甲醇,促进碳减排与循环利用;
- 3)相比氢气,甲醇具有优良的物理化学特性,标准大气压下液化的单位体积能量密度较大,易于存储、运输^[14],同时甲醇相比氢气有更丰富的下游应用场景,产品消纳难度也更小。

2 联合机组在调频服务中的优化经济调度模型

2.1 目标函数

煤电平台通过集成电制燃料设施形成联合机组,以此提供调频服务。当联合机组接收到调度的单次AGC信号时,根据煤电机组和电制燃料设施的调节特性,将调频信号在不同机组之间进行最优经济调度,以最大化运营商的净收益。选取单次调频信号下运营商净收益最大为目标,即使得联合机组参加调频服务比未参加情况所增加的净收益最大,其中,净收益为收益与成本之差,收益包括联合机组调频服务收益、煤电机组的电收益变化和电制燃料设施的甲醇收益变化,成本包括煤电机组的煤耗费用变化和电制燃料设施的电耗费用变化。

1)联合机组的调频服务收益。

假设煤电机组与电制燃料设施的标准调节速

率为:

$$\begin{cases} v_c = 1.5\%P_{cn} \\ v_e = 80\%P_{en} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_c 、 v_e 分别为煤电机组和电制燃料设施的标准调节速率; P_{cn} 、 P_{en} 分别为煤电机组和电制燃料设施的额定功率。选取考虑调节速率的调频性能指标^[18],可得联合机组调频性能指标 K_p 为:

$$K_p = \frac{\Delta P_c + \Delta P_e}{v_c \cdot \max(\Delta P_c/v_c, \Delta P_e/v_e)} \quad (2)$$

式中: ΔP_c 、 ΔP_e 分别为煤电机组和电制燃料设施的调频里程。相比文献[18]以不同机组标准调节速率的平均值作为联合机组调节速率,式(2)考虑了联合机组在实际运行中响应单次调频指令的不同状态,包括联合机组中全部机组同时变功率、仅单台机组变功率,通过联合机组的平均速率表示实际调节速率,使得模型更加真实、准确。

联合机组的调频服务收益仅考虑调频里程补偿收益^[18],可得联合机组单次调频服务收益 I_{fre} 如下:

$$I_{fre} = \frac{(\Delta P_c + \Delta P_e)^2}{v_c \cdot \max(\Delta P_c/v_c, \Delta P_e/v_e)} B_{fre} \quad (3)$$

式中: B_{fre} 为调频里程补偿标准。

2)煤电机组收益与成本。

煤电机组在单次调频中的电收益变化 I_{c_grid} 、煤耗成本变化 I_{c_coal} 分别如下:

$$I_{c_grid} = \frac{1}{2} \left[t + \left(t - \frac{\Delta P_c}{v_c} \right) \right] \Delta P_c B_{on_grid} \quad (4)$$

$$I_{c_coal} = \frac{1}{2} \left[t + \left(t - \frac{\Delta P_c}{v_c} \right) \right] \Delta P_c m_{cpe} B_{coal} \quad (5)$$

式中: t 为研究周期,以机组开始动作为起始时间; B_{on_grid} 为上网电价; m_{cpe} 为度电煤耗; B_{coal} 为煤价。

3)电制燃料设施收益与成本。

电制燃料设施在单次调频中的甲醇收益变化 $I_{e_methanol}$ 、电耗成本变化 I_{e_grid} 分别为:

$$I_{e_methanol} = \frac{1}{2} \left[t + \left(t - \frac{\Delta P_e}{v_e} \right) \right] \Delta P_e \alpha_{eff} B_{methanol} \quad (6)$$

$$I_{e_grid} = \frac{1}{2} \left[t + \left(t - \frac{\Delta P_e}{v_e} \right) \right] \Delta P_e B_{plant_grid} \quad (7)$$

式中: α_{eff} 为电制燃料设施电转甲醇效率; $B_{methanol}$ 为甲醇价格; B_{plant_grid} 为厂用电电价。

综上,通过合理分配不同机组出力,可使得联合机组响应单次调频指令时运营商净收益最大,目标函数如下:

$$\max I_{fre} + \text{sign}(\xi) (I_{c_grid} - I_{e_methanol} + I_{c_grid} - I_{c_coal}) \quad (8)$$

式中: ξ 为联合机组本次接收到调频信号幅值与前一个调频信号幅值之差,系统上调需求时其值为正,下调需求时其值为负,且 $\xi \neq 0$; $\text{sign}(\xi)$ 为符号函数,当 $\xi > 0$ 时其值为1,当 $\xi < 0$ 时其值为-1。

