

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240972

计及负荷侧频率支持的分布鲁棒频率约束机组组合

许丹阳, 武志刚, 管霖, 刘彦伶

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:“双高”电力系统中惯量与备用资源匮乏, 频率安全问题凸显, 在调度方案中内嵌频率约束、协调优化异质调频资源是应对上述问题的有效途径。为此, 提出了一种计及负荷侧频率支持的分布鲁棒频率约束机组组合方案。首先, 分析了电力系统频率响应过程, 建立计及负荷侧频率支持的系统频率响应模型, 并构造频率安全约束集合。其次, 采用基于 Wasserstein 距离的模糊集表征新能源的不确定性, 建立纳入频率约束的分布鲁棒机组组合优化模型。针对所提模型高度非凸的特点, 采用两阶段分解算法迭代求解, 并提出了一种自适应多方向优化割连接主、子问题。最后, 基于修改的 IEEE39 与 IEEE118 测试系统进行算例分析。结果表明了在新能源电力系统调度方案中考虑频率约束的必要性与计及负荷侧频率支持的重要性, 验证了所提机组组合方案的有效性与求解方法的优越性。

关键词: 频率约束优化调度; 机组组合; 负荷调频; 分布鲁棒优化; 分解算法

Distributionally robust frequency constrained unit commitment considering load side frequency support

XU Danyang, WU Zhigang, GUAN Lin, LIU Yanling

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In “dual-high” power systems, the lack of inertia and reserves makes frequency security a prominent concern. Embedding frequency constraints and coordinating the optimization of heterogeneous frequency regulation resources in dispatch are effective solutions. Therefore, this paper proposes a distributionally robust frequency constrained unit commitment optimization scheme considering load-side frequency support. First, the system frequency response process is analyzed, and a system frequency response model considering load-side frequency support is established, from which a set of frequency security constraints is constructed. Second, the uncertainty of renewable energy is characterized using fuzzy sets based on the Wasserstein distance, and a distributionally robust optimization model for unit commitment that includes frequency constraints is formulated. Due to the highly non-convex nature of the proposed model, a two-stage decomposition algorithm is employed for iterative solution. Additionally, an adaptive multi-directional cut-plane method is proposed to effectively link the master and subproblems. Finally, case studies are conducted based on modified IEEE 39-bus and IEEE 118-bus test systems. The results demonstrate the necessity of incorporating frequency constraints and the importance of load side frequency support in renewable energy power system dispatch schemes, validating the effectiveness of the proposed unit commitment scheme and the superiority of the solving method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B6007).

Key words: frequency constrained optimal dispatch; unit commitment; load side frequency regulation; distributionally robust optimization; decomposition algorithm

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 我国电力系统正逐

渐实现能源转型。预计到 2060 年, 我国新能源发电将占电力供应的 70%^[1]。在新能源电力系统中同步机逐渐被替代, 经逆变器并网的风电、光伏机组正常工作在最大功率点, 无法提供有效的频率支持^[2], 以致系统惯量与调频备用愈发稀缺, 扰动下频率安全问题凸显, 亟待从规划、运行、保护与控制^[3-4]

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U22B6007); 南方电网有限公司科技项目资助(YNKJXM20222400)

多个层面予以应对。

频率约束机组组合(frequency constrained unit commitment, FCUC)是从运行层面保障频率安全的重要手段。在 FCUC 中制定合理的机组启停和发电调度策略,可有效提高系统惯量水平,保障扰动下的备用充裕,从而增强频率响应能力^[5]。近年来针对 FCUC 主要从频率约束的建模、异质调频资源协同调度、不确定性的处理 3 个方面展开研究。

在频率约束建模方面得到重点关注的是高度非线性的频率最低点约束,其建模方法可分为基于高阶平均系统频率(average system frequency, ASF)模型^[6]的开环近似法与基于低阶系统频率响应(system frequency response, SFR)模型^[7]的闭环解析法。开环近似法是指通过将调速器响应近似为线性输出^[8-10]或通过构造频率响应曲线^[11-13]使 ASF 模型解耦,从而得到近似等价的频率最低点约束。然而,无论是从调速器方面抑或是从频率响应曲线方面进行的简化近似,均明显低估了系统频率响应能力^[14],从而导致决策过于保守。基于低阶 SFR 模型准确推导出系统频率响应函数解析式,并构建频率约束集合,是目前在 FCUC 研究中最常用的方法。文献[15]建立了考虑火电机组调频的 SFR 模型,推导出频率最低点约束,并使用分段线性化(piecewise linearization, PWL)方法将其凸化后内嵌至 FCUC。然而 PWL 方法所带来的误差难以忽视,并且随着特征量维度升高,其拟合难度增大。一些研究通过将复杂的非凸问题分解为主问题与子问题进行迭代求解。考虑到系统调差系数可表征频率响应能力,文献[16]采取了一种两阶段分解算法,将原问题分解为不考虑频率最低点约束的主问题与校验频率最低点的子问题,通过不断向主问题增加系统调差系数优化割以达到满足频率约束时的最优解。文献[17]在此基础上对优化割加以改进,提出了一种多方向并行补充优化割连接主、子问题,然而该方法并未针对单次优化提供多种优化割选择,求解质量仍有待提高。

另外,随着电力电子技术的发展,经逆变器附加控制下的新能源机组、直流输电线路均可主动或被动地参与频率响应^[18],使得协同调度异质调频资源成为了可能。文献[19]提出了一种考虑变下垂系数的风机调频策略,将其聚合至 SFR 模型并构建频率约束后嵌入 FCUC。文献[20]在 FCUC 中考虑到了直流输电线路的频率支撑特性,提出了一种针对异步互联系统的 FCUC。文献[21]对风机的减载模式及系数、储能系统的功-频控制模式及同步机组的惯量与备用协同调度。然而目前的 FCUC 研究仅聚焦于源-网-储侧的频率支撑特性,对负荷侧调频资

源的挖掘不够充分。文献[22-23]仅对负荷惯量加以考虑,并未计及一次调频阶段灵活性负荷的辅助服务。近年来以温控负荷^[24]、电动汽车^[25]为代表的灵活性负荷备受关注,此外,智能计量设备和实时遥测技术的发展为灵活性负荷提供频率响应服务创造了条件^[26]。在日前阶段,电网调度人员可基于负荷聚合商(load aggregator, LA)提供的可调容量曲线与备用采购成本,对发电侧与负荷侧的调频备用进行协同优化,从而在保障频率安全的同时提高经济效益,因此有必要在 FCUC 中加以考虑。

随着新能源占比提高,风光出力日前预测误差不容忽视,在日前调度方案中需预留一定上、下备用予以补偿。现有 FCUC 的研究重点关注大扰动下的一次调频(primary frequency regulation, PFR)备用部署,往往忽略对于新能源不确定性的应对方案。近年来,以分布鲁棒机会约束(distributionally robust chance constrained, DRCC)为代表的确定优化方法^[26-27]为处理新能源不确定性提供了理论基础,有必要在 FCUC 中关注到新能源的不确定性。

针对上述问题,提出了一种计及负荷侧频率支持的分布鲁棒频率约束机组组合(distributionally robust frequency constrained unit commitment, DR-FCUC)优化调度方案。本文主要贡献如下: 1) 基于电力系统频率响应过程,建立了计及负荷侧频率支持的 SFR 模型,推导了多阻尼状态下的频率响应函数,建立了频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)、频率最低点、准稳态频率偏差约束集合; 2) 构建了基于 Wasserstein 距离的模糊集,采用 DRCC 处理新能源出力的不确定性,同时考虑了 PFR、平抑新能源波动的多类备用部署,并建立 DR-FCUC 优化模型; 3) 采用两阶段分解算法求解模型,提出了一种自适应多方向(adaptive multi-directional, AMD)优化割连接主、子问题; 4) 在改进的 IEEE39 与 IEEE118 测试系统验证了本文所提 DR-FCUC 调度方案的有效性,其框架如图 1 所示。

1 计及负荷侧频率支持的电力系统频率响应分析

1.1 电力系统频率动态响应过程

以图 2 所示的低频问题为例,当系统受到有功扰动 P^{imb} 时(即 t_0 时刻),功率平衡状态被打破,系统频率发生动态变化。首先是惯性响应(inertia response, IR)阶段,同步机基于惯性自发释放旋转动能,频率开始下降, RoCoF 在 t_0 时刻最大。随后,当频率偏差达到死区阈值时,一次调频机组开始响应,

