

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181108

计及静态和暂态安全稳定约束的调度计划辅助决策

夏小琴, 鲍颜红, 任先成, 周海锋, 刘韶峰, 吴峰, 阮晶晶

(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 为了提高调度计划的执行率, 提出了计及静态和暂态安全稳定约束的调度计划辅助决策。首先, 基于交流潮流和时域仿真对各计划方式进行预想故障下静态和暂态安全稳定评估, 采用线性加权法计算不安全计划方式下机组有功调整措施的暂态静态综合控制性能指标。然后, 根据综合控制性能指标较大的关键机组集合确定不安全计划方式前后相关的计划方式, 并计及相关计划方式下机组的爬坡率约束修正机组的可调空间。再采用基于控制性能指标的启发式方法进行辅助决策计算。最后, 根据辅助决策结果对计划方式进行互动迭代优化。通过甘肃电网的算例分析验证了所提方法的有效性。

关键词: 调度计划; 辅助决策; 安全稳定约束; 综合控制性能指标; 机组爬坡率

Auxiliary decision-making of dispatching plan considering static security and transient stability constrains

XIA Xiaoqin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, ZHOU Haifeng, LIU Shaofeng, WU Feng, RUAN Jingjing
(NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to improve the execution rate of dispatching plan, this paper proposes a method of auxiliary decision-making of dispatching plan considering static security and transient stability constrains. First of all, the static security and transient stability of the dispatching plans with contingencies are assessed based on AC power flow and time domain simulation. A linear weighted method is used to calculate the units' comprehensive control performance index of the static security and transient stability to the unsafe dispatching plans. Secondly, according to the key units, whose comprehensive control performance index is large, the nearest front and back related dispatching plans of the unsafe dispatching plans are searched. And the units' adjustable space is modified considering the unit ramp rate of the relevant dispatching plans. Then, heuristic method based on the control performance index is adopted to solve the auxiliary decision-making problem. Finally, the auxiliary decision-making results are used to update the dispatching plans through iterative and mutual optimization. The effectiveness of the proposed method is verified by cases in Gansu Power Grid.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. SGFJJY00GHJS1800039).

Key words: dispatching plan; auxiliary decision-making; security and stability constrains; comprehensive control performance index; unit ramp rate

0 引言

制定合理的调度计划, 对实现智能电网安全、稳定、经济、优质运行具有重要意义。特高压交直流互联大电网的形成及新能源的大量接入, 使得电网的安全稳定性问题日益复杂。智能化辅助决策技

术是保障电网安全运行的重要手段之一^[1], 计及安全稳定约束的调度计划辅助决策得到了研究人员的广泛关注。

传统的调度计划制定以系统有功平衡约束、机组限值约束、机组爬坡约束、机组启停时间约束、备用容量约束等为运行约束, 网络安全约束一般只考虑支路功率约束^[2-5]。线路 $N-1$ 故障下的安全校核^[6]、特高压直流外送通道限额约束^[7]、调频容量约束^[8]、旋转备用优化及母线相角安全约束^[9]、HVDC

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (SGFJJY00GHJS1800039)

联络线功率在一天内的调整次数约束^[10]、运行机组数量约束^[11]、风电出力及负荷功率的预测误差^[12-13]、微网电动汽车充放电约束^[14]、储能装置约束^[15]、电热耦合约束^[16]、水-火-风等多种电源协调优化^[17]等也都已有学者进行了研究。但已有的调度计划辅助决策研究成果缺乏对暂态安全稳定约束的考虑, 无法保证调度计划方式的动态安全性。文献[18]提出的交流潮流数据生成方法和文献[19]提出的综合考虑多类安全稳定约束的安全校核计算策略为进行计及静态和暂态安全稳定约束的调度计划辅助决策提供了基础。

调度计划中包含多个计划方式, 而每个方式下预想故障集的规模非常庞大且安全稳定问题复杂多样, 导致计算量非常庞大。因此, 调度计划辅助决策实用化的关键是提高计算效率。与数学规划类方法相比, 基于控制性能指标的启发式方法虽然无法保证获得全局最优解, 但计算速度更快, 更易于实际应用^[20]。但目前启发式方法基于暂态控制性能指标进行暂态辅助决策, 再基于静态控制性能指标进行静态辅助决策的求解策略, 缺乏静态和暂态安全稳定问题的统一决策方法。

