

计及自动发电控制精细响应动作的机会约束经济调度方法

雷星雨¹, 杨林泽¹, 陈咏涛², 刘育明², 张小兵¹, 杨知方¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 400044;

2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆市 401123)

摘要: 新能源的随机波动性致使机组的自动发电控制(AGC)动作行为对系统运行的影响愈发凸显, 现有随机优化经济调度方法难以计及调度时段内 AGC 机组在细颗粒时间尺度下的实际响应动作, 严重威胁到电网安全运行。为此, 文中提出一种显式计及 AGC 细颗粒时间尺度响应动作的机会约束经济调度方法。首先, 构建了考虑净负荷不确定性的 AGC 细颗粒时间尺度响应模型, 以 AGC 实际响应策略为依托, 在机会约束框架下构建了 AGC 机组对净负荷波动及其不确定性的响应模式, 实现了在细颗粒时间尺度下对 AGC 机组响应动作的精确建模。然后, 提出了内嵌 AGC 细颗粒时间尺度响应模型的机会约束经济调度方法, 在机会约束经济调度模型中考虑了 AGC 机组在细颗粒时间尺度下的响应动作。最后, 解析转化了所提机会约束经济调度模型, 实现了 AGC 细颗粒时间尺度响应动作的显式表征。文中所提建模方法不局限于机会约束, 也可适用于多场景、鲁棒优化等随机优化方法。算例分析表明, 文中所提方法较现有机会约束经济调度方法提供了更为经济安全的调度方案。

关键词: 不确定性; 调频备用容量; 机会约束; 经济调度; 细颗粒时间尺度; 自动发电控制

0 引言

风、光等新能源固有的随机波动性致使系统净负荷不确定性激增。为应对系统净负荷日益增长的不确定性, 多场景法^[1-2]、鲁棒优化^[3-4]以及机会约束^[5-6]等随机优化方法被引入电力系统经济调度, 并已取得了一定的工业应用。同时, 自动发电控制(automatic generation control, AGC)作为电网平抑净负荷不确定性的主要技术手段, 也在上述随机优化方法中被广泛应用于构建应对净负荷不确定性的 AGC 机组响应模型^[7-8]。为保障系统安全稳定运行, 电力系统需要在日前调度中考虑 AGC 机组应对净负荷波动的响应动作, 进而将净负荷波动对系统变量的影响机理纳入日前调度中考虑, 从而更好地指导 AGC 指令在各调节资源间的优化分配, 为系统运行预留充足的裕度。

然而, 传统随机优化经济调度仅考虑了调度时刻点的 AGC 机组出力及预留容量, 并未计及调度时

段内 AGC 机组在细颗粒时间尺度下(一般为 4 s 至 3 min)的实际响应动作。由于现有调度方法忽略了上述因素, 在系统运行层面, 经济调度模型无法计及 AGC 机组在细颗粒时间尺度下的调节需求, 使得传统的经济调度模型与实际电力系统运行情况并不一致。这种不一致性使得 AGC 机组调度计划安排无法考虑调度时段内 AGC 机组的响应动作, 可能导致 AGC 机组调度计划安排不合理, 从而威胁到电网经济安全运行^[9]。为此, 需在随机优化经济调度模型中显式计及 AGC 细颗粒时间尺度响应动作, 在保证系统经济运行的同时, 为高比例新能源电力系统经济安全运行提供模型基础。

现有随机优化方法在给定调度时刻点对 AGC 机组应对净负荷不确定性响应动作的建模已较为成熟, 其核心思路是通过 AGC 仿射因子构建 AGC 机组响应出力与净负荷不确定性特征的线性映射关系, 以此确定 AGC 机组所需的调频备用容量, 并将其作为约束条件构建 AGC 机组响应模型^[10]。文献[11]以海量场景表征净负荷不确定性特征, 得到了 AGC 机组的期望调频备用容量。文献[12]构建了新能源出力最恶劣场景与 AGC 机组响应出力的线性映射关系。文献[13-14]建立了 AGC 机组响应出

收稿日期: 2024-03-22; 修回日期: 2024-08-13。

上网日期: 2024-09-27。

国网重庆市电力公司科技项目(522023220025); 国家自然科学基金青年基金资助项目(52307083); 重庆市博士后科学基金资助项目(CSTB2023NSCQ-BHX0177)。

力可在给定概率下平抑净负荷不确定性的机会约束经济调度模型。然而,上述方法仅构建了调度时刻点 AGC 机组响应出力与净负荷不确定性的映射关系,缺乏细颗粒时间尺度下 AGC 机组响应动作的精细化建模。事实上,在经济调度中忽视 AGC 机组的实际响应动作,将导致所需预留容量过多或过少,造成不必要的经济损失^[15]。

工业界普遍采用确定性调度决策方法实现 AGC 对净负荷不确定性的响应,其核心思路是:在求解经济调度模型前,根据运行经验按一定比例设定各 AGC 机组需预留的调频备用容量,要求机组预留备用容量之和能够满足净负荷在调度时段内的调频需求,确保系统具有足够的运行裕度来应对净负荷不确定性^[16]。该类方法简单易实施,但无法有效考虑净负荷不确定性特征,并且其本质是将经济调度与 AGC 响应分割为两个独立的过程,势必会造成不必要的经济损失与潜在的安全隐患。

综上所述,现有经济调度方法对 AGC 响应动作的建模还存在以下问题:1)随机优化经济调度方法仅能构建调度时刻点的 AGC 响应动作模型,缺乏在细颗粒时间尺度下 AGC 响应动作的精细化建模;2)现有经济调度方法割裂了经济调度与 AGC 响应,导致经济调度结果未能计及 AGC 响应动作,威胁到电网经济安全运行。

为解决上述问题,本文主要开展了以下两方面工作:

1)构建了考虑净负荷不确定性的 AGC 细颗粒时间尺度响应模型。本文以 AGC 实际响应策略为依托,在机会约束框架下建立了细颗粒时间尺度下 AGC 机组响应动作的精细化模型,揭示了 AGC 机组响应动作与净负荷不确定性特征的关联关系。

2)提出了显式内嵌 AGC 细颗粒时间尺度响应模型的机会约束经济调度方法。在现有机会约束经济调度模型的基础上,构建了内嵌 AGC 细颗粒时间尺度响应模型的机会约束经济调度解析线性模型,为电力系统安全经济运行提供了模型基础。