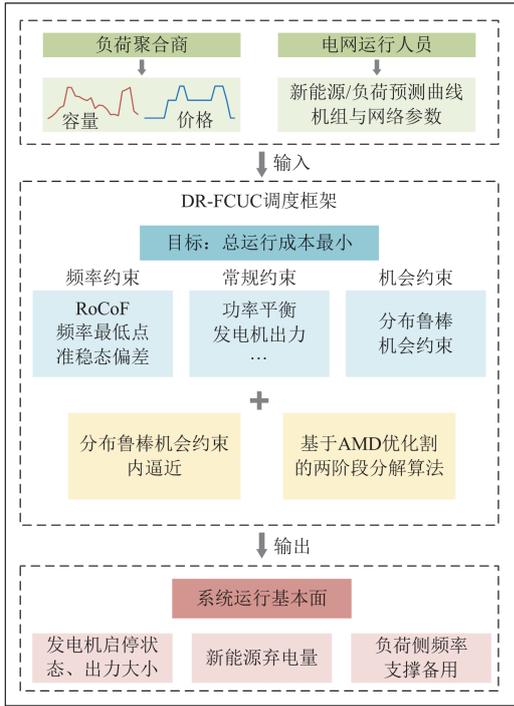


图1 DR-FCUC 调度方案框架

Fig. 1 DR-FCUC scheduling scheme framework

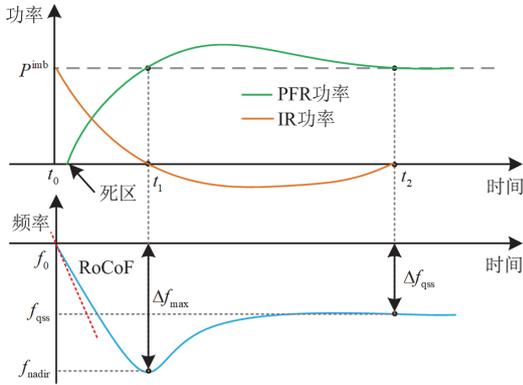


图2 电力系统频率响应过程

Fig. 2 Frequency response process of the power system

进入 PFR 阶段。忽略负荷阻尼效应, 当 PFR 功率等于功率缺额时, 即在 t_1 时刻, 频率达到最低点 f_{nadir} , 频率偏差达到最大 $\Delta f_{\text{max}}(f_{\text{nadir}})$ 。在此之后, 若同步机有额外容量, 将继续输出 PFR 功率。从能量的角度来看, 发电机转子在 t_1 时刻之后吸收 PFR 过程释放的能量从而使频率抬升, 直至 PFR 功率再次等于 P^{imb} , 即在 t_2 时刻, 频率偏差达到准稳态 Δf_{qss} 。在响应过程中, 应保证 RoCoF、 $\Delta f_{\text{max}}(f_{\text{nadir}})$ 、 Δf_{qss} 3 个关键的频率指标处于安全阈值^[28], 以保证频率安全。

1.2 负荷侧频率响应特性分析

从调度人员的视角出发难以关注每一台负荷设备的动态响应过程, 所以应聚焦于灵活性负荷整体可提供的调频备用。在日前阶段, 调度人员接收各类 LA 的报价与可调容量曲线, 经 DR-FCUC 调度方案确定每一个时段下采购的负荷侧调频备用。

常见的灵活性负荷在频率响应过程中所支持的调频功率呈现阶梯上升状, 难以表示其响应过程, 为此将其近似为爬坡模型^[29-30], 如图 3 所示。

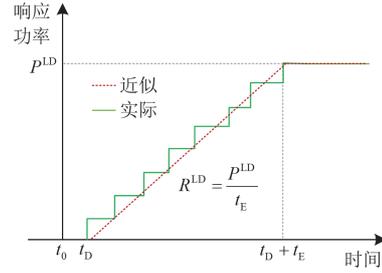


图3 负荷侧响应过程

Fig. 3 Response process of load side

图中: P^{LD} 与 R^{LD} 分别为负荷侧调频容量与速率; t_{D} 为死区时间; t_{E} 为爬坡时间。上述参数与负荷类型有关, 非本文研究重点。近似为爬坡模型的负荷调频功率时域、频域表达式分别为

$$P^{\text{LD}}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_{\text{D}} \\ R^{\text{LD}}(t - t_{\text{D}}) & t_{\text{D}} \leq t < t_{\text{D}} + t_{\text{E}} \\ P^{\text{LD}} & t \geq t_{\text{D}} + t_{\text{E}} \end{cases} \quad (1)$$

$$P^{\text{LD}}(s) = \frac{R^{\text{LD}}}{s^2} [e^{-st_{\text{D}}} - e^{-s(t_{\text{D}} + t_{\text{E}})}] \quad (2)$$

1.3 计及负荷侧频率支持的 SFR 模型

结合前文介绍的负荷侧频率响应特性对 SFR 模型进行改进, 如图 4 所示。

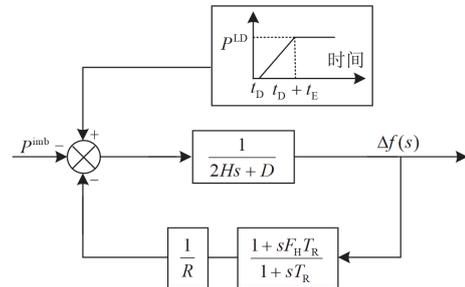


图4 计及负荷侧频率支持的 SFR 模型

Fig. 4 SFR model considering frequency support of load side

图中: H 为系统惯性时间常数; D 为阻尼系数; R 、 T_{R} 、 F_{H} 分别为同步机(本文中为火电机组)的下垂系数、时间常数、高压缸做功比例; $\Delta f(s)$ 为频

率偏差频域函数。结合式(2)与改进的 SFR, 可得如下频域方程。

$$\frac{P^{\text{imb}}}{s} - \frac{R^{\text{LD}}}{s^2} [e^{-st_D} - e^{-s(t_D+t_E)}] = - \left[\frac{1+sF_H T_R}{R(1+sT_R)} + 2Hs + D \right] \Delta f(s) \quad (3)$$

将式(3)进行转化可得

$$\Delta f(s) = - \frac{R\omega_n^2}{DR+1} \times \frac{1+sT_R}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \times \left[\frac{P^{\text{imb}}}{s} - \frac{R^{\text{LD}}}{s^2} (e^{-st_D} - e^{-s(t_D+t_E)}) \right] \quad (4)$$

其中, 自然振荡频率 ω_n 与阻尼比 ζ 表达式^[7]为

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{DR+1}{2HRT_R} \\ \zeta = \frac{DRT_R + 2HR + F_H T_R}{2(DR+1)} \omega_n \end{cases} \quad (5)$$

通过对 $\Delta f(s)$ 进行 Laplace 逆变换, 可得到欠阻尼与过阻尼两种情况下的频率响应曲线 $\Delta f(s)$ 。

1) 欠阻尼 ($0 < \zeta < 1$) 时

$$\Delta f(t) = \frac{-RP^{\text{imb}}}{DR+1} [1 + \alpha e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n t + \varphi)] + R^{\text{LD}} [g_2(t-t_D) - g_2(t-t_D-t_E)] \quad (6)$$

2) 过阻尼 ($\zeta > 1$) 时

$$\Delta f(t) = - \frac{P^{\text{imb}} R}{DR+1} \left[\frac{1 + \lambda_1 \omega_n^2 e^{-(a-b)t}}{\lambda_1 \omega_n^2 e^{-(a+b)t}} + \right] + R^{\text{LD}} [h_2(t-t_D) - h_2(t-t_D-t_E)] \quad (7)$$

式中, 中间变量 α 、 ω_n 、 φ 、 λ_1 、 λ_2 、 a 、 b 与函数 $g_2(t)$ 、 $h_2(t)$ 的表达式见附录 A。

1.4 频率约束集合构造

基于 1.3 节解析得到的频率响应曲线, 本节针对 RoCoF、频率最低点、准稳态频率偏差 3 个指标构建频率约束集合。

在 $t=0^+$ 时, RoCoF 达到最大, 在调度中应适当地安排机组启停来提高系统惯量, 以降低最大 RoCoF, 为一次调频争取足够的时间^[28], RoCoF 约束的表达式为

$$\Delta f'_{\max} = \frac{P^{\text{imb}}}{2H} \leq f'_{\max} \quad (8)$$

式中, f'_{\max} 为 RoCoF 的限值。

由于 $\Delta f(t)$ 的表达式过于复杂, 且求导后含有冲激函数, 难以获得频率最低点的解析解, 本文对频率响应曲线进行采样以获取频率最低点的数值解 $f_0 - \Delta f_{\max}$ 。频率最低点约束的表达式为

$$f_0 - \Delta f_{\max}^{\text{lim}} \leq f_0 - \Delta f_{\max} = F(x) \quad (9)$$