鉴于此, 本文通过线性加权法计算机组有功调整措施对各类暂态静态安全稳定问题的综合控制性能指标, 基于该指标实现静态和暂态安全稳定问题的统一决策。考虑了不满足安全稳定要求的计划方式(Unsafe Dispatching Plan Mode, UDPM)的相关性, 计及相关计划方式下机组的爬坡率约束修正了机组的可调空间。对甘肃电网算例的计算结果表明, 所提方法保证了调度计划序列方式下系统的静态、暂态安全性和机组的调整连续性, 满足了工程实用性的需求。

1 数学模型

1.1 目标函数

调度目标取为系统总调整成本最小, 如式(1)所示。

$$\min \sum_{i \in S_G} \sum_{t \in S_T} C_i (P_{i,t} - P_{i,t}^0) \quad (1)$$

式中: S_G 为系统中机组集合; S_T 为调度计划优化周期内的时段集合, 如日内计划一般为 96 个时段的集合; C_i 为机组 i 的单位有功出力的调整代价; $P_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时刻的有功出力; $P_{i,t}^0$ 为机组 i 在 t 时刻的原计划有功出力。

1.2 潮流平衡约束

交流潮流方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t}^d - V_{i,t} \sum_{j \in N_S} Y_{ij,t} V_{j,t} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} - \alpha_{ij,t}) = 0 \\ Q_{i,t} - Q_{i,t}^d - V_{i,t} \sum_{j \in N_S} Y_{ij,t} V_{j,t} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} - \alpha_{ij,t}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i \in S_N$, $j \in S_N$, $t \in S_T$; S_N 为系统所有节点集合; $P_{i,t}^d$ 、 $Q_{i,t}^d$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为节点 i 在 t 时刻的有功负荷出力、无功负荷出力、无功电源出力; $V_{i,t}$ 、 $\theta_{i,t}$ 分别为节点 i 在 t 时刻的电压幅值、电压相角; $Y_{ij,t}$ 、 $\alpha_{ij,t}$ 分别为节点导纳矩阵在 t 时刻的幅值、相角。

1.3 静态和暂态安全稳定约束

预想故障下系统的安全稳定裕度大于等于裕度门槛值。

$$\eta_{i,t} \geq \eta_{i,\text{lim}} \quad (3)$$

式中: $t \in S_T$; $\eta_{i,t}$ 为系统 i 类安全稳定问题在 t 时刻的裕度, 包括静态过载安全裕度和暂态功角稳定裕度; $\eta_{i,\text{lim}}$ 为相应的 i 类安全稳定问题满足安全稳定要求的裕度门槛值。

预想故障下系统的静态过载安全裕度为所有监视设备和断面的静态过载安全裕度的最小值。预想故障下某设备或断面的静态过载安全裕度的计算如式(4)所示。

$$\eta_{\text{ol},t} = \frac{P_{\text{lim}} - P}{P_{\text{lim}}} \quad (4)$$

式中, P_{lim} 为设备或断面的事故有功功率限值, 由调度运行人员提供。

暂态功角稳定裕度采用 EEAC(扩展等面积准则)方法计算得到。根据全网在故障下的发电机摇摆曲线, 划分互补群, 通过互补群惯量加权平均角度相对值变化, 将多机系统观察空间映射到相应的单机空间, 在 P - δ 平面上用动能增加面积 A_{inc} 和动能减少面积 A_{dec} 计算等值的单机无穷大系统的稳定功角稳定裕度。

$$\eta_{\text{ta},t} = \begin{cases} \frac{A_{\text{dec}} - A_{\text{inc}}}{A_{\text{dec}}} \times 100\% & (A_{\text{dec}} > A_{\text{inc}}) \\ \frac{A_{\text{dec}} - A_{\text{inc}}}{A_{\text{inc}}} \times 100\% & (A_{\text{dec}} \leq A_{\text{inc}}) \end{cases} \quad (5)$$