1 AGC 响应策略及其响应动作精细化建模

传统随机优化经济调度仅考虑了调度时刻点的 AGC 机组响应动作,而在实际电力系统运行调度中,AGC 机组需在调度时段内不断调整出力,以实时响应净负荷随机波动及其不确定性。经济调度模型与实际电力系统运行情况不一致,会导致调度决策难以考虑系统调度时间内 AGC 机组的响应动作,

影响系统运行经济性,甚至可能由于调频备用容量不足导致调度计划难以满足实时运行需求,影响系统安全性。为有效考虑调度时段内净负荷随机波动情况及其不确定性,本章在机会约束框架下构建细颗粒时间尺度下 AGC 机组响应动作精细化模型。需要说明的是,本章所建立的 AGC 机组响应动作精细化模型不会改变现有经济调度在调度时刻点发送调度指令的固有模式,但它使得随机经济调度模型能够考虑调度时间内机组为响应净负荷随机波动及其不确定性所进行的出力调整,从而计及调度时间内 AGC 响应动作所需的调整费用,并确保机组调度计划能够有效应对调度时段内净负荷的随机波动情况。

在调度时段内,AGC 机组将调整出力以响应净负荷随机波动及其不确定性。为对 AGC 机组响应动作进行精细化建模,本文将单个调度时段细分为 K 个短时段,考虑机组 AGC 响应短时段的时间分辨率为 $4 \sim 3 \text{ min}$ (具体的时间分辨率视不同的 AGC 机组响应性能的实际情况而定,在本文研究中考虑短时段具体时间分辨率为 15 s)。在实时运行阶段,电力系统每隔一个短时段便监测一次系统功率不平衡量。如果功率不平衡量超过一定阈值(在工业实践中被称为区域调节需求的死区,用于防止 AGC 机组频繁调节),那么提供频率调节服务的调频机组便需要调整自身出力以重新平衡功率,如图 1 所示,否则机组无须调整自身出力。此外,与随机优化经济调度模型一样,所建模型仍然考虑了调度时段初始的功率平衡。

本文将 AGC 机组在运行中的实际出力分解为

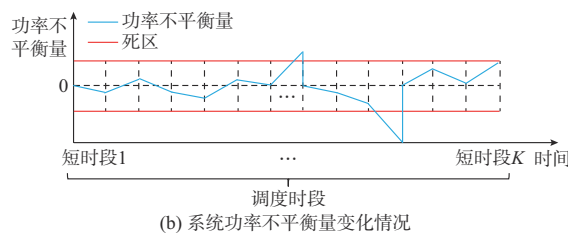
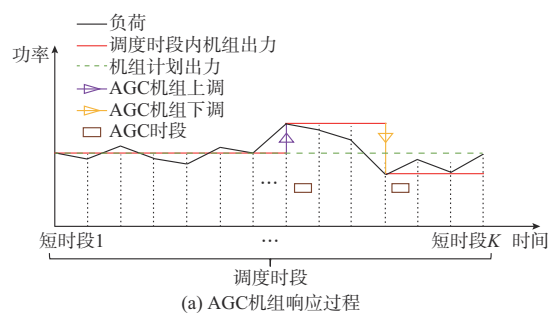


图 1 AGC 机组响应动作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AGC unit response action

计划出力和响应出力。如图2所示,AGC机组实际出力的变化包括计划出力的变化和响应出力的变化。其中,计划出力的变化是机组跟踪调度计划而引起的,而响应出力的变化则是由AGC机组响应所引起的,其目的是应对调度时段内机组计划出力和实际净负荷随机波动及其不确定性之间的偏差,从而保障系统实时的功率平衡。对于AGC机组跟踪调度计划而引起的出力变化,本文采用线性跟踪模式来描述,即在调度时段内的计划出力随着时间变化而线性变化,其变化率由相邻调度时刻点的出力计划确定。如图2所示,尽管AGC机组响应出力也与机组调度计划跟踪模式相关,但本文对于净负荷随机波动及其不确定性与AGC响应动作间关联关系的分析并不局限于线性跟踪模式,其他跟踪模式也同样适用。

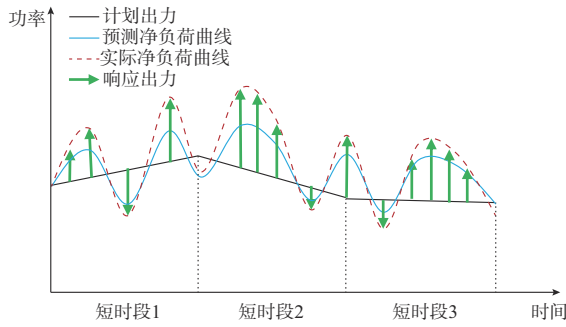


图2 AGC机组计划出力与响应出力示意图
Fig. 2 Schematic diagram of scheduled generation output and response generation output of AGC units

本文根据响应出力的变化,在机会约束框架下构建AGC机组响应动作精细化模型,具体步骤如下。

1)根据细颗粒度净负荷预测曲线(可确定调度时刻点各机组计划出力之和)及线性跟踪模式确定AGC机组在调度时间内的总计划出力。

$$P_{t,1}^{\text{sc,total}} = \sum_{i \in I_D} D_{i,t,1}^{\text{fc}} \quad (1)$$

$$P_{t,k}^{\text{sc,total}} = P_{t,1}^{\text{sc,total}} + \frac{(k-1)(P_{t+1,1}^{\text{sc,total}} - P_{t,1}^{\text{sc,total}})}{K} \quad (2)$$

式中: $D_{i,t,1}^{\text{fc}}$ 为调度时刻点 t 负荷节点 i 上的净负荷预测功率需求; $P_{t,1}^{\text{sc,total}}$ 为调度时刻点 t 的AGC机组总计划出力,其在调度时刻点与净负荷保持功率平衡; $P_{t,k}^{\text{sc,total}}$ 为调度时段 t 内短时刻点 k 的AGC机组总计划出力,其由线性跟踪模式确定; K 为调度时段下短时刻点的总数; I_D 为系统中负荷节点的集合。

值得说明的是,在本文所提方法中,调度时段 t 的时间分辨率与传统经济调度的时间分辨率相同,

通常为1h或15min,在实际中视具体调度方法而定。而调度时段下短时刻点的总数 K 则是根据机组AGC响应短时段的具体时间分辨率以及调度时段 t 的时间分辨率来确定的,同样视具体调度方法以及机组情况而定。