式中: f_0 为额定频率; $\Delta f_{\max}^{\text{lim}}$ 为频率最大偏差限值; x 为与频率最低点相关的决策变量。

将 $t=+\infty$ 代入 $\Delta f(t)$, 可得到准稳态频率偏差约束表达式, 如式(10)所示。

$$\Delta f_{\text{qss}} = \frac{P^{\text{imb}} - P^{\text{LD}}}{\kappa + D} \leq \Delta f_{\text{qss}}^{\text{lim}} \quad (10)$$

式中: $\kappa=1/R$ 为系统调差系数; $\Delta f_{\text{qss}}^{\text{lim}}$ 为准稳态频率偏差限值。

至此, 频率约束集合构造完毕。

2 计及负荷侧频率支持的 DR-FCUC

2.1 考虑新能源预测误差的随机变量建模

考虑到新能源出力的不确定性, 将其建模为由预测值 $P_{r,t}^{\text{Fore}}$ 与预测误差 $\xi_{r,t}$ 组成的随机变量 $\tilde{P}_{r,t}^{\text{RES}}$ 。

$$\tilde{P}_{r,t}^{\text{RES}} = P_{r,t}^{\text{Fore}} + \xi_{r,t}, \forall r \in V, t \in T \quad (11)$$

式中, r 、 t 与 V 、 T 分别表示新能源机组、调度时段的索引与集合。

在时段 t 的新能源预测误差总量 Ω_t 可表示为

$$\Omega_t = \sum_{r \in V} \xi_{r,t}, \forall t \in T \quad (12)$$

在日内阶段, 当新能源出力波动时, 各台同步机需根据仿射策略^[31]调整出力以参与响应, 则其有功出力可建模为

$$\tilde{P}_{g,t}^{\text{GEN}} = P_{g,t}^{\text{GEN}} - \alpha_{g,t} \Omega_t, \forall g \in G, t \in T \quad (13)$$

式中: g 与 G 分别表示同步机的索引与集合; $\tilde{P}_{g,t}^{\text{GEN}}$ 与 $P_{g,t}^{\text{GEN}}$ 分别表示发电机的实际功率与理想情况下 (即预测误差为 0) 的功率; $\alpha_{g,t}$ 为发电机的参与因子, 表示承担预测误差的比例, 为 0~1 之间的连续变量。由此可见, 日前调度阶段应对同步机部署一定的上、下调节备用, 以应对日内新能源出力波动。

需要说明的是, 含随机变量的优化模型可通过随机优化、鲁棒优化等方法处理。随机优化常采用场景法, 即通过构造若干可能的情景来描述随机变量的分布情况, 具有较好的灵活性, 但在处理大规模不确定性时, 计算复杂度较高且鲁棒性较差。鲁棒优化方法通过对最坏情况下的保守假设进行优化, 能够保证系统在最不利条件下的鲁棒性, 然而其过于保守的特性往往导致优化结果的经济性不足。为此, 本文采用 DRCC 方法, 通过确保在所构建的模糊集内的所有可能分布中, 约束条件在设定的概率水平下始终得到满足, 从而在应对不确定性的同时兼顾了鲁棒性与经济性。

在后续建立的 DR-FCUC 模型中将包含随机变量的约束建模为机会约束, 并在 2.5 节介绍基于随机变量概率分布不确定性的模糊集与机会约束的凸化方法。

2.2 目标函数

不计新能源发电的运行成本^[17], 得出 FCUC 目标函数为

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} \left(c_g^{\text{SU}} z_{g,t}^{\text{u}} + c_g^{\text{SD}} z_{g,t}^{\text{d}} + c_g^{\text{NL}} u_{g,t} + c_g^{\text{GEN}} P_{g,t}^{\text{GEN}} \right) \\ F_2 = \sum_{t \in T} \sum_{r \in V} c_r^{\text{Cut}} P_{r,t}^{\text{Cut}} \\ F_3 = \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} (c_g^{\text{R}^+} P_{g,t}^{\text{R}^+} + c_g^{\text{R}^-} P_{g,t}^{\text{R}^-} + c_g^{\text{PFR}} P_{g,t}^{\text{PFR}}) \\ F_4 = \sum_{t \in T} c_t^{\text{LD}} P_t^{\text{LD}} \end{cases}$$

式中: F_1 为同步机组的启停、空载与发电成本之和; F_2 为新能源弃用成本; F_3 为同步机备用成本; F_4 为负荷侧调频备用成本; $z_{g,t}^{\text{u}}$ 、 $z_{g,t}^{\text{d}}$ 分别为机组的启、停状态; $u_{g,t}$ 为机组的在线状态; $P_{g,t}^{\text{GEN}}$ 、 $P_{g,t}^{\text{R}^+}$ 、 $P_{g,t}^{\text{R}^-}$ 、 $P_{g,t}^{\text{PFR}}$ 分别为机组的发电功率、上、下备用及 PFR 备用; $P_{r,t}^{\text{Cut}}$ 为新能源机组的弃电功率; P_t^{LD} 为负荷侧备用; c_g^{SU} 、 c_g^{SD} 、 c_g^{NL} 、 c_g^{GEN} 分别为机组的启动、停机、空载、发电成本系数; c_r^{Cut} 为新能源弃电成本系数; $c_g^{\text{R}^+}$ 、 $c_g^{\text{R}^-}$ 、 c_g^{PFR} 分别为机组上、下备用、PFR 备用成本系数; c_t^{LD} 为负荷侧备用成本系数。

2.3 常规约束

对于任意的 $g \in G$, $r \in V$, $d \in D$, $l \in L$, $t \in T$, d 、 l 与 D 、 L 分别表示负荷、线路的索引与集合。式(15)表示同步机启停状态与在线状态之间的逻辑关系。式(16)一式(21)分别表示同步机的功率上、下限约束、爬坡约束、滑坡约束、最小开、关机时间约束; P_g^{max} 、 P_g^{min} 分别为机组功率的最大、最小值; R_g^{Up} 、 R_g^{Dn} 分别为机组的爬坡、滑坡功率限值; T_g^{on} 、 T_g^{off} 分别为机组的最小启动、停机时间限值。式(22)、式(23)为机会约束, 分别表示在隶属于模糊集 \mathcal{P}_N 的最恶劣分布 \mathbb{P} 下, 同步机组 g 的上、下备用能够覆盖其承担的预测误差 $\alpha_{g,t} \Omega_t$ 的概率至少大于等于 $1 - \varepsilon$ 。式(24)描述了新能源机组的弃电功率 $P_{r,t}^{\text{Cut}}$ 与预测功率 $P_{r,t}^{\text{Fore}}$ 、发电功率 $P_{r,t}^{\text{GEN}}$ 之间的关系。式(25)为功率平衡约束, 由于式中含有随机变

量, 需要引入式(26)将随机变量消去, 式(25)中 $P_{d,t}^{\text{Load}}$ 表示负荷功率。式(26)表征为各同步机承担的预测误差比例之和为 1。式(27)、式(28)同样为含有随机变量的机会约束, 分别表示线路容量不超过其正向最大值 P_l^{max} 、反向最大值 $-P_l^{\text{max}}$ 的概率至少大于等于 $1 - \varepsilon$; F_g^l 、 F_r^l 、 F_d^l 分别表示同步机 g 、新能源机组 r 、负荷 d 与线路 l 之间的功率分布转移因子。

$$z_{g,t}^{\text{u}} - z_{g,t}^{\text{d}} = u_{g,t} - u_{g,t-1} \quad (15)$$

$$P_{g,t}^{\text{GEN}} + P_{g,t}^{\text{R}^+} + P_{g,t}^{\text{PFR}} \leq u_{g,t} P_g^{\text{max}} \quad (16)$$

$$u_{g,t} P_g^{\text{min}} \leq P_{g,t}^{\text{GEN}} - P_{g,t}^{\text{R}^-} \quad (17)$$

$$P_{g,t}^{\text{GEN}} + P_{g,t}^{\text{PFR}} + P_{g,t}^{\text{R}^+} - (P_{g,t-1}^{\text{GEN}} - P_{g,t-1}^{\text{R}^-}) \leq R_g^{\text{Up}} \quad (18)$$

$$P_{g,t-1}^{\text{GEN}} + P_{g,t-1}^{\text{PFR}} + P_{g,t-1}^{\text{R}^+} - (P_{g,t}^{\text{GEN}} - P_{g,t}^{\text{R}^-}) \leq R_g^{\text{Dn}} \quad (19)$$

$$\sum_{\tau=t-T_g^{\text{on}}-1}^{t-1} u_{g,\tau} \geq z_{g,t}^{\text{d}} T_g^{\text{on}} \quad (20)$$

$$\sum_{\tau=t-T_g^{\text{off}}-1}^{t-1} (1 - u_{g,\tau}) \geq z_{g,t}^{\text{u}} T_g^{\text{off}} \quad (21)$$

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}_N} \mathbb{P}\{-\alpha_{g,t} \Omega_t \leq P_{g,t}^{\text{R}^+}\} \geq 1 - \varepsilon \quad (22)$$