1.4 机组的有功出力约束

机组的有功出力需在有功出力上下限范围内。为避免调度计划执行上的困难, 需考虑机组爬坡约束, 确保机组的平稳运行^[21]。综合考虑机组的原有有功出力上下限及机组爬坡约束后的机组有功出力上下限, 计算公式如式(6)所示。

$$\max(P_i^{\min}, P_{i,t-1}^{\min}, P_{i,t+m}^{\min}) \leq P_{i,t} \leq \min(P_i^{\max}, P_{i,t-1}^{\max}, P_{i,t+m}^{\max}) \quad (6)$$

式中: $i \in S_G$, $t \in S_T$; P_i^{\max} 、 P_i^{\min} 分别为机组 i 的原有有功出力上下限; $t-l$ 、 $t+m$ 时刻为调度计划序列方式下机组 i 在 t 时刻需考虑机组爬坡率约束的时刻(分别与 t 时刻计划方式相隔 l 和 m 个计划方式); $P_{i,t-l}^{\max}$ 、 $P_{i,t-l}^{\min}$ 分别为机组 i 在 t 时刻考虑 $t-l$ 时刻的有功出力及爬坡率约束的有功出力上下限, $P_{i,t-l}^{\max} = P_{i,t-l} + IR_i \Delta t$ 、 $P_{i,t-l}^{\min} = P_{i,t-l} - IR_i \Delta t$; $P_{i,t+m}^{\max}$ 、 $P_{i,t+m}^{\min}$ 分别为机组 i 在 t 时刻考虑 $t+m$ 时刻的有功出力及爬坡率约束的有功出力上下限, $P_{i,t+m}^{\max} = P_{i,t+m} + mR_i \Delta t$ 、 $P_{i,t+m}^{\min} = P_{i,t+m} - mR_i \Delta t$; R_i 为机组 i 的爬坡率约束; Δt 为前后两个相邻计划方式的时间间隔。

式(1)一式(6)描述的是包含多机多时段的优化模型,对于大电网而言,整体求解非常困难,因此,采用逐时段的循环迭代优化求解策略。单时段的调度计划辅助决策采用基于控制性能指标的策略寻优技术,具体求解流程详见文献[22]。

2 暂态静态综合控制性能指标

机组有功调整措施对电网的各类安全稳定的影响不同,为了实现计及多类暂态和静态安全稳定约束的预防控制综合优化决策,需要通过量化机组有功调整措施对各类安全稳定的控制性能指标,为控制策略优化提供搜索依据^[22]。根据机组有功调整措施对静态过载问题的控制性能指标和暂态功角稳定问题的控制性能指标,计算其暂态静态综合控制性能指标。

$$c_{i,t} = Ap_{i,t} + B\lambda_{i,t} = A \sum_{d=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{L_{t,d}} S_{i,t,d,j} (1 - \eta_{t,d,j}) + B \sum_{l=1}^{M_t} S_{i,t,l} (1 - \eta_{t,l}) \quad (7)$$

式中: $c_{i,t}$ 为 t 时刻计划方式下机组 i 的暂态静态综合控制性能指标; $p_{i,t}$ 为 t 时刻计划方式下机组 i 的过载综合控制性能指标; $\eta_{t,d,j}$ 为 t 时刻计划方式第 d 个故障下第 j 个过载设备的过载安全裕度; N_t 为 t 时刻计划方式下过载裕度小于相应门槛值的故障总数; $L_{t,d}$ 为 t 时刻计划方式第 d 个故障下过载设备的总数; $S_{i,t,d,j}$ 为 t 时刻计划方式机组 i 在第 d 个故障下对第 j 个过载设备的灵敏度; $\lambda_{i,t}$ 为 t 时刻计划方式下机组 i 的暂态功角稳定综合控制性能指标; $\eta_{t,l}$ 为 t 时刻计划方式下第 l 个模式的暂态功角稳定裕度; M_t 为 t 时刻计划方式下暂态稳定裕度小于相应门槛值的模式总数; $S_{i,t,l}$ 为 t 时刻计划方式下机组 i 对第 l 个模式的参与因子; A 、 B 分别为过载综

合控制性能指标和暂态功角稳定综合控制性能指标的权重系数,且 $B > A$ 。只有静态过载问题或暂态功角稳定问题的计划方式下机组的综合控制性能指标 $c_{i,t} = p_{i,t}$ 或 $c_{i,t} = \lambda_{i,t}$ 。