2)构建调度时段内考虑净负荷随机波动及其不确定性的系统功率总偏差,如式(3)所示。

$$\Delta D_{t,1}^{\text{total}} = \sum_{i \in I_D} \Delta D_{i,t,1} \quad (3)$$

$$\Delta D_{t,k}^{\text{total}} = \left(\sum_{i \in I_D} D_{i,t,k}^{\text{fc}} - \sum_{i \in I_D} D_{i,t,k-1}^{\text{fc}} \right) - (P_{t,k}^{\text{sc,total}} - P_{t,k-1}^{\text{sc,total}}) + \sum_{i \in I_D} \Delta D_{i,t,k} \quad (4)$$

式中: $\Delta D_{t,1}^{\text{total}}$ 为系统在调度时刻点 t 的系统功率总偏差; $\Delta D_{t,k}^{\text{total}}$ 为系统在调度时段 t 内短时刻点 k 的系统功率总偏差; $D_{i,t,k}^{\text{fc}}$ 为负荷节点 i 上的净负荷在调度时段 t 内短时刻点 k 的预测功率需求; $\Delta D_{i,t,k}$ 为负荷节点 i 上的净负荷在调度时段 t 内短时刻点 k 的预测功率需求与实际功率需求的偏差,即净负荷不确定性。

3)考虑调节需求死区,构建AGC机组响应动作模型。

$$\Delta P_{g,t,1} = \beta_{g,t} \Delta D_{t,1}^{\text{total}} \quad (5)$$

$$\Delta P_{g,t,k} = \begin{cases} \beta_{g,t} \Delta D_{t,k}^{\text{total}} & \Pr(|\Delta D_{t,k}^{\text{total}}| \geq \theta) \geq 1 - \epsilon \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{g,t,1}$ 为AGC机组 g 在调度时刻点 t 的响应出力,其由AGC机组 g 的AGC参与因子 $\beta_{g,t}$ 与该调度时刻点的系统功率总偏差 $\Delta D_{t,1}^{\text{total}}$ 决定,AGC参与因子决定了AGC机组对新能源不确定性的响应比例; $\Delta P_{g,t,k}$ 为AGC机组 g 在调度时段 t 内短时刻点 k 的响应出力($k \neq 1$),与 $\Delta P_{g,t,1}$ 不同, $\Delta P_{g,t,k}$ 仅在系统功率总偏差高于死区 θ 的概率大于等于给定概率值 $1 - \epsilon$ 时,AGC机组才进行相应调节, ϵ 为系统可接受的约束越限概率。

需要特别说明的是,本文将每个调度时段的AGC参与因子 $\beta_{g,t}$ 作为决策变量参与调度优化,在目前考虑新能源强不确定性的随机优化方法(如鲁棒优化^[17]、分布式鲁棒优化^[13]及机会约束^[18]等)中,多篇文献也说明了相较于所有调度时段的AGC参与因子保持固定不变,AGC参与因子作为决策变量参与调度可提高系统灵活性并降低运行成本,其核心原因在于AGC参与因子作为决策变量参与调度拓宽了经济调度问题的决策空间,使得AGC机组能够更加灵活地应对净负荷随机波动产生的不确定

性,并且由于经济调度问题具有更大的决策空间,其所得的最优解具有更低的运行成本。

至此,本章基于细颗粒度净负荷预测曲线构建了AGC机组响应动作精细化模型。在经济调度阶段,有效考虑了AGC机组对净负荷随机波动及其不确定性的响应动作。在第2章中,本文将上述模型嵌入传统随机优化经济调度模型中,构建考虑AGC细颗粒时间尺度响应动作的机会约束经济调度模型。

2 考虑AGC细颗粒时间尺度响应动作的机会约束经济调度模型

结合第1章提出的AGC机组响应动作精细化模型,本章考虑AGC细颗粒时间尺度响应动作,构建机会约束经济调度模型。

2.1 目标函数

本文所提机会约束经济调度模型的目标函数包含两部分:1)系统发电成本;2)调频备用成本。具体如下:

$$\min \sum_{g \in I_G} \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^K \frac{c_{g,1}}{K} P_{g,t,k}^{\text{sc}} + c_{g,2} (R_{g,t}^{\text{up}} + R_{g,t}^{\text{dn}}) \right] \quad (7)$$

式中: $P_{g,t,k}^{\text{sc}}$ 为AGC机组 g 在调度时段 t 内短时刻点 k 的计划出力; $R_{g,t}^{\text{up}}$ 和 $R_{g,t}^{\text{dn}}$ 分别为AGC机组 g 在调度时刻点 t 的上、下调频备用容量; $c_{g,1}$ 和 $c_{g,2}$ 分别为AGC机组 g 的发电报价与调频备用容量报价; I_G 为系统中火电机组的集合; T 为经济调度中调度时段 t 的总数。

2.2 运行约束

1) 功率平衡约束

在本文中,假设所有火电机组均为AGC机组。因此,在调度时刻点,系统需保证所有AGC机组总计划出力与净负荷预测总功率需求相等。

$$\sum_{g \in I_G} P_{g,t,1}^{\text{sc}} = \sum_{i \in I_D} D_{i,t,1}^{\text{fc}} \quad (8)$$

式中: $P_{g,t,1}^{\text{sc}}$ 为AGC机组 g 在调度时刻点 t 的计划出力。

2) 机组计划出力约束

根据AGC机组线性跟踪模式,其在调度时段 t 内短时刻点 k 的计划出力 $P_{g,t,k}^{\text{sc}}$ 可由下式计算得出。

$$P_{g,t,k}^{\text{sc}} = P_{g,t,k-1}^{\text{sc}} + \frac{P_{g,t+1,1}^{\text{sc}} - P_{g,t,1}^{\text{sc}}}{K} \quad (9)$$

式中: $P_{g,t,k}^{\text{sc}}$ 为AGC机组 g 在调度时段 t 内短时刻点 k 的计划出力。

3) 机组实际出力约束与净负荷实际功率需求

约束

机组实际出力为其计划出力与响应出力之和。同理,净负荷实际功率需求为其预测功率需求及其不确定性之和,具体如下式所示。

$$P_{g,t,k} = P_{g,t,k}^{\text{sc}} + \Delta P_{g,t,k} \quad (10)$$

$$D_{i,t,k} = D_{i,t,k}^{\text{fc}} + \Delta D_{i,t,k} \quad (11)$$

式中: $P_{g,t,k}$ 为AGC机组 g 在调度时段 t 内短时刻点 k 的实际出力; $D_{i,t,k}$ 为负荷节点 i 上的净负荷在调度时段 t 内短时刻点 k 的实际功率需求。