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}_N} \mathbb{P}\{\alpha_{g,t} \Omega_t \leq P_{g,t}^{\text{R}^-}\} \geq 1 - \varepsilon \quad (23)$$

$$P_{r,t}^{\text{GEN}} + P_{r,t}^{\text{Cut}} = P_{r,t}^{\text{Fore}} \quad (24)$$

$$\sum_{g \in G} (P_{g,t}^{\text{GEN}} + \alpha_{g,t} \Omega_t) + \sum_{r \in V} P_{r,t}^{\text{GEN}} + \Omega_t = \sum_{d \in D} P_{d,t}^{\text{Load}} \quad (25)$$

$$\sum_{g \in G} \alpha_{g,t} = 1 \quad (26)$$

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}_N} \mathbb{P} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{g \in G} F_g^l (P_{g,t}^{\text{GEN}} - \alpha_{g,t} \Omega_t) + \\ & \sum_{r \in V} F_r^l (P_{r,t}^{\text{GEN}} + \xi_{r,t}) - \\ & \sum_{d \in D} F_d^l P_{d,t}^{\text{Load}} \leq P_l^{\text{max}} \end{aligned} \right\} \geq 1 - \varepsilon \quad (27)$$

$$\inf_{\mathbb{P} \in \mathcal{P}_N} \mathbb{P} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{g \in G} F_g^l (P_{g,t}^{\text{GEN}} - \alpha_{g,t} \Omega_t) + \\ & \sum_{r \in V} F_r^l (P_{r,t}^{\text{GEN}} + \xi_{r,t}) - \\ & \sum_{d \in D} F_d^l P_{d,t}^{\text{Load}} \geq -P_l^{\text{max}} \end{aligned} \right\} \geq 1 - \varepsilon \quad (28)$$

2.4 频率约束

频率约束及中间变量表达式如下所示, 对于任意的 $t \in T$, $g \in G$, 有

$$\frac{P_t^{\text{imb}}}{2H_t} \leq \Delta f_{\text{max}}^{\text{lim}} \quad (29)$$

$$f_0 - \Delta f_{\text{max}}^{\text{lim}} \leq F(H_t, \kappa_t, Z_t, P_t^{\text{LD}}) \quad (30)$$

$$P_t^{\text{imb}} - P_t^{\text{LD}} \leq \sum_{g \in G} P_{g,t}^{\text{PFR}} + D_t \Delta f_{\text{qss}}^{\text{lim}} \quad (31)$$

$$P_t^{\text{LD}} \leq \bar{P}_t^{\text{LD}} \quad (32)$$

$$H_t = \sum_{g \in G} u_{g,t} H_g P_g^{\text{max}} / P_B \quad (33)$$

$$\kappa_t = \sum_{g \in G} u_{g,t} \kappa_g P_g^{\text{max}} / P_B \quad (34)$$

$$\lambda_{g,t} = \frac{u_{g,t} \kappa_g P_g^{\text{max}}}{\sum_{g \in G} u_{g,t} \kappa_g P_g^{\text{max}}} \quad (35)$$

$$Z_t = \sum_{g \in G} \lambda_{g,t} Z_g, \forall Z = \{T_R, F_H\} \quad (36)$$

$$P_{g,t}^{\text{PFR}} \geq \gamma u_{g,t} \kappa_g \Delta f_{\text{max}}^{\text{lim}} P_g^{\text{max}} \quad (37)$$

式(29)一式(31)约束了在系统经历扰动时,关键频率指标处于安全阈值之内,式(32)限制了负荷侧调频备用在其上限 \bar{P}_t^{LD} 以内,式(33)一式(37)为中间变量的表达式。 P_B 为功率基准值; γ 为PFR备用系数,一般取0.5^[32]; $\lambda_{g,t}$ 为比例系数; Z 为 T_R 与 F_H 构成的集合。

2.5 约束凸化

基于上述介绍的目标函数与约束条件,DR-FCUC可用如下紧凑形式表示。

$$\min_{\theta} F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

s.t. 式(15)一式(28)、式(29)一式(32)、式(37)

$$\theta = \left\{ \begin{array}{l} z_{g,t}^u, z_{g,t}^d, u_{g,t}, P_{g,t}^{\text{GEN}}, P_{g,t}^{\text{R+}}, P_{g,t}^{\text{R-}}, \\ \alpha_{g,t}, P_{g,t}^{\text{PFR}}, P_{r,t}^{\text{GEN}}, P_{r,t}^{\text{Cut}}, P_t^{\text{LD}} \end{array} \right\}, \quad (38)$$

$$\forall g \in G, r \in V, t \in T$$

其中,有如下几类非凸项:(a) DRCC 式(22)一式(23)、式(27)一式(28);(b) 频率最低点约束式(30);(c) 双线性项;(d) max/min 函数。其中非凸项(c)与非凸项(d)的凸化方法见文献[33]。非凸项(b)采用第3节介绍的分解算法处理。本小节介绍非凸项(a)的凸化方法。

2.5.1 基于 Wasserstein 距离的模糊集

本文采用基于 Wasserstein 距离的模糊集描述非凸项(a)中所包含的新能源预测误差分布的不确定性。

Wasserstein 距离可以定义为两个概率分布之间的最小传输成本。对于给定的两个概率分布 μ 和 ν ,Wasserstein 距离可表示为

$$W_p(\mu, \nu) = \left(\inf_{\nu \in \Gamma(\mu, \nu)} \int_{X \times Y} d(x, y)^p d\nu(x, y) \right)^{1/p} \quad (39)$$

式中: $\Gamma(\mu, \nu)$ 表示所有边缘分布为 μ 和 ν 的联合分布集合; $d(x, y)$ 表示空间 X, Y 的中点 x, y 之间的距离; p 为一个正数,通常取值为1或2,分别对应于一阶 Wasserstein 距离和二阶 Wasserstein 距离,为

便于后续凸化,本文取 $p=1$ 。

基于 Wasserstein 距离的模糊集是指在 Wasserstein 距离度量下的一组概率分布。这些分布相对于某个中心分布的偏差控制在一定范围内。换言之,模糊集包含了所有与中心分布在 Wasserstein 距离上小于某个阈值 θ 的分布。设 P_0 为中心分布,模糊集 U 可以表示为

$$U = \{P | W_p(P, P_0) \leq \theta\} \quad (40)$$

式中, θ 为球半径。

在基于 Wasserstein 距离的模糊集中,球半径与保守程度之间存在直接关系。具体来说, θ 越大,包含的概率分布更多,表示对原始分布的允许偏差更大,从而增加了保守程度。

在实际调度运行中,可以根据历史数据构建中心分布 P_0 ,设样本数据为 $\{\hat{\xi}_1, \hat{\xi}_2, \dots, \hat{\xi}_n\}$,则中心分布可表示为

$$P_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{\hat{\xi}_i} \quad (41)$$

式中, $\delta_{\hat{\xi}_i}$ 表示在样本点 $\hat{\xi}_i$ 上的 Dirac 测度。

2.5.2 DRCC 凸化方法

式(22)、式(23)、式(27)、式(28)高度非凸,可通过寻找一组线性约束表达式将其近似。首先,DRCC 一般形式可描述为

$$\inf_{P \in \mathcal{P}_N} \mathbb{P}\{a(x)\xi + b(x) \leq 0\} \geq 1 - \varepsilon \quad (42)$$

式中, $a(x)$ 与 $b(x)$ 均为 x 的仿射函数。

根据文献[34],采用内逼近的方法将非凸的 DRCC 等价于条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)约束。

$$\begin{cases} \lambda \theta - \varepsilon \beta + \sum_{i=1}^n z_i / n \leq 0 \\ a(x)\hat{\xi}_i + b(x) + \beta - z_i \leq 0, i=1, 2, \dots, n \\ -\lambda \leq a(x) \leq \lambda \\ \lambda, \beta, z_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (43)$$

式中, λ, β, z_i 均为辅助变量。

3 基于 AMD 优化割的两阶段分解算法

3.1 两阶段分解算法

本文所提模型中的频率最低点约束受5个变量的影响,即 $H, \kappa, T_R, F_H, P^{\text{LD}}$ 。通过常见的PWL方法凸化频率最低点约束难以有良好的近似效果。因此,采用两阶段分解算法将DR-FCUC分解为不考虑频率最低点约束式(30)的主问题与求解主问题后进行频率最低点校验的子问题。根据每一