2.2 约束条件

1) 调频信号幅值约束。

$$\Delta P_c + \Delta P_e = \Delta P \quad (9)$$

式中: $\Delta P = |\xi|$ 。

2) 系统上调需求时, 机组上爬坡约束如下:

$$\Delta P_c \leq P_{ctmax_up} \quad (10)$$

$$\Delta P_e \leq P_{etmax_up} \quad (11)$$

式中: P_{ctmax_up} 、 P_{etmax_up} 分别为煤电机组和电制燃料设施在研究周期内的爬坡上限, 均为正值。

3) 系统下调需求时, 机组下爬坡约束如下:

$$\Delta P_c \leq P_{ctmax_down} \quad (12)$$

$$\Delta P_e \leq P_{etmax_down} \quad (13)$$

式中: P_{ctmax_down} 、 P_{etmax_down} 分别为煤电机组和电制燃料设施在研究周期内的减载上限, 均为正值。

4) 调节容量约束。

$$P_{cn} \beta_{c_min} \leq P_{eprim} + \Delta P_c \leq P_{cn} \quad (14)$$

$$P_{en} \beta_{e_min} \leq P_{eprim} + \Delta P_e \leq P_{en} \quad (15)$$

式中: P_{eprim} 、 P_{eprim} 分别为煤电机组和电制燃料设施本次调频的功率起始值, 由接收到本次调频信号时的机组出力状态决定; β_{c_min} 、 β_{e_min} 分别为煤电机组和电制燃料设施最小技术出力率, 其值为机组最小技术出力值与额定功率之比; ΔP_c 、 ΔP_e 分别为煤电机组和电制燃料设施自身运行功率调节量, 以机组运行功率提升为正方向。

5) 制氢约束。

$$\Delta P_{er} \leq P_{hydrogen_max} \quad (16)$$

式中: $P_{hydrogen_max}$ 为氢气储存与传输装置最大接受量。

6) 甲醇负荷约束。

$$\Delta P_{er} \leq P_{methanol_max} \quad (17)$$

式中: $P_{methanol_max}$ 为甲醇负荷最大接受量。

3 联合机组优化调度模型求解方案

求解联合机组优化调度模型时, 由目标函数式(8)可知, 对于 max 函数中任意一种情况, 目标函数均为非凸 QCQP 问题, 故联合机组优化调度模型属于 NP-hard 非线性优化问题^[19], 对其直接进行求解较为困难。本文提出先将 max 函数通过分类转化为非凸 QCQP 问题, 然后利用 SDR 与高斯随机化^[19]进行求解的方案, 求解方案流程图如图 2 所示。

max 函数的处理方法包括线性化和分类求解, 本文选择后者。对式(3)引入中间变量 u , 将原问题根据函数包含项的数量转化为如下 2 种场景。

场景 1:

$$u = \frac{\Delta P_c + \Delta P_e}{\Delta P_c} \quad (18)$$

$$I_{fre} = u(\Delta P_c + \Delta P_e) B_{fre} \quad (19)$$

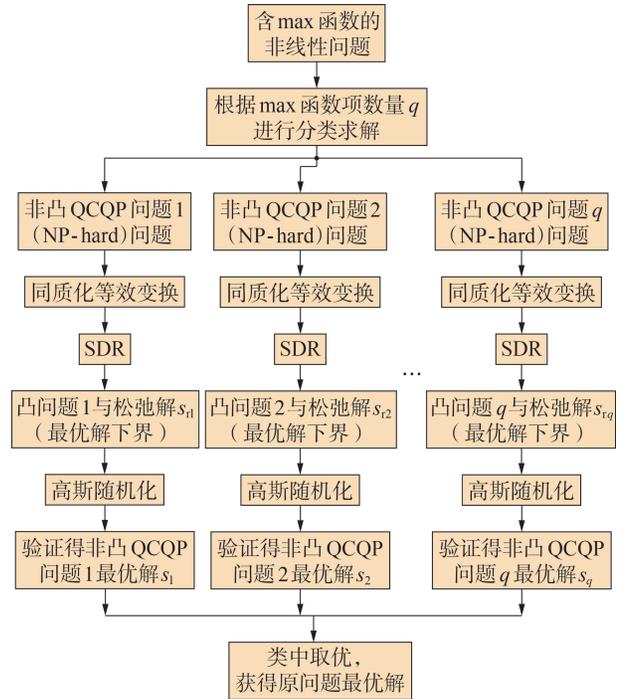


图 2 联合机组优化调度模型求解方案

Fig.2 Solution scheme for optimal dispatching model of combined units

$$\text{s.t.} \begin{cases} \frac{\Delta P_c}{v_c} \geq \frac{\Delta P_e}{v_e} \\ (u-1)\Delta P_c - \Delta P_e = 0 \end{cases} \quad (20)$$