3) 机组调频备用容量约束

机组调频备用容量需在每个调度时段内的短时刻调度点,在给定概率 $1 - \epsilon$ 下满足AGC机组调整需求,并且AGC机组实际出力需在机组物理出力范围以内,具体约束如下式所示。

$$\Pr(-\Delta P_{g,t,k} \geq -R_{g,t}^{\text{up}}) \geq 1 - \epsilon \quad (12)$$

$$\Pr(\Delta P_{g,t,k} \geq -R_{g,t}^{\text{dn}}) \geq 1 - \epsilon \quad (13)$$

$$-P_{g,t,k}^{\text{sc}} - R_{g,t}^{\text{up}} \geq -P_g^{\text{max}} \quad (14)$$

$$P_{g,t,k}^{\text{sc}} - R_{g,t}^{\text{dn}} \geq P_g^{\text{min}} \quad (15)$$

式中: P_g^{max} 和 P_g^{min} 分别为AGC机组 g 的最大、最小出力限值。

4) 线路潮流约束

系统线路潮流需在每个调度时段内的短时刻点,保证其在给定概率 $1 - \epsilon$ 下满足线路物理限值,有

$$\Pr\left(-\sum_{i \in I} G_{li} (P_{i,t,k} - D_{i,t,k}) \geq -F_l\right) \geq 1 - \epsilon \quad (16)$$

$$\Pr\left(\sum_{i \in I} G_{li} (P_{i,t,k} - D_{i,t,k}) \geq -F_l\right) \geq 1 - \epsilon \quad (17)$$

式中: G_{li} 为支路 l 对节点 i 的功率传输分布因子; I 为系统中节点的集合; $P_{i,t,k}$ 为在调度时段 t 内短时刻点 k 节点 i 上的机组总出力值; F_l 为支路 l 的支路功率上限。

需要特别说明的是,本文假设系统所有火电机组均为AGC机组,具备快速响应净负荷随机波动及其不确定性的能力,故不考虑机组的爬坡约束。但本文所提方法对仅有部分机组为AGC机组的实际系统仍然适用。

由此,建立了考虑AGC细颗粒时间尺度响应动作的机会约束经济调度模型。通过在经济调度中考虑AGC机组精细化响应动作和细颗粒度时间尺度下的系统运行约束,进一步规范与约束AGC机组行为,以保证系统经济安全运行。值得一提的是,本文的重点是如何制定AGC参与因子 $\beta_{g,t}$,使得AGC机组能够根据所下达的指令以及功率失配信息 $\Delta D_{i,1}^{\text{total}}$

与 $\Delta D_{i,k}^{\text{total}}$, 实时调整出力以消纳系统净负荷的不确定性。对于 AGC 机组本身的 AGC 性能, 超出了本文的研究范围, 故不做过多考虑。

所建模型为机会约束线性规划模型, 在下一章中将其进行解析转化。尽管所建模型对细颗粒时间尺度下 AGC 机组的响应出力进行了考虑, 其所建模型最终的输出仍为 AGC 机组在调度时刻点的计划出力 $P_{i,t,1}^{\text{sc}}$ 以及预留调频备用容量 $R_{i,t}^{\text{up}}$ 和 $R_{i,t}^{\text{dn}}$, 与现有经济调度模型一致。

3 机会约束经济调度模型的解析转化

如第 2 章所述, 所建立的机会约束经济调度模型无法直接求解, 需要将机会约束解析转化。基于文献 [19], 经济调度模型中的机会约束可通过式 (18) 形式进行解析转化。具体推导过程见附录 A。

$\Pr(g(x, 0) + \mathbf{b}^T(x)\Delta D \leq g_{\max}) \geq 1 - \epsilon \Rightarrow$

$$g(x, 0) + \mathbf{b}^T(x)\boldsymbol{\mu}_{\text{D}} + \Gamma_{\epsilon}\sqrt{\mathbf{b}^T(x)\boldsymbol{\Sigma}_{\text{D}}\mathbf{b}(x)} \leq g_{\max} \quad (18)$$

式中: $g(x, 0)$ 表示预测运行点的系统运行边界函数, 即不考虑净负荷功率不确定性时的系统运行边界; $\mathbf{b}(\cdot)$ 为函数 $g(\cdot)$ 对净负荷功率不确定性 ΔD 的灵敏度矩阵, 其本质为电力系统控制决策变量 x 的线性函数矩阵, x 用向量表示; $\mathbf{b}^T(x)\Delta D$ 表示由净负荷功率不确定性引起的系统运行边界不确定性; Γ_{ϵ} 为常数, 表示不确定性标准差的转移因子; $\boldsymbol{\mu}_{\text{D}}$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}_{\text{D}}$ 分别为净负荷功率不确定性的均值向量和协方差矩阵; g_{\max} 表示系统运行边界约束上限。解析后的约束为凸二阶锥约束, 可利用商业求解器直接求解。

式 (6) 中的逻辑判别式条件 $\Pr(|\Delta D_{i,k}^{\text{total}}| \geq \theta) \geq 1 - \epsilon$, 可以转化为一组机会约束相关的逻辑判别式条件: $\Pr(\Delta D_{i,k}^{\text{total}} \leq \theta) \geq 1 - \epsilon$ 或 $\Pr(-\Delta D_{i,k}^{\text{total}} \leq \theta) \geq 1 - \epsilon$ 。对于该判别式中的两个机会约束, 可根据式 (18) 将其解析转化为以下形式:

$$\left(\sum_{i \in I_{\text{D}}} D_{i,t,k}^{\text{fc}} - \sum_{i \in I_{\text{D}}} D_{i,t,k-1}^{\text{fc}} \right) - (P_{i,t,k}^{\text{sc,total}} - P_{i,t,k-1}^{\text{sc,total}}) + \mathbf{e}_{N_{\text{D}}}^T \boldsymbol{\mu}_{\text{D},t,k} + \Gamma_{\epsilon}\sqrt{\mathbf{e}_{N_{\text{D}}}^T \boldsymbol{\Sigma}_{\text{D},t,k} \mathbf{e}_{N_{\text{D}}}} \leq \theta \quad (19)$$

$$-\left(\sum_{i \in I_{\text{D}}} D_{i,t,k}^{\text{fc}} - \sum_{i \in I_{\text{D}}} D_{i,t,k-1}^{\text{fc}} \right) + (P_{i,t,k}^{\text{sc,total}} - P_{i,t,k-1}^{\text{sc,total}}) - \mathbf{e}_{N_{\text{D}}}^T \boldsymbol{\mu}_{\text{D},t,k} + \Gamma_{\epsilon}\sqrt{\mathbf{e}_{N_{\text{D}}}^T \boldsymbol{\Sigma}_{\text{D},t,k} \mathbf{e}_{N_{\text{D}}}} \leq \theta \quad (20)$$