根据综合控制性能指标值确定机组的综合调整方向: 值为正时, 机组综合调整方向为减出力; 值为负时, 机组的综合调整方向为增出力。

3 多个计划方式间的机组爬坡率约束

根据式(6)确定各 UDPM 下各机组的出力上下限是获取调度计划可行解的关键。

3.1 UDPM 分类

对所有 UDPM 进行分类, 定义 UDPM 下的综合控制性能指标大于某一门槛值的机组为关键机组。若不满足安全稳定要求的 t 时刻计划方式下相邻的前后两个计划方式至少有一个 UDPM, 且 t 时刻计划方式的关键机组集合与其相邻 UDPM 的关键机组存在交集, 则 t 时刻计划方式定义为连续不满足安全稳定要求的计划方式 (Serial Unsafe Dispatching Plan Mode, SUDPM), 否则, 定义为孤立不满足安全稳定要求的计划方式 (Isolated Unsafe Dispatching Plan Mode, IUDPM)。

3.2 IUDPM 下机组出力上下限约束

对所有 IUDPM, 分别按以下方式修正机组出力上下限: IUDPM 既不位于调度周期首端又不位于调度周期末端时, 综合考虑相邻的前后两个计划方式的机组的爬坡率约束及原出力上下限, 采用式(8)计算各关键机组修正后的出力上下限; 否则, 只考虑相邻的后一个或前一个计划方式下机组的爬坡率约束及原出力上下限, 分别采用式(9)、式(10)计算各关键机组修正后的出力上下限。

$$\max(P_i^{\min}, P_{i,t-1}^{\min}, P_{i,t+1}^{\min}) \leq P_{i,t} \leq \min(P_i^{\max}, P_{i,t-1}^{\max}, P_{i,t+1}^{\max}) \quad (8)$$

$$\max(P_i^{\min}, P_{i,t+1}^{\min}) \leq P_{i,t} \leq \min(P_i^{\max}, P_{i,t+1}^{\max}) \quad (9)$$

$$\max(P_i^{\min}, P_{i,t-1}^{\min}) \leq P_{i,t} \leq \min(P_i^{\max}, P_{i,t-1}^{\max}) \quad (10)$$

式中: $P_{i,t-1}^{\min} = P_{i,t-1} - R_i \Delta t$ 、 $P_{i,t-1}^{\max} = P_{i,t-1} + R_i \Delta t$ 、 $P_{i,t+1}^{\min} = P_{i,t+1} - R_i \Delta t$ 、 $P_{i,t+1}^{\max} = P_{i,t+1} + R_i \Delta t$; $P_{i,t-1}$ 、 $P_{i,t+1}$ 分别为机组 i 在相邻的前一个和后一个计划方式下的有功出力; R_i 为机组 i 的爬坡率约束; Δt 为前后两个相邻计划方式的时间间隔。

3.3 SUDPM 下机组出力上下限约束

对所有 SUDPM, 按以下方式修正机组出力上下限: 将多个时间相邻的 SUDPM 作为一个单元, 多个单元分别进行计算; 各单元内部按时间先后顺序依次判断相邻的两个 SUDPM 的计算优先顺序,

若相邻两个 SUDPM 的关键机组集合交集内所有机组的调整方向均一致, 则按时间先后顺序排序, 否则按交集内调整方向不一致关键机组的综合控制性能指标绝对值之和由大到小排序; 通过遍历单元内部各计划方式确定各计划方式的优先顺序, 按顺序依次对各计划方式进行机组出力上下限修正。

对 t 时刻 SUDPM 下某一关键机组, 在所有调度计划方式序列中搜索该机组不为关键机组的最近前一个和后一个计划方式下的该机组出力, 修正该机组的出力上下限: 若搜索到满足条件的最近前一个和后一个计划方式, 则采用式(11)修正; 若只搜索到满足条件的最近前一个或后一个计划方式, 则分别采用式(12)、式(13)修正; 若未搜索到, 则不修正。

$$\max(P_i^{\min}, P_{i,t-l}^{\min}, P_{i,t+m}^{\min}) \leq P_{i,t} \leq \min(P_i^{\max}, P_{i,t-l}^{\max}, P_{i,t+m}^{\max}) \quad (11)$$

$$\max(P_i^{\min}, P_{i,t-l}^{\min}) \leq P_{i,t} \leq \min(P_i^{\max}, P_{i,t-l}^{\max}) \quad (12)$$

$$\max(P_i^{\min}, P_{i,t+m}^{\min}) \leq P_{i,t} \leq \min(P_i^{\max}, P_{i,t+m}^{\max}) \quad (13)$$