时段 t 下的校验结果, 向主问题添加 AMD 优化割, 以增强系统频率响应能力, 直至全部时段均满足约束后停止, 所提方法框架如图 5 所示。

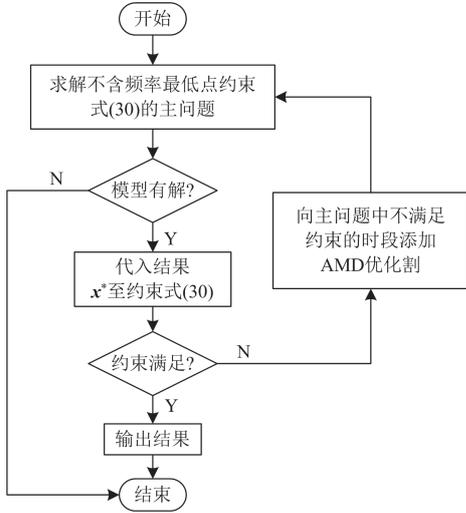


图 5 两阶段分解算法框架

Fig. 5 Two-stage decomposition algorithm framework

3.2 AMD 优化割

优化割是优化算法中一种用于改进求解过程的方法。它通常在整数规划、混合整数规划以及分支定界算法中应用, 以便更有效地收敛到最优解。优化割通过添加额外的约束来缩小可行解空间, 提高求解效率。在分解算法中, 优化割起到了连接主、子问题的作用, 其方向决定了求解质量, 在求解全过程中固定某一方向加入优化割可能会导致求解成本过高甚至模型无解, 因此, 本文提出了一种 AMD 优化割, 其数学表达如式(44)所示。该优化割考虑了增加 H 、 κ 、 F_H 、 P^{LD} 与降低 T_R 均表征着系统频率响应能力增强的方向, 但在每次迭代时根据求解最优性选择某一方向对主问题添加优化割, 而非固定某一方向。

$$\begin{cases} H \geq H^* + \mu_H - (1 - z_H)M \\ \kappa \geq \kappa^* + \mu_\kappa - (1 - z_\kappa)M \\ F_H \geq F_H^* + \mu_{F_H} - (1 - z_{F_H})M \\ T_R \leq T_R^* - \mu_{T_R} + (1 - z_{T_R})M \\ P^{LD} \geq P^{LD*} + \mu_{P^{LD}} - (1 - z_{P^{LD}})M \\ z_H + z_\kappa + z_{F_H} + z_{T_R} + z_{P^{LD}} = 1 \end{cases} \quad (44)$$

以第一条约束为例, H 表示系统惯性时间常数变量; H^* 表示求解主问题后的系统惯性时间常数参数; μ_H 为步长, 以要求下一次求解后的系统惯量高于当前值; z_H 为 0-1 变量, 为 1 时表示该约束生效, 即选择增大系统惯量的方向; M 为一极大的正数。

4 算例分析

4.1 算例说明

本文在修改的 IEEE39 与 IEEE118 测试系统基础上进行算例分析, 以验证所提方案与算法的有效性与可扩展性。

两测试系统共同参数设置如下: 调度时段数 $|T| = 24$; 调度步长为 1 h; RoCoF、频率最低点、准稳态频率偏差限值分别为 0.6 Hz/s、0.5 Hz、0.3 Hz; 系统阻尼系数 $D = 1$ p.u.; 负荷调频死区时间 $t_D = 2$ s; 响应时间 $t_E = 2$ s; 功率基准值 P_B 为各系统的同步机装机容量; 新能源削减成本为 100 元/MW。

采用蒙特卡洛抽样方法, 在新能源预测曲线基础上生成 20 000 个符合正态分布、均值为 0 且标准差为预测值 5% 的样本, 其中选取 20 组样本用于构建分布鲁棒优化模型, 其余样本用于验证各机会约束的违反率, 置信度 $1 - \varepsilon = 0.95$ 。

本文设置了两个对照方案用于结果对比, 为方便后续表述, 有如下定义: 1) M1 为不考虑频率约束的分布鲁棒机组组合方案; 2) M2 为考虑频率约束但不考虑负荷频率支持的分布鲁棒机组组合方案; 3) M3 为考虑频率约束及负荷频率支持的分布鲁棒机组组合方案, 即本文所提的 DR-FCUC。所有优化方案的求解均在一台 CPU 为 3.00 GHz Intel Core i5-8500、内存为 16 GB 的计算机完成, 求解软件为 Gurobi 11.0.0, 编程语言为 Python 3.10.6。

4.2 修改后的 IEEE39 测试系统算例分析

修改后的 IEEE39 系统中同步机共 10 台, 装机容量为 1662 MW, 新能源装机量 500 MW, 日尖峰负荷为 1200 MW。两个系统的详细参数见文献[35]。算例取功率扰动量 P^{imb} 为每时段负荷功率的 17%。

4.2.1 DRCC 方法有效性验证

图 6、图 7 分别展示了不同球半径与置信度设置下 M3 方案的求解结果。可以看到, 随着球半径的减小, 成本相应降低, 但机会约束的最大违约率随之提高, 这是因为基于 Wasserstein 距离构建的模糊集中球半径起到了控制保守性的作用, 球半径越大表示潜在的分布越多, 保守性越强; 相反, 减小球半径使得结果鲁棒性降低, 经济性提高。因此调度人员可根据经验选择合适的球半径, 本文选取 $\theta = 0.8$ 作为最大违约率与成本的折中方案, 此时成本为 360 092 元, 最大违约率为 4.65%, 低于设定的限值。此外, 在 $\theta = 0.8$ 的情况下可以看到, 随着置信度要求的降低, 成本也相应降低, 但各情况下的最大违约率均保持在设定限值以内, 表明了设定 $\theta = 0.8$ 的合理性, 进一步印证了 DRCC 方法的有效性。

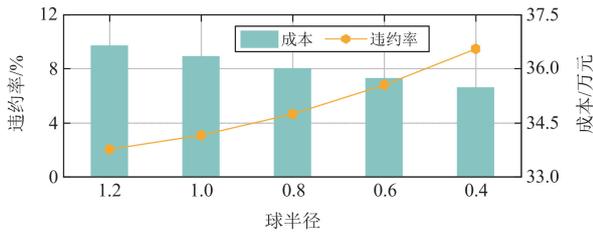


图 6 不同球半径下 M3 方案的结果

Fig. 6 Results of M3 scheme for different sphere radius

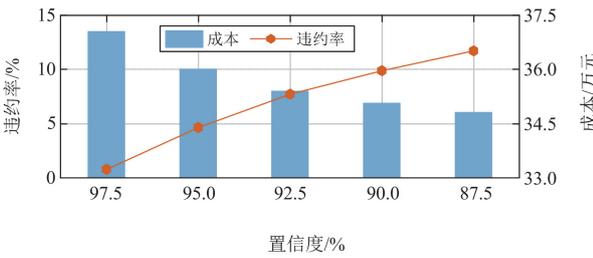


图 7 不同置信度下 M3 方案的结果

Fig. 7 Results of the M3 scheme for different confidence levels

4.2.2.3 3 种方案下的求解结果

表 1 展示了 3 种方案下的求解成本情况，图 8、图 9 分别展示了 3 种方案下的机组组合结果与新能源机组弃电情况。可以看到，3 种方案中 M1 方案成本最低，其次为 M3 方案，而 M2 方案成本最高。这是因为考虑了频率约束之后，对系统频率响应能力加以要求，使得更多的同步机组投入运行，因此运行成本 F_1 增加，并且同步机组的发电功率上限受到限制，以保证有一定的 PFR 备用，因此备用成本 F_3 增加。此外更多的同步机组投入运行后，受最小功率约束的限制，为保证功率平衡约束，新能源机组消纳比例下降，弃电现象明显，因此弃电成本 F_2 增加。

通过 1—3 h 的调度结果可以更好地说明这一点。在这 3 个时段，M2 方案与 M3 方案均启动了大容量机组#1，而 M1 方案此时仅启动了部分小容量机组。在 M1 方案中，仅在 1 h 出现了弃电现象，弃电功率为 4.05 MW，而 M2 方案与 M3 方案弃电现象更为明显。但由于负荷侧的频率支持并且该时段内调频价格相对较低，在 1—3 h 优先调度负荷侧的备用，调度结果如图 10 所示。因此同步机启停数

表 1 3 种方案下的成本

Table 1 Cost under three schemes

方案	总成本	F_1	F_2	F_3	F_4
M1	305 709	285 279	405	20 025	0
M2	369 610	305 685	15 626	48 299	0
M3	360 092	298 913	12 236	47 448	1495