式中: $\mathbf{e}_{N_{\text{D}}}$ 为 N_{D} 维的单位列向量, 其中, N_{D} 为负荷节点数; $\boldsymbol{\mu}_{\text{D},t,k}$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}_{\text{D},t,k}$ 分别为在调度时段 t 内短时刻点 k 的净负荷功率不确定性的均值向量和协方差矩阵。结合式 (19)、式 (20), 式 (6) 可以转化为以

下形式:

$$\Delta P_{i,t,k} = \begin{cases} \beta_{i,t} \Delta D_{i,t,k}^{\text{total}} & \text{式(19)或式(20)成立} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $k \neq 1$; $\beta_{i,t}$ 为调度时段 t 节点 i 上的机组总参与因子值。

机会约束式 (12) 和式 (13) 的解析转化如下所示:

$$-\beta_{g,t} \left[\left(\sum_{i \in I_{\text{D}}} D_{i,t,k}^{\text{fc}} - \sum_{i \in I_{\text{D}}} D_{i,t,k-1}^{\text{fc}} \right) - (P_{i,t,k}^{\text{sc,total}} - P_{i,t,k-1}^{\text{sc,total}}) \right] - \mathbf{b}_{p,g}(\beta_{g,t}) \boldsymbol{\mu}_{\text{D},t,k} + \Gamma_{\epsilon}\sqrt{\mathbf{b}_{p,g}^T(\beta_{g,t}) \boldsymbol{\Sigma}_{\text{D},t,k} \mathbf{b}_{p,g}(\beta_{g,t})} \leq R_{g,t}^{\text{up}} \quad (22)$$

$$\beta_{g,t} \left[\left(\sum_{i \in I_{\text{D}}} D_{i,t,k}^{\text{fc}} - \sum_{i \in I_{\text{D}}} D_{i,t,k-1}^{\text{fc}} \right) - (P_{i,t,k}^{\text{sc,total}} - P_{i,t,k-1}^{\text{sc,total}}) \right] + \mathbf{b}_{p,g}(\beta_{g,t}) \boldsymbol{\mu}_{\text{D},t,k} + \Gamma_{\epsilon}\sqrt{\mathbf{b}_{p,g}^T(\beta_{g,t}) \boldsymbol{\Sigma}_{\text{D},t,k} \mathbf{b}_{p,g}(\beta_{g,t})} \leq R_{g,t}^{\text{dn}} \quad (23)$$

$$\mathbf{b}_{p,g}(\beta_{g,t}) = (\beta_{g,t} \mathbf{e}_{N_{\text{D}}}^T)^T \quad (24)$$

式中: $\mathbf{b}_{p,g}(\beta_{g,t})$ 表示 AGC 机组 g 在调度时刻点 t 的响应出力对在调度时段 t 内短时刻点 k 的净负荷功率不确定性 $\Delta D_{i,t,k}$ 的灵敏度矩阵。

同理, 机会约束式 (16) 和式 (17) 的解析转化如下所示:

$$\sum_{i \in I} G_{li} (P_{i,t,k}^{\text{sc}} - D_{i,t,k}^{\text{fc}}) + \mathbf{b}_l(\beta_l) \boldsymbol{\mu}_{\text{D},t,k} + \Gamma_{\epsilon}\sqrt{\mathbf{b}_l^T(\beta_l) \boldsymbol{\Sigma}_{\text{D},t,k} \mathbf{b}_l(\beta_l)} \leq F_l \quad (25)$$

$$-\sum_{i \in I} G_{li} (P_{i,t,k}^{\text{sc}} - D_{i,t,k}^{\text{fc}}) - \mathbf{b}_l(\beta_l) \boldsymbol{\mu}_{\text{D},t,k} + \Gamma_{\epsilon}\sqrt{\mathbf{b}_l^T(\beta_l) \boldsymbol{\Sigma}_{\text{D},t,k} \mathbf{b}_l(\beta_l)} \leq F_l \quad (26)$$

$$\mathbf{b}_l(\beta_l) = \left[\left(\sum_{j \in I_{\text{G}}} G_{lj} \beta_{j,t} \right) \mathbf{e}_{N_{\text{D}}}^T + \mathbf{G}_l \right]^T \quad (27)$$

式中: $P_{i,t,k}^{\text{sc}}$ 为在调度时段 t 内短时刻点 k 节点 i 上的机组调度总出力值; $\mathbf{b}_l(\beta_l)$ 为在调度时刻点 t 支路 l 上的不确定性潮流对在调度时段 t 内短时刻点 k 的净负荷功率不确定性 $\Delta D_{i,t,k}$ 的灵敏度矩阵; β_l 为系统中 AGC 机组在调度时刻点 t 的参与因子向量; G_l 为支路 l 对系统节点的功率传输分布因子向量。

上文所提机会约束经济调度模型可由此转变为二阶锥凸模型, 可用商业求解器直接求解, 具体解析模型如下:

1) 目标函数: 式 (7);

2) 约束条件: 式 (8) 一式 (11)、式 (14)、式 (15)、式 (21) 一式 (27)。

在该模型中, 决策变量包括: AGC 机组计划出

力 $P_{i,t,k}^{sc}$ 、调频备用容量 $R_{i,t}^{up}$ 和 $R_{i,t}^{dn}$ 、AGC 参与因子 $\beta_{i,t}$ 。模型的关键性参数包括新能源不确定性参数、约束越限阈值 ϵ 等。

需要注意的是,该解析模型可根据净负荷分布情况计算合适的不确定性标准差转移因子 Γ_ϵ ,以适应高斯分布、对称分布、单峰分布、student-t、分布式鲁棒等净负荷功率不确定性分布情况。各分布情况下 Γ_ϵ 的具体计算方法可参见文献[20]。