式中: $P_{i,t-l}^{\min} = P_{i,t-l} - lR_i\Delta t$ 、 $P_{i,t-l}^{\max} = P_{i,t-l} + lR_i\Delta t$ 、 $P_{i,t+m}^{\min} = P_{i,t+m} - mR_i\Delta t$ 、 $P_{i,t+m}^{\max} = P_{i,t+m} + mR_i\Delta t$; $P_{i,t-l}$ 、 $P_{i,t+m}$ 分别为机组 i 在不为关键机组的最近前一个和后一个计划方式下的有功出力。

4 辅助决策与调度计划的交互

如果对调度计划制定和综合辅助决策进行统一求解, 计算量庞大, 难以找到满足实际电网需求的求解算法。因此, 本文将调度计划制定和综合辅助决策作为两个子问题进行解耦优化迭代。该方法无需修改目前成熟的调度计划制定程序, 通过增加综合辅助决策模块, 根据综合辅助决策结果对调度计划方式进行互动迭代优化, 以满足实际工程的要求。

若所有 UDPM 均可基于关键机组修正后的出力上下限搜索到满足安全稳定要求的辅助决策结果, 则输出调整关键机组调整后出力, 直接更新调度计划方式, 结束调度计划优化。否则, 对无可行解的 UDPM, 给出关键机组的出力限值建议, 以进入下一轮次的调度计划制定和辅助决策优化, 直至消除所有调度计划方式的设备过载和暂态功角失稳问题或者达到最大优化调整迭代次数。通过松弛机组出力上下限约束, 以调整变化量最小为目标进行辅助决策计算, 针对调整关键机组, 取机组调整后出力为机组的出力限值, 针对未调整关键机组, 取当前机组计划出力为机组的出力限值。关键机组的综合控制性能指标值为正时, 出力限值为出力上

限, 关键机组的综合控制性能指标值为负时, 出力限值为出力下限。

5 算例分析

5.1 系统计划方式介绍

以 591 机、992 节点甘肃电网某四个相邻时段计划方式为例进行计及机组爬坡率约束的发电出力调整连续性辅助决策。750 kV 河武 I 线 N-1 故障下计划方式 1 和计划方式 4 安全, 计划方式 2 出现静态过载和暂态功角失稳问题, 计划方式 3 出现暂态功角失稳问题, 如表 1 所示。

表 1 四个计划方式的系统安全状态

Table 1 System status of the four plan modes

计划方式	状态	安全稳定问题	裕度	关键元件
计划方式 1	安全	—	—	—
计划方式 2	不安全	静态过载	-8.63%	河雷 I 线
		暂态功角失稳	-93.66%	甘金昌 1120.0
计划方式 3	不安全	暂态功角失稳	-95.32%	甘金昌 1120.0
计划方式 4	安全	—	—	—

5.2 辅助决策结果

现有辅助决策方法对两个 UDPM 独立进行辅助决策, 机组出力调整空间约束只考虑机组本身的上下限约束, 针对计划方式 2 先解决暂态功角失稳问题再解决静态过载问题。

现有辅助决策方法解决计划方式 2 下暂态功角失稳问题的辅助决策措施如表 2 所示, 暂态功角裕度由-93.66%提高至 28.56%。在此基础上再解决静态过载问题的综合控制措施如表 3 所示, 关键机组出力下降调整量为 150 MW, 暂态功角裕度由-93.66%提高至 54.96%, 静态过载裕度由-8.63%提高至 1.80%。

现有辅助决策方法解决计划方式 3 下暂态功角失稳问题的辅助决策措施如表 4 所示, 暂态功角裕度由-95.32%提高至 27.27%。

本文方法考虑相邻 UDPM 间的影响, 计及机组的爬坡率约束, 根据暂态静态综合控制性能指标同时解决暂态功角失稳和静态过载问题。

表 2 计划方式 2 下暂态功角辅助决策措施

Table 2 Transient control measures of the second plan

机组名称	调整方向	mode by conventional method		
		原出力上下限/MW	控前出力/MW	控后出力/MW
甘金昌 1120.0	减	[30.00,300.0]	214.9	164.9
甘酒热 G120.0	增	[32.00,300.0]	226.5	276.5