场景 2:

$$u = \frac{\Delta P_c + \Delta P_e}{\Delta P_e} \quad (21)$$

$$I_{fre} = \frac{v_e}{v_c} u (\Delta P_c + \Delta P_e) B_{fre} \quad (22)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \frac{\Delta P_e}{v_e} \geq \frac{\Delta P_c}{v_c} \\ (u-1)\Delta P_e - \Delta P_c = 0 \end{cases} \quad (23)$$

针对以上 2 种场景分别进行优化, 并将最终结果进行对比选取最优结果。以场景 1 为例, 将式(19)中 I_{fre} 代入式(8), 并添加式(20)所示的约束, 将原问题转化为非凸 QCQP 问题, 由通用非同质 QCQP 问题表述原问题, 即:

$$\begin{cases} \min \mathbf{x}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + 2\mathbf{a}_0^T \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \mathbf{x}^T \mathbf{A}_i \mathbf{x} + 2\mathbf{a}_i^T \mathbf{x} \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{x} = [\Delta P_c, \Delta P_e, u]$ 为决策向量; \mathbf{A}_0 和 \mathbf{A}_i 、 \mathbf{a}_0 和 \mathbf{a}_i 分别为系数矩阵、向量; m 为约束数量; b_i 为常数项。

对式(24)进行同质化等效转换得到:

$$\begin{cases} \min [\mathbf{x}^T \ t] \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{a}_0 \\ \mathbf{a}_0^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ t \end{bmatrix} \\ \text{s.t.} \begin{cases} [\mathbf{x}^T \ t] \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i & \mathbf{a}_i \\ \mathbf{a}_i^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ t \end{bmatrix} \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ t = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

$$\text{令 } \mathbf{x}' = [\mathbf{x}^T \ t]^T, \mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{a}_0 \\ \mathbf{a}_0^T & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_i & \mathbf{a}_i \\ \mathbf{a}_i^T & 0 \end{bmatrix}, \text{则式(25)}$$

可等效为:

$$\begin{cases} \min (\mathbf{x}')^T \mathbf{C}_0 \mathbf{x}' \\ \text{s.t. } (\mathbf{x}')^T \mathbf{C}_i \mathbf{x}' \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (26)$$

并有如下关系:

$$(\mathbf{x}')^T \mathbf{C}_0 \mathbf{x}' = \text{Tr}((\mathbf{x}')^T \mathbf{C}_0 \mathbf{x}') = \text{Tr}(\mathbf{C}_0 \mathbf{x}' (\mathbf{x}')^T) \quad (27)$$

式中: $\text{Tr}(\cdot)$ 表示求矩阵 (\cdot) 的迹。

引入新矩阵 $\mathbf{W} = \mathbf{x}' (\mathbf{x}')^T$, 并移除非凸 $\text{rank}(\mathbf{W}) = 1$ 约束进行松弛, 其中 $\text{rank}(\cdot)$ 表示求矩阵 (\cdot) 的秩, 问题式(26)等效为如下半正定规划问题:

$$\begin{cases} \min \text{Tr}(\mathbf{C}_0 \mathbf{W}) \\ \text{s.t. } \begin{cases} \text{Tr}(\mathbf{C}_i \mathbf{W}) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \mathbf{W} > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (28)$$

式(28)属于凸问题, 可进一步利用商业软件 GAMS / MOSEK 进行求解, 由此得到式(28)的解 $\mathbf{W}_s, \mathbf{W}_s$ 即为原问题最优目标值的下界。

得到原问题最优目标值的下界 \mathbf{W}_s 后, 利用高斯随机过程, 可生成满足期望为0、协方差矩阵为 \mathbf{W}_s 的随机向量 $\boldsymbol{\gamma}$, 即 $\boldsymbol{\gamma} \sim N(0, \mathbf{W}_s)$, 通过验证不同 $\boldsymbol{\gamma}$, 提取满足原约束且使目标函数最小的 $\boldsymbol{\gamma}_{\text{opt}}$ 作为原问题的最优决策值, 相应的目标函数值作为原问题的最优目标值。