其中,若假设净负荷功率不确定性服从高斯分布,则 Γ_ϵ 的表达式如下:

$$\Gamma_\epsilon = \Psi^{-1}(1 - \epsilon) \quad (28)$$

式中: Ψ 为高斯分布的概率密度函数。

在实际电力系统运行中,通常利用历史数据估计净负荷不确定性的分布信息,此时净负荷可能服从任意分布。针对任意分布的机会约束经济调度问题的解析转化,前期研究中已提出相应的方法^[18]。考虑本文关注重点在于 AGC 细颗粒时间尺度响应动作的精细化建模,对于解析转化部分仍采用传统基于均值和方差的机会约束解析转化方法。

4 算例分析

本文采用 IEEE 30 节点标准测试系统,针对所提显式计及 AGC 细颗粒时间尺度响应动作的机会约束经济调度方法进行详细分析,并在 IEEE 118 节点标准测试系统上验证该方法对较大电网的适应性。机会约束越限阈值设置为 5%。

4.1 仿真数据及算例设置

本文基于中国某省级电网 2020 年 5 月某天的净负荷预测数据,该数据包含一天内间隔时间为 15 s 的所有净负荷预测数据。因此,在算例仿真中总调度时段数 T 仍为传统经济调度考虑的 24 个时段;单位调度时段内总短时刻数 K 为 240,即将 1 h 分割为 240 个 15 s 的短时段。根据 IEEE 30 节点系统和 118 节点系统的净负荷数据进行了缩放,使得用于仿真的净负荷数据与测试系统的参数相匹配。为考虑净负荷预测的不确定性,随机生成每个调度时段内短时刻点的节点净负荷预测误差的均值和方差。

仿真中将对比如下 3 种方法:

M0: 本文所提显式计及 AGC 细颗粒时间尺度响应动作的机会约束经济调度方法;

M1: 未考虑 AGC 响应动作的机会约束经济调度方法(依据文献[21]);

M2: 基于机组最大出力确定 AGC 参与因子的

机会约束经济调度方法(依据文献[11])。

4.2 所提方法的安全性验证

为验证本文所提显式计及 AGC 细颗粒时间尺度响应动作的机会约束经济调度方法的安全性,本文以高斯分布为例,基于实际净负荷预测数据与每个调度时段内短时刻点的节点净负荷预测误差的均值和方差,采用蒙特卡洛方法抽样得到 5 000 组样本用于校验经济调度结果的约束越限概率,仿真结果如表 1 所示。

表 1 IEEE 30 节点系统安全性对比
Table 1 Security comparison in IEEE 30-bus system

方法	线路潮流约束最大越限概率/%	线路潮流约束平均越限概率/%	调频备用约束最大越限概率/%	调频备用约束平均越限概率/%
M0	5.02	2.12	5.03	3.00
M1	30.29	8.42	27.20	7.23
M2	27.82	7.35	28.44	6.72

本文从约束最大越限概率与平均越限概率两方面分析系统的安全性。其中,约束最大越限概率可反映系统发生安全问题的潜在概率,而约束平均越限概率可反映系统整体的安全水平。需要说明的是,M0 的平均越限概率小于设定阈值是正常现象,这是因为机会约束仅保证每条约束的越限概率小于设定阈值,而非与设定阈值相等。分析表 1 可得出如下结论:

1) 本文所提方法能够保证系统运行约束越限概率满足规定阈值。

2) 传统机会约束经济调度方法由于无法计及 AGC 细颗粒时间尺度响应动作,难以确保系统整个调度时段内每个短时刻点的运行安全,易发生约束越限情况。

3) 相较于传统机会约束经济调度方法,本文方法可有效保证系统在整个调度时段内每个短时刻点的约束越限概率在给定阈值以内,实现了系统安全运行。

4) 对比 M1 和 M2 可知,对于仅在调度时刻点考虑 AGC 机组对新能源随机波动及其不确定性响应的经济调度方法,其 AGC 参与因子的设定对于整体系统的安全性没有较为明显的影响。但是,由于 M1 和 M2 均无法考虑细颗粒时间尺度下 AGC 机组的响应动作,其调度结果的约束越限概率均高于设定值 5%,严重影响了系统安全运行。

4.3 所提方法经济性验证

为验证本文所提显式计及 AGC 细颗粒时间尺

度响应动作的机会约束经济调度方法的经济性,表2对比了M0、M1以及M2三种机会约束经济调度方法的发电成本、调频备用成本及总运行成本。图3所示为3种经济调度方法各调度时刻点(时间分辨率为1h)所需的总调频备用容量对比。

表2 IEEE 30节点系统经济性对比
Table 2 Economic comparison in IEEE 30-bus system

方法	总运行成本/ 美元	系统发电成本/ 美元	调频备用成本/ 美元
M0	66 065	65 129	814.51
M1	66 511	65 629	881.32
M2	66 643	65 666	976.75

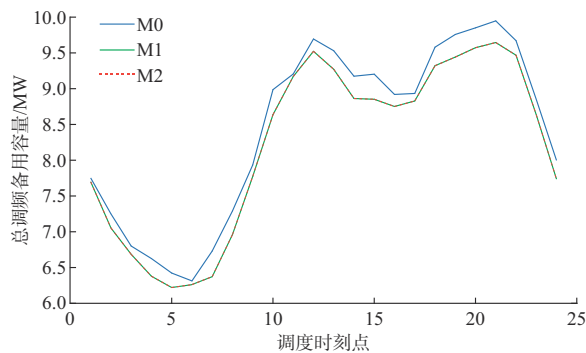


图3 总调频备用容量对比
Fig. 3 Comparison of total frequency regulation reserve capacities

分析表2可得出如下结论:

1)相较于M1和M2,本文所提方法所得到的调度方案具有更低的发电成本、调频备用成本及总运行成本。

2)3种经济调度方法所需成本较为接近,这是因为经济调度需保证调度时刻点的功率平衡,而每个调度时刻点净负荷所需的功率需求是一定的,故3种调度方法发电所需要提供的功率相差不大。

3)本文所提方法(M0)可得到最低调频备用成本,这是因为其在经济调度模型中考虑了细颗粒尺度下每个时刻点AGC机组所需备用容量及其成本,

故求得结果为本文构建问题的最优解。而其他比较方法M1和M2仅考虑了调度时刻点AGC机组所需备用容量及其成本,故M1和M2得到的调频备用容量成本均为次优解。因此,本文所提方法可得到最低的调频备用成本。

4)相较M0和M1,M2所需的备用成本较高,这是因为在M0中,AGC参与因子根据机组最大出力提前固定,没有参与优化决策,这也表明在经济调度模型中考虑AGC参与因子的优化可有效节约系统的调频备用成本。