表 3 计划方式 2 下暂态静态综合辅助决策措施
Table 3 Comprehensive control measures of the second plan mode by conventional method

机组名称	调整方向	原出力上下限/MW	控前出力/MW	控后出力/MW
甘金昌 1120.0	减	[30.00,300.0]	214.9	64.90
甘酒热 G120.0	增	[32.00,300.0]	226.5	276.5
甘盐锅 2310.5	增	[23.52,58.80]	47.47	58.80
甘连城 G417.0	增	[160.0,330.0]	319.5	330.0
甘大峡 G314.5	增	[35.20,88.00]	46.94	88.00
甘大峡 G414.5	增	[35.20,88.00]	52.73	88.00
甘大峡 G514.5	增	[35.20,88.00]	54.69	56.53

表 4 计划方式 3 下暂态功角辅助决策措施
Table 4 Transient control measures of the third plan mode by conventional method

机组名称	调整方向	原出力上下限/MW	控前出力/MW	控后出力/MW
甘金昌 1120.0	减	[30.00,300.0]	213.5	163.5
甘酒热 G120.0	增	[32.00,300.0]	227.9	277.9

设过载综合控制性能指标和暂态功角稳定综合控制性能指标的权重系数取为 $A=1$ 、 $B=2$ ，关键机组控制性能指标门槛值取为 0.1。计划方式 2 的关键机组集合交集内所有机组的综合控制性能指标如表 5 所示。计划方式 3 的关键机组为“甘金昌 1120.0”，其综合控制性能指标为 1.0，调整方向为减出力。

表 5 计划方式 2 下关键机组控制性能指标
Table 5 Key units' control performance index of the second plan mode

机组名称	暂态控制性能指标	静态控制性能指标	暂态静态综合控制性能指标	调整方向
甘金昌 1120.0	1.00	0.113 303	2.113 303	减
甘金热 G120.0	0	0.113 256	0.113 256	减
甘张掖 G120.0	0	0.113 035	0.113 035	减
甘龙首 1_11.01	-0.001 450	0.112 844	0.109 944	减
甘龙首 1_11.02	-0.001 431	0.112 844	0.109 982	减
甘龙首 1_11.03	-0.001 424	0.112 844	0.109 996	减
甘龙首 1A11.01	-0.001 507	0.112 844	0.109 83	减
甘龙首 1A11.02	0	0.112 844	0.112 844	减

优先对计划方式 2 进行辅助决策，以表 4 中前两台关键机组为例，假设相邻两计划方式的时间间隔为 15 min，各机组的爬坡率均为 5 MW/min。“甘金昌 1120.0”根据其不为关键机组的计划方式 1、4 下的出力及爬坡率约束修正出力上下限，“甘金热 G120.0”根据其不为关键机组的计划方式 1、3 下的出力及爬坡率约束修正出力上下限，如表 6 所示。基于机组修正后的出力上下限给出的综合控制措施

如表 7 所示，总调整量为 150 MW，暂态功角裕度由-93.66%提高至 24.13%，静态过载裕度由-8.63%提高至 1.89%。

表 6 计划方式 2 下两种方法的机组出力上下限比较
Table 6 Unit output limits comparison of the second plan mode between two methods

机组名称	方式 1 出力/MW	方式 3 出力/MW	方式 4 出力/MW	原出力上下限/MW	修正后出力上下限/MW
甘金昌 1120.0	221.3	—	212.7	[30.00,300.0]	[146.3,296.3]
甘金热 G120.0	235.5	230.7	—	[30.00,330.0]	[160.5,305.7]

表 7 计划方式 2 下本文方法暂态静态综合辅助决策措施
Table 7 Comprehensive control measures of the second plan mode by proposed method

机组名称	调整方向	控前出力/MW	控后出力/MW
甘金昌 1120.0	减	214.9	146.3
甘金热 G120.0	减	255.2	173.8
甘酒热 G120.0	增	226.5	276.5
甘盐锅 2310.5	增	47.47	58.80
甘连城 G417.0	增	319.5	330.0
甘大峡 G314.5	增	46.94	88.00
甘大峡 G414.5	增	52.73	88.00
甘大峡 G514.5	增	54.69	56.53