4 算例分析

通过600 MW煤机组配置30 MW电制燃料设施形成联合机组向电网提供调频服务, 运行过程中的调频服务价格、电价、甲醇价格以及煤价分别为0.2元/MW、0.35元/(kW·h)、2.7元/kg、700元/t。

以系统存在上调需求为例, 下调需求同理。考虑新能源出力的波动性和不确定性给电力系统带来的不同幅值的调频需求, 假设联合机组接收到的单次调频信号幅值变化量 ξ 的取值范围为0~17 MW, 其中正值仅代表系统存在上调需求。设置 $t=30$ s, 煤机组最小技术出力为额定功率的40%, 电制燃料设施最小技术出力为额定功率的5%, 研究周期内煤机组爬坡、减载上限均为4.5 MW, 电制燃料设施爬坡、减载上限均为12 MW。通过本文方法对调频信号进行优化经济调度分配, 同时将所得结果与蒙特卡罗模拟法求解结果进行对比, 结果如图3和图4所示。对比2种方法的求解结果可以看出二者吻合较好, 由此验证了本文方法的正确性。

根据优化调度结果, 当 ξ 较小时, 联合机组中煤机组单独承担调频服务, 这是由于对系统小幅度上调需求, 联合机组调频收益相对能量净收益变化较小, 故总收益主要来源于后者; 同时, 煤机组向系统提供上调服务需增加正收益过程“煤转上网

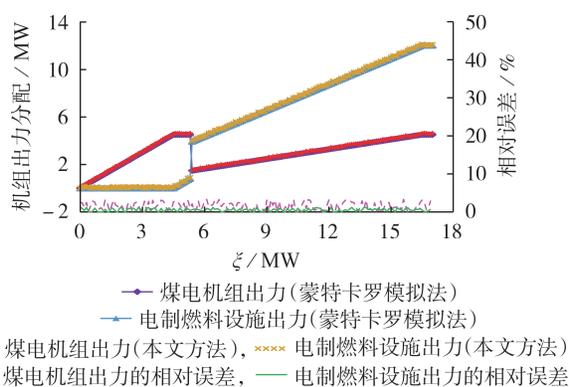


图3 优化调度结果对比

Fig.3 Comparison of optimal dispatching results

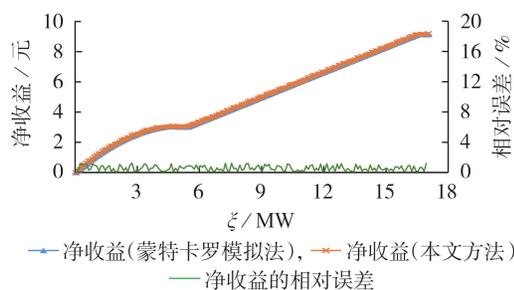


图4 优化调度收益对比

Fig.4 Comparison of optimal dispatching incomes

电”, 故能量净收益变化量为正, 电制燃料设施向系统提供上调服务需减少正收益过程“厂用电转甲醇”, 故能量净收益变化量为负, 此时调频服务应由煤机组单独承担。当 ξ 增大至4.5 MW时, 煤机组已达到自身调节极限, 继续增大信号幅值的过程中, 为完全响应调频信号, 需电制燃料设施逐步增大所承担调频份额, 但此时所增加的调频收益无法覆盖电制燃料设施因提供上调服务所带来的能量负收益, 故联合机组净收益略有下降。当 ξ 增大至5.5 MW时, 随着调频收益份额增大, 联合机组中调节性能较好的电制燃料设施变为调频服务主要承担者, 煤电机组次之。而后, 二者按功率调节速率比例分配并响应 AGC 信号。 $\xi=16.5$ MW 为联合机组调节的极限点, 此时煤机组与电制燃料设施均达到调节极限, 随着 ξ 继续增长, 机组仍以极限点处各自的出力承担调频服务。

在时效性方面, 由于联合机组调频优化调度问题属于 NP-hard 非线性优化问题, 直接利用蒙特卡罗模拟法求解耗时较长, 当灵活能源设施数量与种类增加时, 决策变量的数量随之增长, 求解耗时将呈指数级增加。利用本文方法进行 SDR 转化为半正定规划后利用高斯随机化求解, 可避免因直接求解 NP-hard 问题所导致的耗时严重, 从而提升计算速度, 此外, 决策变量的数量增加时省时优势更显著。