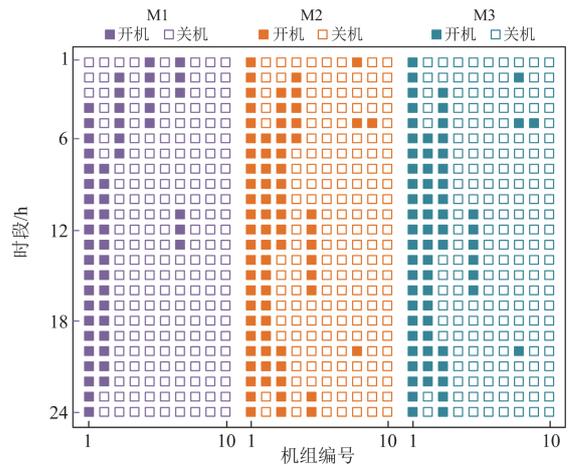


图 8 3 种方案下的机组组合结果

Fig. 8 Unit commitment results under three schemes

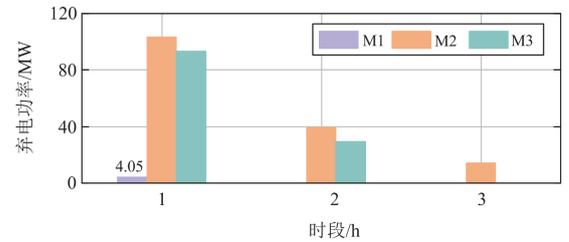


图 9 3 种方案下的弃电结果

Fig. 9 Power curtailment results under three schemes

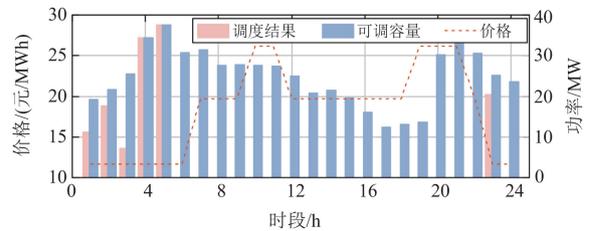


图 10 负荷备用调度结果

Fig. 10 Results of load-side reserve dispatch

量相比 M2 方案减少，备用要求降低，新能源消纳空间有所提升，总成本相对 M2 方案降低了 2.64%。

4.2.3 3 种方案下的频率安全指标

图 11—图 13 分别展示了 3 种调度方案下系统经历预想扰动后的 RoCoF、频率最低点与准稳态频率偏差。可以看到，在 M1 方案中，由于未对系统频率响应能力加以要求，24 个时段中 RoCoF 最大达到 1.1 Hz/s，频率最低至 49 Hz 以下，准稳态偏差最高为 0.75 Hz。在实际运行中，若发生有功扰动，该方案将无法保证频率安全，RoCoF 继电器、低频减载等保护措施将被触发，影响供电可靠性。而考

考虑频率约束的 M2 方案与 M3 方案, 均严格保证了 3 个频率安全指标处于阈值之内。

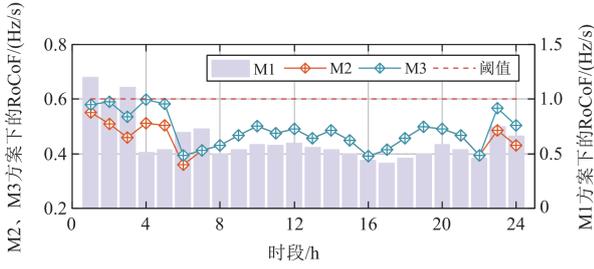


图 11 3 种方案下的 RoCoF
Fig. 11 RoCoF under three schemes

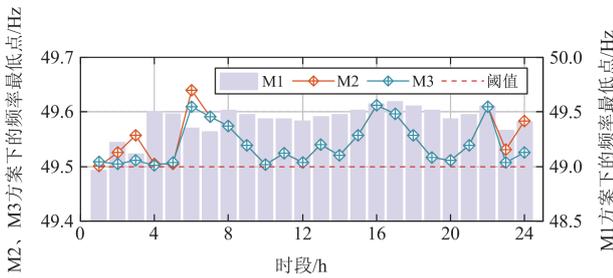


图 12 3 种方案下的频率最低点
Fig. 12 Frequency nadir under three schemes

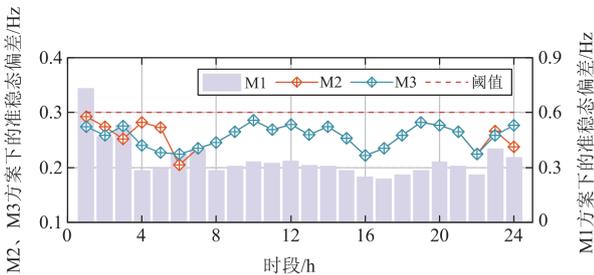


图 13 3 种方案下的准稳态频率偏差
Fig. 13 Quasi-steady-state frequency deviation under three schemes

对比 M2 方案与 M3 方案可以发现, M2 方案下的 RoCoF 相对于 M3 方案更小, 这是因为 M3 方案中负荷侧代替部分同步机组参与频率响应, 系统惯量相对于 M2 方案减小。负荷侧响应的过程与跟网型控制类似, 均属于频率偏差驱动功率输出的机理, 因此仅能提供 PFR 功率, 无法为系统提供瞬时惯量支持。进一步可以看到部分时段下 M3 方案相对于 M2 方案频率最低点更高, 准稳态频率偏差更小。这是因为负荷侧参与频率响应可以提高这两个安全指标的安全裕度, 即便 M3 方案下的系统惯量小于等于 M2 方案的, 但由于负荷侧的参与, 系统频率响应能力整体上强于 M2 方案。

4.2.4 基于 AMD 优化割的两阶段分解算法验证

通过所提出的 AMD 优化割连接主、子问题, 图 14 展示了 M2 方案与 M3 方案的迭代情况。可以看到随着迭代次数的增加, 经济成本随之增加, 这是因为对系统频率响应能力提出了更高的要求, 以满足预想扰动下的频率最低点约束。并且两种方案均在 10 次迭代内完成求解, 求解效率符合日前调度要求。

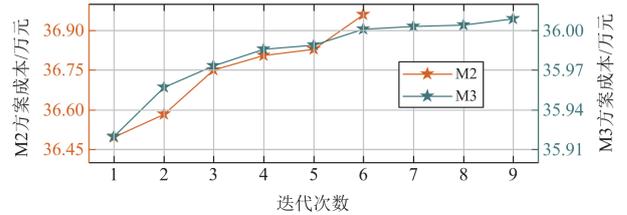


图 14 M2 方案与 M3 方案的迭代情况
Fig. 14 Iteration details of M2 and M3 schemes

为验证 AMD 优化割的优越性, 进一步对比了文献[17]提出的多方向并行补充优化割, 该方法的原理为并行优化多个问题, 每个问题中在迭代时加入的优化割方向固定, 分别为 H 增、 κ 增、 F_H 增、 P^{LD} 增与 T_R 减。表 2 列举了基于多方向并行补充优化割求解 M3 方案的结果, 可以看到, H 增、 κ 增、 F_H 增 3 个方向下的求解结果一致, 均高于本文所提方法的成本, 而 P^{LD} 增与 T_R 减方向下模型无解。

表 2 基于单一方向优化割的求解结果

Table 2 Solving results based on single-direction optimization cuts

方向	H 增	κ 增	F_H 增	T_R 减	P^{LD} 增
成本/元	369 618	369 618	369 618	无解	无解

表 3 列出了基于 AMD 优化割求解 M2 方案与 M3 方案时的优化割方向选择情况, 通过对比可以看到 M3 方案优先选择 P^{LD} 增方向, 共计 14 次, 这是因为部分时段下负荷的 PFR 备用成本相对更低, 选择该方向结果更优。而 M2 方案下则优先选择 κ 增方向, 此时会使得同步机组开机数目增加, 运行总成本相对更高。

表 3 M2 方案与 M3 方案优化割方向选择情况

Table 3 Selection of optimization cut directions for M2 and M3 schemes

方向	H 增	κ 增	F_H 增	T_R 减	P^{LD} 增
M2	0	16	7	2	0
M3	0	5	3	4	14

4.2.5 新能源渗透率对求解结果的影响

为探究新能源渗透率对求解结果的影响, 通过

修改新能源装机量，设置了 5 个场景，其中渗透率 20%为前文所研究的基础场景。图 15、图 16 分别展示了不同渗透率下 3 种方案的弃电率与总成本。可以看到，在渗透率低于 20%时，3 种方案均实现了新能源的全额消纳，然而，当渗透率高于 20%时出现了不同程度的弃电情况，其中 M2 方案弃电现象最为明显，M3 方案次之，M1 方案最少。