对计划方式 3 进行辅助决策计及计划方式 2 机组出力调整后的影响。原出力上下限及修正后的出力上下限如表 8 所示。基于该修正后的出力上下限给出的控制措施与表 4 中结果一致。

表 8 计划方式 3 下两种方法的机组出力上下限比较
Table 8 Unit output limits comparison of the third plan mode between two methods

机组名称	方式 2 出力/MW	方式 4 出力/MW	原出力上下限/MW	修正后出力上下限/MW
甘金昌 1120.0	146.3	212.7	[30.00,300.0]	[137.7,221.3]
甘酒热 G120.0	276.5	234.9	[32.00,300.0]	[201.5,300.0]

计划方式 2、3 基于修正后的机组出力上下限均可得到满足安全稳定要求的辅助决策结果，根据辅助决策给出的调整策略修正机组的计划出力。

5.3 结果分析

与现有基于独立运行方式进行辅助决策的方法相比，在满足安全稳定约束的前提下，本文考虑机组爬坡率约束的辅助决策方法减小了机组出力调整的波动，有效提高了机组调整的连续性和可行性。图 1 以“甘金昌 1120.0”为例进行说明，其中出力下限为计划方式 2 下计及机组爬坡率约束的修正后出力下限。由图 1 可以更直观地看出，计划方式 2

下, 采用现有辅助决策方法时该机组出力越下限, 采用本文方法时该机组出力在可调范围内。

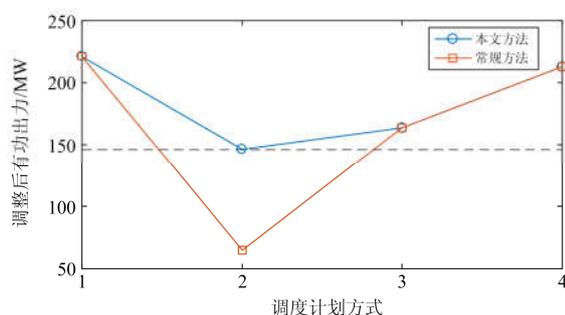


图 1 两种方法的机组调整策略比较

Fig. 1 Measures comparison between two methods

6 结论

本文提出了计及静态和暂态安全稳定约束的调度计划辅助决策技术, 基于机组有功调整措施对各类暂态静态安全稳定问题的综合控制性能指标进行计及过载和暂态稳定约束的辅助决策计算。根据优化决策结果调整机组不同时段计划出力, 通过考虑机组的爬坡率约束实现发电计划的连续性决策。甘肃电网算例的验证结果表明, 本文方法提高了电力系统调度计划方式优化调整的可操作性, 可提高调度计划的执行率。

后续将研究计及电压约束的调度计划辅助决策技术, 以实现无功出力调度计划的修正。

参考文献

- [1] 胡晨旭, 周济, 罗治强, 等. 一体化调度计划辅助决策架构及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 131-136.
HU Chenxu, ZHOU Ji, LUO Zhiqiang, et al. Architecture and key technologies for auxiliary decision-making system of integrated dispatch scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 131-136.
- [2] 韩学山, 柳焯. 考虑机组爬坡速度和网络安全约束的经济调度解耦算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 32-37.
HAN Xueshan, LIU Zhuo. Decoupled economic dispatch including unit ramp rate and network security constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 32-37.
- [3] 徐帆, 耿建, 姚建国, 等. 安全约束经济调度建模及应用[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 55-58.
XU Fan, GENG Jian, YAO Jianguo, et al. Modeling and application of security constrained economic dispatch[J]. Power Systems Technology, 2010, 34(11): 55-58.
- [4] LI Zhigang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Dynamic economic dispatch using Lagrangian relaxation with multiplier updates based on a Quasi-Newton method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4516-4527.
- [5] 黄国栋, 崔绘, 许丹, 等. 安全约束经济调度中有功潮流调整方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 91-96.
HUANG Guodong, CUI Hui, XU Dan, et al. A method of active power flow adjustment in security constrained economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 91-96.
- [6] 汪洋, 夏清, 康重庆. 考虑电网 $N-1$ 闭环安全校核的最优安全发电计划[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 39-45.
WANG Yang, XIA Qing, KANG Chongqing. Optimal security constrained generation scheduling considering closed-loop $N-1$ security correction[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 39-45.
- [7] 许丹, 王斌, 张加力, 等. 特高压直流外送风光火电力一体化调度计划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 25-29, 57.
XU Dan, WANG Bin, ZHANG Jiali, et al. Integrated transmission scheduling model for wind-photovoltaic-thermal power by ultra-high voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 25-29, 57.
- [8] 周京阳, 王斌, 周劼英, 等. 市场机制下智能电网调度控制系统调度计划应用模型及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 124-130.
ZHOU Jingyang, WANG Bin, ZHOU Jieying, et al. Applied model and analysis of dispatching plan in smart grid dispatching and control system under market mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 124-130.
- [9] 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.
- [10] ZHOU Ming, ZHAI Junyi, LI Gengyin, et al. Distributed dispatch approach for bulk AC/DC hybrid systems with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3325-3336.
- [11] 赖宇阳, 范莹, 白焰. 应用于机组组合问题的启发式