在经济性方面, 分别以系统存在上调、下调需

求为例,假设联合机组接收到的 ξ 分别为 -5 MW和 5 MW,其中负号仅表示系统存在下调需求,通过本文方法进行优化经济调度分配并得到相应收益,将结果与调频信号在机组间平均分配、按调节速率比例分配的情况进行对比,结果如表1和表2所示。由对比可知,无论联合机组响应系统给定的是上调还是下调指令的需求,在3种调度方式中,利用本文优化经济调度方法可在保证调频性能、调频需求的基础上实现经济性最优。此外,由表可知,按平均分配与按调节速率比例分配的2种方式间不存在经济性绝对最优的一方。

表1 $\xi=5$ MW时不同调度方式的经济性对比结果

Table 1 Economic comparison of results among different dispatching modes when $\xi=5$ MW

调度方式	AGC信号调度分配结果 / MW		运营商 净收益 / 元
	煤电机组	电制燃料设施	
平均分配	2.5	2.5	2.85
按比例分配	1.4	3.6	2.70
本文优化分配	4.5	0.5	3.02

表2 $\xi=-5$ MW时不同调度方式的经济性对比结果

Table 2 Economic comparison of results among different dispatching modes when $\xi=-5$ MW

调度方式	AGC信号调度分配结果 / MW		运营商 净收益 / 元
	煤电机组	电制燃料设施	
平均分配	-2.5	-2.5	2.68
按比例分配	-1.4	-3.6	2.74
本文优化分配	0	-5.0	2.90

由于实际运行对于调频响应速度要求较高,应尽量避免优化计算带来的额外调度时间增加,可根据机组特性、调度指令等信息,利用本文方法生成联合机组响应调频服务的经济调度图或调度表,如图3所示,供机组实际运行中即时查询使用,由此提供快速、经济的调频服务。

5 结论

本文将功率调节灵活的电制燃料设施与煤电机组联合,在充分利用煤电固碳制取甲醇等燃料的同时,通过联合机组参与电网调频服务,以提高现有煤电机组灵活性,满足高比例新能源接入下新型电力系统的调频需求。根据不同机组的调频特性,考虑联合机组在响应调频指令过程中的不同状态,包括联合机组中全部机组同时变功率、仅单台机组变功率,建立了单次AGC信号下的联合机组参与调频服务的优化经济调度模型,相比已有文献中的模型更加准确。针对优化模型求解为NP-hard问题,提出了分类转化为非凸QCQP问题并利用SDR、高斯随机化求解的方案。仿真与分析结果表明,本文模型及求解方案具有准确、高效的优势,可避免直接利用NP-hard求解带来的耗时严重问题,当决策变量增加

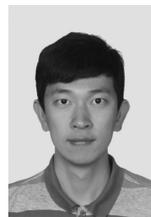
时求解优势更加显著。相比调频信号在不同机组间平均分配、按调节速率比例分配的调度方式,本文方法经济性最优。由此可知,利用本文方法可将调频信号在不同机组间进行高效、合理配置,在提高联合机组灵活性的同时保证经济性最优,为灵活能源设施与煤电机组联合运行的优化经济调度提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,李海波,乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化,2016,40(13):147-158.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13):147-158.
- [2] 陈占鹏,胡炎,邵能灵,等. 考虑灵活性与经济性的可再生能源电力系统源网联合规划[J]. 电力自动化设备,2022,42(9):94-101.
CHEN Zhanpeng, HU Yan, TAI Nengling, et al. Source-grid joint planning of renewable energy power system considering flexibility and economy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9):94-101.
- [3] 张高航,李凤婷. 计及源荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):159-167.
ZHANG Gaohang, LI Fengting. Day-ahead optimal scheduling of power system considering comprehensive flexibility of source-load-storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12):159-167.
- [4] 孙伟卿,田坤鹏,谈一鸣,等. 考虑灵活性需求时空特性的电网调度计划与评价[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):168-174.
SUN Weiqing, TIAN Kunpeng, TAN Yiming, et al. Power grid dispatching plan and evaluation considering spatial and temporal characteristics of flexibility demands[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):168-174.
- [5] 原一方,尚策. 减碳中多阶段的煤电机组退役与新能源、储能规划协同[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):140-147.
YUAN Yifang, SHANG Ce. Coordination of multi-stage renewable energy, energy storage planning and coal-fired unit retirement under carbon reduction goal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):140-147.
- [6] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [7] 胡泽春,罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2018,42(8):2-15.
HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8):2-15.
- [8] BAILERA M, LISBONA P, ROMEO L M, et al. Power to gas projects review: lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 69(5):292-312.
- [9] 李佳蓉,林今,邢学韬,等. 主动配电网中基于统一运行模型的电制氢(P2H)模块组合选型与优化规划[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4021-4033.
LI Jiarong, LIN Jin, XING Xuetao, et al. Technology portfolio selection and optimal planning of power-to-hydrogen (P2H) modules in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12):4021-4033.
- [10] 张宁,代红才,王轶楠,等. P2X技术进展及其参与电力系统运