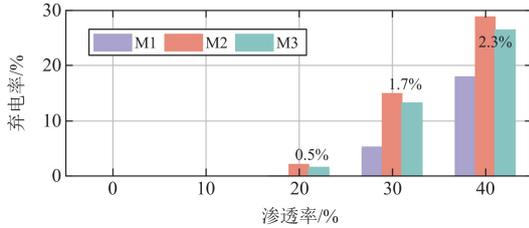


图 15 不同渗透率下 3 种方案的弃电情况

Fig. 15 Curtailment situation of three schemes under different penetration rates

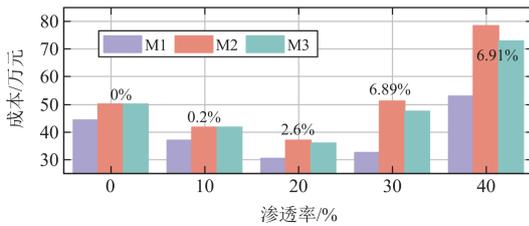


图 16 不同渗透率下 3 种方案的求解成本

Fig. 16 Solving cost of three schemes under different penetration rates

随着渗透率的增加，3 种方案的求解成本均出现先降低再增加的趋势，这是因为在渗透率小于等于 20%时，新能源的投入使得部分同步机组退出运行，选取更为经济的新能源机组作为替代。然而，当渗透率提高至一定程度后，受其波动性的影响，同步机组需预留的平抑预测误差的备用增加，并且弃电成本也同时增加。

进一步，可以看到随着渗透率的增加，M3 方案的弃电率相对于 M2 方案分别降低了 0.5%、1.7%、2.3%，总成本也相对降低了 0~6.91%。因此，考虑负荷侧的频率支持对于提高新能源消纳空间、降低运行总成本均有积极作用，且该作用在高渗透率场景下更为明显。

4.3 修改后的 IEEE118 测试系统算例分析

修改后的 IEEE118 系统中同步机共 53 台，装机量为 8655 MW，新能源装机量为 2500 MW，日尖峰负荷为 8400 MW，其余参数见文献[35]。假设功率扰动量为每时段负荷功率的 15%，球半径 θ 设

置为 4。

表 4、表 5 分别列举了 3 种方案下的总成本与频率指标范围。可以看到与 IEEE39 测试系统的结果一致，考虑频率约束后，M2 方案与 M3 方案均高于 M1 方案的成本，但可以保证频率指标处于设定阈值之内。此外，考虑负荷侧的频率支持后，M3 方案的成本相对于 M2 方案降低，降低了对同步机的需求。此外，在惯量水平方面，M2 方案相对 M3 方案更高，因此调度周期内 RoCoF 的最大值小于 M3 方案。

表 4 3 种方案下的求解成本

Table 4 Solving cost under three schemes

方案	总成本	F_1	F_2	F_3	F_4
M1	2 382 093	2 282 294	0	99 799	0
M2	2 729 523	2 439 422	0	290 101	0
M3	2 728 047	2 436 112	0	289 855	2080

表 5 3 种方案下的频率指标范围

Table 5 Frequency metrics range under three schemes

方案	RoCoF/(Hz/s)	频率最低点/Hz	准稳态频率偏差/Hz
M1	0.40~0.72	49.36~49.60	0.22~0.38
M2	0.36~0.52	49.51~49.63	0.20~0.29
M3	0.36~0.59	49.51~49.63	0.20~0.29

进一步，图 17、图 18 展示了 3 种方案在 $t = 1\text{h}$ 时的频率响应与惯量响应情况。该曲线通过 Simulink 平台仿真得到，仿真周期为 30 s，步长为 0.01 s。惯量响应曲线取频率响应曲线前 0.2 s 的结果。通过图 17 可以看到，M2 方案与 M3 方案均保证了频率指标处于安全阈值内。此外，由于 M3 方案下系统惯量水平相对 M2 方案更低，频率跌落速度更快，因此 M3 方案下频率最低点出现时间更短。但考虑到了负荷参与频率响应，其提供的调频功率为减小

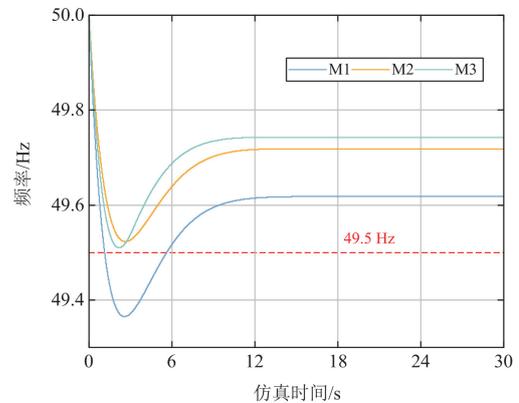


图 17 $t = 1\text{h}$ 时，3 种方案的频率响应情况

Fig. 17 Frequency response at $t = 1\text{h}$ for three schemes

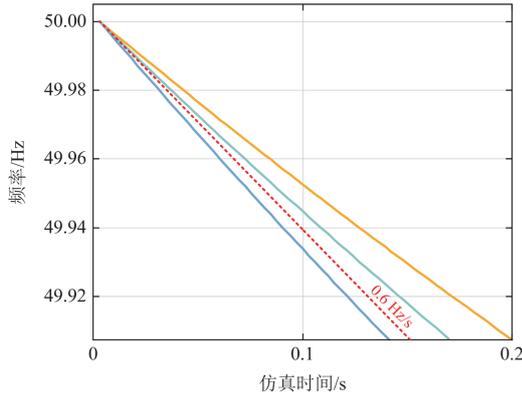

 图 18 $t = 1$ h 时, 3 种方案下惯量响应情况

 Fig. 18 Inertia response at $t = 1$ h for three schemes

准稳态频率偏差提供了正向作用, 因此 M3 方案的准稳态频率偏差相对更小。图 18 展示的惯量响应阶段的结果同样说明了这一点, M2 方案与 M3 方案均保证频率跌落速度小于 0.6 Hz/s, 但由于 M2 方案下惯量更高, 而 M3 方案下机组启停相对减少, 负荷侧无法提供瞬时的惯量支持, 因此频率跌落速率相对 M2 方案较高, 但同样处于 0.6 Hz/s 的安全阈值之内。

5 结论与展望

随着新能源渗透率的不断提高, 电力系统频率安全问题日益凸显, 本文从运行层面出发, 提出一种计及负荷侧频率支持的 DR-FCUC 优化调度方案。在修改的 IEEE39 与 IEEE118 测试系统进行算例分析, 得到如下结论。

1) 本文提出的 DR-FCUC 方案可有效提升系统在预想扰动下的频率响应能力, 保障频率安全, 并且可充分协调源-荷双侧调频备用资源, 提高经济效益。

2) 所提出的 AMD 优化割具有灵活、自主、高效的特点, 相较于以往研究使用的固定方向的优化割降低了结果的保守性, 避免了模型无解的情况发生。

3) DRCC 是处理新能源不确定性的有效方法, 调度人员可根据风险喜好、历史经验调整模型参数, 在鲁棒性与经济性之间达到折中。

然而, 本文研究仍存在一定局限, 未来可从以下几个方面展开研究。

1) 本文认为负荷聚合商从属调度机构, 并未考虑到多个运行主体之间的分布式协调优化, 此外, 对于负荷侧物理特性建模较为粗略, 有必要精细化负荷侧的响应过程。

2) 传统电网中的惯性评估多以初始 RoCoF 水平作为指标展开研究, 本文亦是以此为基础对系统

惯量提出要求。然而, 通过算例分析可以看到惯量水平与 PFR 功率之间相互替代的关系, 即两者均是以提高系统频率响应能力的重要抓手。建议未来可放宽对初始 RoCoF 的限制或更改 RoCoF 的定义, 提出广义 RoCoF 约束概念, 使得调度中对于系统惯量的关注度降低, 从而更加充分利用如负荷侧这类具有跟网型控制机理的调频资源^[36-37]。

附录 A

中间变量 α 、 ω_r 、 φ 、 λ_1 、 λ_2 、 a 、 b 与函数 $g_2(t)$ 与 $h_2(t)$ 的表达式分别为

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 - 2T_R\zeta\omega_n + T_R^2\omega_n^2}{1 - \zeta^2}} \quad (\text{A1})$$

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (\text{A2})$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega_r T_R}{1 - \zeta\omega_n T_R}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{-\zeta}\right) \quad (\text{A3})$$

$$\lambda_1 = \frac{(a-b)T_R - 1}{2b(a-b)}, \lambda_2 = \frac{1 - (a+b)T_R}{2b(a+b)} \quad (\text{A4})$$

$$a = \zeta\omega_n, b = \sqrt{\zeta^2 - 1}\omega_n \quad (\text{A5})$$

$$g_2(t) = \frac{R}{DR+1} \left[\begin{array}{l} t - \frac{2\zeta}{\omega_n} + T_R + \\ (c \cos(\omega_r t) + d \sin(\omega_r t))e^{-\zeta\omega_n t} \end{array} \right] \varepsilon(t) \quad (\text{A6})$$