- 蚁群算法[J]. 现代电力, 2013, 30(4): 77-82.
- LAI Yuyang, FAN Ying, BAI Yan. Application of a heuristic ant colony optimization algorithm in unit commitment[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(4): 77-82.
- [12] 汪超群, 韦化, 吴思缘. 计及风电不确定性的随机安全约束机组组合[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1419-1427.
- WANG Chaoqun, WEI Hua, WU Siyuan. Stochastic-security-constrained unit commitment considering uncertainty of wind power[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1419-1427.
- [13] ALIZADEH M I, MOGHADDAM M P, AMJADY N. Multistage multiresolution robust unit commitment with nondeterministic flexible ramp considering load and wind variabilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 9(2): 872-883.
- [14] CAI Hui, CHEN Qiyu, GUAN Zhijian, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [15] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源—荷—储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.
- XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [16] 黄国栋, 许丹, 丁强, 等. 考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 162-170.
- HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, et al. Review of grid dispatching considering thermal power and large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 162-170.
- [17] 白杨, 汪洋, 夏清, 等. 水—火—风协调优化的全景安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 2-9.
- BAI Yang, WANG Yang, XIA Qing, et al. A full-scenario SCED with coordinative optimization of hydro-thermal-wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 2-9.
- [18] 周海锋, 徐伟, 鲍颜红, 等. 基于相似日选择的调度计划安全校核潮流数据生成[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 87-93.
- ZHOU Haifeng, XU Wei, BAO Yanhong, et al. Power flow data generation of security check for scheduling plans based on similar day selection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 87-93.
- [19] 徐伟, 徐泰山, 胡昊明, 等. 适用于调度计划滚动更新的安全校核计算策略研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(2): 10-14.
- XU Wei, XU Taishan, HU Haoming, et al. Security check calculation strategy for rolling update scheduling plan[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(2): 10-14.
- [20] 国电南瑞科技股份有限公司, 等. 计及多类安全稳定约束的在线预防控制综合决策方法: 中国, ZL 2015 1 0016088.0[P]. 2017-11-03.
- Nari Technology Co., Ltd, et al. Online preventative comprehensive auxiliary decision-making method including multi-class security and stability constraints, China: ZL 2015 1 0016088.0[P]. 2017-11-03.
- [21] 吴政球, 叶世顺, 匡文凯, 等. 电力市场日前 N-1 安全校正模型及算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 42-45.
- WU Zhengqiu, YE Shishun, KUANG Wenkai, et al. Day-ahead N-1 security rescheduling model of power market and its algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 42-45.
- [22] 鲍颜红, 冯长有, 徐泰山, 等. 电力系统在线安全稳定综合辅助决策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 104-110.
- BAO Yanhong, FENG Changyou, XU Taishan, et al. Online security and stability comprehensive auxiliary decision-making of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 104-110.

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-10-25

作者简介:

夏小琴(1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: xi Xiaoxiaoqin@sgepri.sgcc.com.cn

鲍颜红(1971—), 男, 通信作者, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: baoyanhong@sgepri.sgcc.com.cn

任先成(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: renxiancheng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)