- 行优化模拟研究[J]. 中国电力,2021,54(6):119-127,135.
ZHANG Ning, DAI Hongcai, WANG Yinan, et al. P2X technology progress and simulation studies on its participation in power system operation optimization[J]. Electric Power, 2021, 54(6):119-127,135.
- [11] ZHENG Y, YOU S, BINDNER H, et al. Optimal day-ahead dispatch of an alkaline electrolyser system concerning thermal-electric properties and state-transitional dynamics[J]. Applied Energy, 2022, 307:118091.
- [12] HARP G, TRAN K C, SIGURBJORNSSON O, et al. Application of power to methanol technology to integrated steelworks for profitability, conversion efficiency, and CO₂ reduction[C]// 2nd European Steel Technology and Application Days. Duesseldorf, Germany: [s.n.], 2015: 1-8.
- [13] SAMIEE L, GANDZHA S. Power to methanol technologies via CO₂ recovery: CO₂ hydrogenation and electrocatalytic routes [J]. Reviews in Chemical Engineering, 2019, 37(5):619-641.
- [14] LONIS F, TOLA V, CAU G. Assessment of integrated energy systems for the production and use of renewable methanol by water electrolysis and CO₂ hydrogenation[J]. Fuel, 2021, 285: 119160.
- [15] WALL T, STANGER R, LIU Y. Gas cleaning challenges for coal-fired oxy-fuel technology with carbon capture and storage [J]. Fuel, 2013, 108(7):85-90.
- [16] GAHLEITNER G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5):2039-2061.
- [17] KOPP M, COLEMAN D, STILLER C, et al. Energiepark Mainz: technical and economic analysis of the worldwide largest power-to-gas plant with PEM electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(19):13311-13320.
- [18] 张鹏飞, 王顺超, 何肇, 等. 高压电极锅炉联合煤电机组参与调频服务的优化经济调度方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23):10109-10115.
ZHANG Pengfei, WANG Shunchao, HE Zhao, et al. Optimized economic dispatching approach for high-voltage electrode boiler combined with coal-fired power units to participate in frequency regulation service [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10109-10115.
- [19] LUO Z, MA W, SO A M C, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3):20-34.

作者简介:



张鹏飞

张鹏飞(1991—),男,博士,主要研究方向为电力系统灵活性提升、多能源系统(E-mail: dezhouzhangpengfei@126.com);

王顺超(1985—),男,博士,主要研究方向为电力系统规划、新能源技术(E-mail: scwang@eppei.com);

张宁(1985—),男,副教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为多能源系统(E-mail: ningzhang@tsinghua.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Optimal economic dispatching approach for E-fuel facility combined with coal-fired power unit based on SDR and Gaussian randomization

ZHANG Pengfei^{1,2}, WANG Shunchao¹, ZHANG Ruiqing¹, HE Zhao¹, FANG Xiaosong¹, ZHANG Ning²

(1. Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An operation scheme of E-fuel facility combined with coal-fired power unit is proposed, which can not only generate important secondary energy, such as electricity, methanol, etc., but also improve the flexibility of power generation system. To dispatch the combined unit rationally, improve the flexibility while ensuring the optimal economy, an optimal economic dispatching approach for E-fuel facility combined with coal-fired power unit to participate in frequency regulation service is proposed. Under the condition of fully considering the frequency regulation service market rules, an optimal economic dispatching model for E-fuel facility combined with coal-fired power unit to participate in single frequency regulation is constructed, which is more precise than the existing researches. Aiming at the difficulty in solving NP-hard nonlinear model with max function, the classification and transformation as well as semidefinite relaxation (SDR) are used to relax the original problem, and then the scheme is solved through Gaussian randomization. Case study analysis shows that the proposed approach has the advantages of accuracy and efficiency, and it provides a reference for the optimal economic dispatching of the operation of flexible energy facility combined with coal-fired power unit.

Key words: electric power systems; flexibility; E-fuel facility; frequency regulation service; semidefinite relaxation; Gaussian randomization; optimal economic dispatching