由图3可知,本文所提方法给出的调频备用容量整体高于传统机会约束经济调度方法,这说明为保证在细颗粒时间尺度下调频备用容量的充足,系统需提供更多的调频备用容量,以保证电网经济安全运行。同时,结合表2和图3可知,经过本文所提方法得到的调度方案相较于M1与M2需要更多的调频备用容量,但调频备用容量成本仍低于传统机会约束经济调度方法,这是因为本文所提方法考虑了细颗粒时间尺度下AGC应对净负荷不确定性的响应动作,可令调频备用容量报价较低的AGC机组提供更多的调频备用容量,从而有效节约系统的总运行成本。同时,分析图3可知,M1和M2优化得出的调频备用容量在各调度时刻点完全相同,说明在经济调度方法中考虑AGC参与因子不影响系统的总调频备用容量,这是因为M1和M2方法的AGC机组在各调度时刻点所需平抑的净负荷不确定性是相同的。

4.4 所提方法在大系统中的适用性验证

本文采用IEEE 118节点标准测试系统验证所提方法针对较大电网的适用性。表3所示为3种对比方法在IEEE 118节点系统的仿真结果。图4所示为3种对比方法在细颗粒时间尺度下各时刻点(时间分辨率为15s)的线路潮流约束的最大越限概率。

表3 IEEE 118节点系统经济调度结果对比
Table 3 Comparison of economic dispatch results in IEEE 118-bus system

方法	总运行成本/ 万美元	系统发电成本/ 万美元	调频备用成本/ 万美元	线路潮流约束最大越限概率/%	线路潮流约束平均越限概率/%	调频备用约束最大越限概率/%	调频备用约束平均越限概率/%	计算时间/s
M0	1 889.3	1 879.2	11.056	5.01	1.23	5.02	2.11	543.100
M1	1 897.3	1 885.5	11.874	27.33	6.72	23.59	5.77	62.120
M2	1 955.2	1 941.2	14.057	25.42	5.87	26.75	6.19	3.132

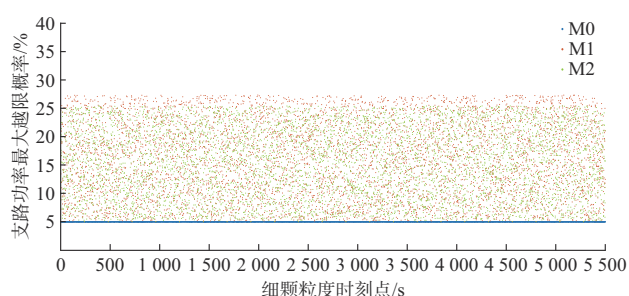


图4 细颗粒时间尺度下的支路功率最大越限概率对比
Fig. 4 Comparison of maximum limit violation probability of branch power at fine-grained timescales

分析表3可得出如下结论:

1)在IEEE 118节点标准测试系统中,相较于M1和M2方法,本文所提方法得到的经济调度计划总运行成本最低,线路潮流以及调频备用约束的越限概率满足设定值。

2)在较大系统中,由于系统约束较多,而存在越限风险的约束相对较少,故3种方法所得调度计划的约束平均越限概率较IEEE 30节点系统更低。但是,从M1和M2方法所得线路潮流以及调频备用约束最大越限概率可知,仅考虑调度时刻点的系统运行约束中部分阻塞严重的约束难以满足预先设定的越限概率。

3)本文所提方法在IEEE 118节点系统中,仍能有效保证系统的经济性和安全性。

4)在计算时间方面,随着机会约束经济调度模型考虑因素的增多,计算时间也随之延长。本文方法在全面考虑细颗粒时间尺度下的AGC机组动作情况下,仍能保证分钟级的计算时间,具有一定的可行性。

分析图4可知,由于M1和M2方法仅考虑了调度时刻点的新能源不确定性,在细颗粒时间尺度下支路功率越限概率均较大。相较而言,本文所提方法可保证经济调度结果的支路功率越限概率在细颗粒时间尺度下均满足系统的预设值5%,保证了系统的安全性。

5 结语

针对现有经济调度模型无法计及AGC机组在细颗粒时间尺度下调节需求的难题,本文提出一种显式计及AGC细颗粒时间尺度响应动作的机会约束经济调度方法。该方法对AGC机组在细颗粒时间尺度下的响应动作进行了精确建模,并将模型内嵌入机会约束经济调度模型中,通过合理调度系统AGC调节资源以保障系统的经济安全运行。本文

得到如下结论:

1)相较于现有调度方法难以满足预先设定的约束越限概率的情况,本文所提方法能够有效保证系统在整个调度时段内每个短时刻点的约束越限概率在给定阈值以内,实现了系统安全运行;

2)经济调度结果显示,相较于现有调度方法,本文所提方法具有更低的发电成本、调频备用成本及总运行成本,提升了系统运行的经济性;

3)在IEEE 118节点系统中,本文所提方法仍能有效保证系统的经济性和安全性,且能保证分钟级的计算时间,验证了本文所提方法具有一定的适用性。

同时,本文研究仍存在一些不足之处。例如,本文方法未考虑AGC机组在调度时段内执行出力调整所引起的调频里程成本,导致研究结果对调频服务成本的考虑不够全面。下一步将研究如何在经济调度中考虑AGC机组在系统实时运行环节的调节行为,以及机组调频里程成本之间的关联关系,进一步提升系统运行的经济性和安全性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] PAPAVALIOU A, OREN S S, O'NEILL R P. Reserve requirements for wind power integration: a scenario-based stochastic programming framework [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2197-2206.
- [2] ANTONIADOU-PLYTARIA K, STEEN D, TUAN L A, et al. Scenario-based stochastic optimization for energy and flexibility dispatch of a microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3328-3341.
- [3] 童宇轩,胡俊杰,刘雪涛,等.新能源电力系统灵活性供需量化及分布鲁棒优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(15):80-90. TONG Yuxuan, HU Junjie, LIU Xuetao, et al. Quantification of flexibility supply and demand and distributionally robust optimal dispatch of renewable energy dominated power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 80-90.
- [4] 孙峰洲,刘海涛,陈庆,等.考虑新能源波动区间的交直流配电网下垂斜率鲁棒优化方法[J].电力系统自动化,2020,44(14): 62-70. SUN Fengzhou, LIU Haitao, CHEN Qing, et al. Robust optimization method for droop slopes in AC/DC distribution network considering fluctuation interval of renewable energy source [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 62-70.