式中: $c = \frac{2\zeta}{\omega_n} - T_R$; $d = \frac{2\zeta^2 - 1}{\omega_r} - \frac{T_R\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$ 。

$$h_2(t) = \frac{R\omega_n^2}{DR+1} \left[\begin{array}{l} -\frac{2a}{(a-b)^2(a+b)^2} + \\ \frac{t + T_R}{a^2 - b^2} + \\ \frac{1 - T_R(a-b)}{2b(a-b)^2} e^{-(a-b)t} - \\ \frac{1 - T_R(a+b)}{2b(a+b)^2} e^{-(a+b)t} \end{array} \right] \varepsilon(t) \quad (\text{A7})$$

参考文献

- [1] 张显, 王彩霞, 谢开, 等. "双碳"目标下中国绿色电力市场建设关键问题[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 25-33.
ZHANG Xian, WANG Caixia, XIE Kai, et al. Key issues of green electricity market construction in China under goals of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 25-33.
- [2] ZENG Y, YANG Q, LIN Y, et al. Fractional-order virtual inertia control and parameter tuning for energy-storage

- system in low-inertia power grid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(5): 70-83.
- [3] 王育飞, 张文韬, 杨铭诚, 等. 考虑虚拟控制参数调节的风储联合调频优化模型预测控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(16): 37-48.
WANG Yufei, ZHANG Wentao, YANG Mingcheng, et al. Combined wind-storage system frequency regulation optimization model predictive control considering virtual control parameter adjustment[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(16): 37-48.
- [4] 李雪萍, 王自力, 陈燕东, 等. 基于虚拟惯量模糊自适应的新能源逆变器频率主动支撑策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 25-37.
LI Xueping, WANG Zili, CHEN Yandong, et al. Active frequency support strategy for new energy inverters based on virtual inertia fuzzy adaptive control[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 25-37.
- [5] ZHANG Z, DU E, ZHU G, et al. Modeling frequency response dynamics in power system scheduling[J]. *Electric Power System Research*, 2020, 189.
- [6] 莫维科, 严焕斌, 赵天阳, 等. 计及调速系统详细模型和调频备用的大扰动下频率最低值预测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 79-87.
MO Weike, YAN Huanbin, ZHAO Tianyang, et al. Frequency nadir prediction for large disturbances in power systems considering detailed governor system models and frequency regulation reserves[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 79-87.
- [7] SHI Q, LI F, CUI H. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [8] BADESA L, TENG F, STRBAC G. Optimal portfolio of distinct frequency response services in low-inertia systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4459-4469.
- [9] BADESA L, TENG F, STRBAC G. Pricing inertia and frequency response with diverse dynamics in a mixed-integer second-order cone programming formulation[J]. *Applied Energy*, 2020, 260.
- [10] YANG L, XU Y, ZHOU J, et al. Distributionally robust frequency constrained scheduling for an integrated electricity-gas system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(4): 2730-2743.
- [11] XU D, WU Z, ZHU L. Frequency-constrained unit commitment considering pumped hydro storage's participation in primary frequency regulation[C] // 2023 IEEE 7th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), December 15-18, 2023, Hangzhou, China: 556-562.
- [12] ZHANG Y, GUO Q, ZHOU Y, et al. Frequency-constrained unit commitment for power systems with high renewable energy penetration[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 153.
- [13] LI K, AI X, FANG J, et al. Frequency security constrained robust unit commitment for sufficient deployment of diversified frequency support resources[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2024, 60(1): 1725-1737.
- [14] LAGOS D T, HATZIARGYRIOU N D. Data-driven frequency dynamic unit commitment for island systems with high RES penetration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4699-4711.
- [15] AHMADI H, GHASEMI H. Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1536-1545.
- [16] 王霞, 应黎明, 卢少平. 考虑动态频率约束的一次调频和二次调频联合优化模型[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 2858-2867.
WANG Xia, YING Liming, LU Shaoping. Joint optimization model for primary and secondary frequency regulation considering dynamic frequency constraint[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2858-2867.
- [17] 申家锴, 李卫东, 李正文, 等. 计及一次调频死区与限幅的高比例风电电力系统机组组合[J]. *电网技术*, 2022, 46(4): 1326-1334.
SHEN Jiakai, LI Weidong, LI Zhengwen, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering the deadband and limiter of primary frequency response[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(4): 1326-1334.
- [18] 王亚军, 杨立波, 马斌, 等. 虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(19): 88-98.
WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordination and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(19): 88-98.
- [19] YUAN Y, ZHANG Y, WANG J, et al. Enhanced frequency-constrained unit commitment considering variable-droop frequency control from converter-based generator[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 38(2): 1094-1110.
- [20] YE H, ZHOU C, WEI N, et al. Inter-regional unit commitment and PV scheduling considering frequency constraints[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 221.
- [21] LI J, QIAO Y, LU Z, et al. Integrated frequency-

- constrained scheduling considering coordination of frequency regulation capabilities from multi-source converters[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2024, 12(1): 261-274.
- [22] 叶婧, 林宇琦, 张磊, 等. 考虑负荷侧惯量不确定性的机组组合[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(7): 11-21.
YE Jing, LIN Yuqi, ZHANG Lei, et al. Unit commitment considering load-side inertia uncertainty[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(7): 11-21.
- [23] WANG L, FAN H, LIANG J, et al. Multi-area frequency-constrained unit commitment for power systems with high penetration of renewable energy sources and induction machine load[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2024, 12(3): 754-766.
- [24] SHI Q, LI F, LIU G, et al. Thermostatic load control for system frequency regulation considering daily demand profile and progressive recovery[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6259-6270.
- [25] ZHOU K, CHENG L, WEN L, et al. A coordinated charging scheduling method for electric vehicles considering different charging demands[J]. *Energy*, 2020, 213.
- [26] SHEN Y, LI Y, ZHANG Q, et al. State-shift priority based progressive load control of residential HVAC units for frequency regulation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 182.
- [27] 张程, 罗玉锦, 陈昌亮. 考虑源荷不确定的多园区微网与共享储能电站协同优化运行[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(24): 77-89.
ZHANG Cheng, LUO Yujin, CHEN Changliang. Collaborative optimization operation of multi park microgrids and shared energy storage power stations considering source load uncertainty[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(24): 77-89.
- [28] 马士聪, 郭剑波, 汪梦军, 等. 能量视角下电力系统暂态频率问题初探[J]. *电网技术*, 2024, 48(4): 1373-1382.
MA Shicong, GUO Jianbo, WANG Mengjun, et al. A preliminary exploration of transient frequency issues in the power system from an energy perspective[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(4): 1373-1382.
- [29] DAI J, LIU Y, YAN C, et al. A coordinated control method of aggregate AC load for auxiliary frequency regulation service[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 147.
- [30] BAO Y, LI Y, WANG B, et al. Demand response for frequency control of multi-area power system[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(1): 20-29.
- [31] ZHANG Y, SHEN S, MATHIEU J L. Distributionally robust chance-constrained optimal power flow with uncertain renewables and uncertain reserves provided by loads[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(2): 1378-1388.
- [32] 江一航, 赵书强, 王慧, 等. 计及风电、调相机支撑特性的频率安全约束分布鲁棒机组组合调度方法[J/OL]. *电工技术学报*: 1-15[2024-09-21]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.232164>.
JIANG Yihang, ZHAO Shuqiang, WANG Hui, et al. Distributionally robust frequency constrained unit commitment with frequency support of wind power and synchronous condenser[J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*: 1-15[2024-09-21]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.232164>.
- [33] 林恒先, 侯凯元, 陈磊, 等. 高比例风电电力系统考虑频率安全约束的机组组合[J]. *电网技术*, 2021, 45(1): 1-9.
LIN Hengxian, HOU Kaiyuan, CHEN Lei, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering frequency safety constraints[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(1): 1-9.
- [34] 宋耿立. Wasserstein 测度下考虑弃水的分布鲁棒多源动态最优潮流[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
- [35] DR-FCUC 算例参数[EB/OL]. [2024-05-23]. https://www.jianguoyun.com/p/DZr25fsQko_hChis9s0FIAA
- [36] SAJADI A, KENYON R W, HODGE B M. Synchronization in electric power networks with inherent heterogeneity up to 100% inverter-based renewable generation[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1).
- [37] 闵勇, 陈磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(3): 855-867.
MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(3): 855-867.

收稿日期: 2024-07-24; 修回日期: 2024-10-23

作者简介:

许丹阳(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为低惯量电力系统优化调度; E-mail: epdyxu@mail.scut.edu.cn

武志刚(1975—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统数值仿真技术、复杂网络理论在电力系统中的应用等; E-mail: epzgwu@scut.edu.cn

管霖(1970—), 女, 博士, 教授, 研究方向为人工智能在电力工程中的应用、电力系统规划与可靠性等。E-mail: lguan@scut.edu.cn

(编辑 石晋美)