- [5] 林雨眠,熊厚博,张笑演,等.计及新能源机会约束与虚拟储能的电-热系统分布式多目标优化调度[J].电工技术学报,2024,39(16):5042-5059.
LIN Yumian, XIONG Houbo, ZHANG Xiaoyan, et al. Distributed multi-objective optimal scheduling of integrated electric-heat system considering chance constraint of new energy and virtual storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5042-5059.
- [6] ZHANG Q, SHUKLA A, XIE L. Efficient scenario generation for chance-constrained economic dispatch considering ambient wind conditions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(4): 5969-5980.
- [7] 滕贤亮,谈超,昌力,等.高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J].电力系统自动化,2023,47(15):12-35.
TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 12-35.
- [8] 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):1-15.
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): 1-15.
- [9] 鲁文格.电力系统亚区间安全风险评估及其预防策略研究[D].长沙:湖南大学,2021.
LU Wenge. Research on sub-interval security risk assessment and prevention strategy of power system [D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [10] 王娟娟,吕泉,李卫东,等.电力市场环境下需求侧AGC成本的分摊策略[J].电力自动化设备,2012,32(6):31-35.
WANG Juanjuan, LV Quan, LI Weidong, et al. Allocation of customer-side AGC cost in electricity market environment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 31-35.
- [11] ROALD L, ANDERSSON G. Chance-constrained AC optimal power flow: reformulations and efficient algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2906-2918.
- [12] ZENG L, CHIANG H D, LIANG D. Robust optimal power flow under renewable uncertainty with pairwise convex hull and non-affine AGC redispatch strategy [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 210: 108136.
- [13] 周安平,杨明,翟鹤峰,等.计及风电功率率不确定性的分布鲁棒实时调度方法[J].中国电机工程学报,2018,38(20):5937-5946.
ZHOU Anping, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. Distributionally robust real-time dispatch considering moment uncertainty of wind generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 5937-5946.
- [14] 孙铂皓,汤涌,叶林,等.基于随机分层分布式模型预测控制的风电集群频率控制规划方法[J].中国电机工程学报,2019,39(20):5903-5914.
SUN Bohao, TANG Yong, YE Lin, et al. A programming method for wind power cluster frequency control based on S-HDMPC [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5903-5914.
- [15] XIANG M X, YANG Z F, YU J, et al. Real-time dispatch with secondary frequency regulation: a pathway to consider intra-interval fluctuations [J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4): 5556-5567.
- [16] 喻洁,刘云仁,杨家琪,等.美国加州辅助服务市场发展解析及其对我国电力市场的启示[J].电网技术,2019,43(8):2711-2717.
YU Jie, LIU Yunren, YANG Jiaqi, et al. Analysis of development of California ancillary service market and its enlightenment to China's power market [J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2711-2717.
- [17] 翟俊义,周明,李庚银,等.考虑可消纳风电区间的多区电力系统分散协调鲁棒调度方法[J].电网技术,2018,42(3):747-754.
ZHAI Junyi, ZHOU Ming, LI Gengyin, et al. A decentralized and robust dispatch approach for multi-area power system considering accommodated wind power interval [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 747-754.
- [18] LEI X Y, YANG Z F, ZHAO J B, et al. Surrogate formulation for chance-constrained DC optimal power flow with affine control policy [J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems: 1-4 [2024-03-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10214321>.
- [19] 雷星雨.基于数据驱动替代模型的机会约束最优潮流方法及应用[D].重庆:重庆大学,2022.
LEI Xingyu. Chance-constrained optimal power flow method and its applications: a data-driven surrogate-based approach [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [20] ROALD L. Optimization methods to manage uncertainty and risk in power systems operation [D]. Zurich, Switzerland: ETH Zurich, 2016.
- [21] WANG Z W, SHEN C, LIU F, et al. Chance-constrained economic dispatch with non-Gaussian correlated wind power uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4880-4893.
-
- 雷星雨(1990—),男,博士,主要研究方向:电力系统随机优化、不确定性分析、电力市场。E-mail:lxylxy7@163.com
- 杨林泽(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统随机优化、不确定性分析等。E-mail:lzyang@stu.cqu.edu.cn
- 陈咏涛(1975—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统分析与控制。E-mail:chenyongtao@cq.sgcc.com.cn
- 杨知方(1992—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统优化、电力市场。E-mail:zfyang@cqu.edu.cn

(编辑 章黎)

Chance-constrained Economic Dispatch Method Considering Fine-grained Response Actions of Automatic Generation Control

LEI Xingyu¹, YANG Linze¹, CHEN Yongtao², LIU Yuming², ZHANG Xiaobing¹, YANG Zhifang¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: The random volatility of renewable energy has made the influence of automatic generation control (AGC) actions of units on the system operation increasingly prominent. The existing stochastic optimal economic dispatch methods are difficult to account for the actual response actions of AGC units on fine-grained timescales during the dispatch periods, seriously threatening the safe operation of the power grid. Therefore, this paper proposes a chance-constrained economic dispatch method explicitly considering response actions of AGC units on fine-grained timescales. First, the response model of AGC units on fine-grained timescales considering the uncertainty of net load is constructed. Based on the actual response strategy of AGC, a response mode of AGC units to net load fluctuations and their uncertainties is constructed under the chance-constrained framework, achieving accurate modeling of AGC unit response actions on fine-grained timescales. Then, a chance-constrained economic dispatch method embedded with AGC unit response models on fine-grained timescales is proposed, which considers the response actions of AGC units on fine-grained timescales in the chance-constrained economic dispatch model. Finally, the proposed chance-constrained economic dispatch model is reformulated in an analytical form, achieving an explicit characterization of the response actions of AGC units on fine-grained timescales. The proposed modeling method is not limited to the chance-constrained optimization and can also be applied to stochastic optimization methods such as multi-scenario and robust optimization. The case analysis shows that the proposed method provides a more economical and secure dispatch scheme compared with existing chance-constrained economic dispatch methods.

This work is supported by State Grid Chongqing Electric Power Company (No. 522023220025), National Natural Science Foundation of China (No. 52307083) and Chongqing Postdoctoral Science Foundation (No. CSTB2023NSCQ-BHX0177).

Key words: uncertainty; frequency regulation reserve capacity; chance constraint; economic dispatch; fine-grained timescale; automatic generation control (AGC)

