

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240077

面向多源协调互济的 AGC 指令两阶段分配方法

雷雨¹, 向明旭², 黄子蒙², 许懿¹, 杨知方²

(1. 国网重庆市电力公司, 重庆 400015; 2. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 高比例新能源电力系统的惯量支撑能力弱、随机波动性强, 电网频率质量难以得到保障。引入不同品类调频资源共同参与自动发电控制(automatic generation control, AGC)是应对上述问题的有效手段, 但这也要求 AGC 指令分配能够适配不同品类资源的差异化调节特性。对此, 提出面向多源协调互济的 AGC 指令两阶段分配方法。首先, 将不同资源分别安排至与自身调节特性相匹配的超前分配阶段和实时分配阶段。其次, 在实时分配阶段提出基于资源调节优先级的 AGC 指令分配策略, 根据不同品类资源的调节特性以及电网频率状况对资源调节优先级进行设定, 以互补利用各类资源的调节优势。然后, 在超前分配阶段, 建立优化分配模型以实现不同品类资源的协调最优利用。同时, 嵌入与资源剩余调节裕度相关的惩罚项, 以保障资源持续调节能力。最后, 基于电网实际数据的算例仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 自动发电控制; 指令分配; 多源协调互济; 持续调节能力

A two-stage allocation method for AGC command with multi-resource coordination

LEI Yu¹, XIANG Mingxu², HUANG Zimeng², XU Yi¹, YANG Zhifang²

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: The weak inertia support and strong stochastic fluctuations of high-proportion renewable energy power systems make it difficult to ensure the frequency quality of the power grid. Introducing different types of frequency regulation resources to participate in automatic generation control (AGC) is an effective way to handle the above problem, but it also requires that the AGC command allocation can adapt to the differentiated characteristics of different frequency regulation resources. To address this issue, a two-stage allocation method for AGC command with multi-resource coordination is proposed. First, different types of resources are arranged into the proactive AGC allocation stage or the real-time AGC allocation stage that matches their characteristics. Second, in the real-time allocation stage, an AGC command allocation strategy based on the allocation priority of resources is proposed. The allocation priority is designed according to the regulation characteristics of different resources and the frequency status of power systems. In this way, the superiority of different resources can be complementally utilized. Third, in the proactive allocation stage, an optimal allocation model is established to achieve the coordinately optimal utilization of different resources. The penalty terms related to the residual regulation redundancy of regulation resources are embedded to ensure the persistence of the frequency regulation ability of resources. Finally, case studies based on practical power grid data verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 52307082).

Key words: automatic generation control (AGC); command allocation; multi-resource coordination; persistence of regulation ability

0 引言

高比例新能源接入是我国电网未来发展趋势。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(52307082); 国网重庆市电力公司科技项目资助(SGCQ0000DKJS2250027); 中央高校基本科研业务费资助(2023CDJXY-029)

然而, 新能源具有弱惯性与强随机波动特性, 其大规模接入必然影响电力系统源荷实时平衡, 威胁系统频率质量^[1]。自动发电控制(automatic generation control, AGC)是电网维持频率质量的主要技术手段^[2-3], 其根据 AGC 指令分配方法将所形成的总调节需求分配至各调频资源, 以应对系统功率波动。

为保障高比例新能源电力系统的频率质量, 具有良好调节特性的储能已被纳入 AGC 调频范畴,

形成了火电、水电、储能等多品类调频资源共同参与的调频格局。此外，随着新型电力系统建设的不断推进，新能源^[4]、用户侧资源^[5-7]等参与调频也备受关注。不同品类资源的调节特性各异^[8]，AGC指令分配能否适配调频资源的差异化调节特性对于维持系统频率质量至关重要。

目前，工业界采用基于系统当前监测状态的实时分配方法，能够有效捕捉系统功率不平衡量，但指令更新周期较短，一般为秒级。为满足分配效率要求，工业界普遍按照调频容量比例、调节速度比例等预设规则进行实时分配^[9-11]，无法充分发挥各类调频资源的优势。为此，有学者对实时分配方法进行改进，比较典型的方法是AGC指令分解^[12-14]，将低频指令下发给调节速度较慢的资源，高频指令下发给储能等调节速度较快的资源。这类方法能够在一定程度上发挥各类资源的优势，但储能频繁响应高频指令将引起寿命严重损耗^[15]，且高/低频指令仍通过预设规则分配至不同资源。此外，实时分配存在滞后性(频率偏差在功率波动后形成，导致资源出力调整滞后于功率波动)，影响系统频率质量。

对此，学术界提出AGC超前优化调度方法，基本思想为：构建综合考虑机组调节裕度、速度及成本的优化分配模型，以应对通过超短期预测获得的系统未来功率波动^[16-17]。这类方法一方面可以延长AGC指令更新周期，为构建、求解优化模型预留时间；另一方面能够使调频资源提前动作，降低了对资源调节速度的要求，也避免了实时分配的滞后性。然而，预测误差以及预测周期内的功率波动易导致该类方法无法有效平抑系统实际功率波动。此外，该类方法易连续调用某一调节特性较优的机组，使其因达到调频容量上/下界而暂时失去上/下调节能力，导致仅能由其他尚有调节裕度的资源来应对未来调节需求，系统总体调节能力减弱。

综上所述，实时分配与超前优化分配各有优势与不足。对此，有学者提出将两者相结合的分阶段分配方法^[18-19]。然而，上述研究中所有资源将同时参与两个分配阶段，调节速度较慢、资源难以适应实时分配极短更新周期的问题仍然存在，且不同阶段可能下发方向相反的指令，影响系统频率质量。此外，现有研究主要关注在日前、日内调度中令调频资源预留足量调频容量^[20]，未涉及AGC指令分配中某一资源因调频容量被用尽而暂时失去调节能力的问题。除学术界外，工业界所采用的AGC系统也可将调节速度较慢的部分机组投入超前控制模式，以应对超短期功率波动预测，并可令这部分机

组不再响应更新频繁的实时指令。然而，该模式采用预设规则分配超前调节需求，相较于构建超前优化分配模型，其难以考虑调节资源的综合特性。

针对上述问题，本文提出一种面向多源协调互济的AGC指令两阶段分配方法，涉及的调节资源为当前电网已实际采用的火电、水电及储能。其中，本文所考虑的储能类型为响应速度较快、适用于参与频率调节的电池储能^[21]。本文主要贡献如下：

1) 提出面向多源协调互济的AGC指令两阶段分配框架。将火电、储能分别安排至与其特性相匹配的超前阶段和实时阶段，调节容量较大且调节速度较快的水电则一部分参与超前阶段，一部分参与实时阶段，以支撑每一阶段的调节；对于实时分配，设计面向储能寿命保护的资源调节优先级，并在系统频率偏差较大时调整优先级，发挥储能调节速度快的优势以保障系统频率质量；对于超前分配，建立优化模型以实现水火资源的协调最优调用。

2) 提出保障资源持续调节能力的AGC指令超前优化分配策略。该策略在超前优化分配模型的目标函数中嵌入了与资源剩余调节裕度相关的惩罚项，从而在满足系统调节需求的前提下，避免继续调用出力已接近调频容量上/下界的调频资源，使其具备应对未来调节需求的调节裕度，进而保障系统总体调节能力。

1 面向多源协调互济的AGC指令两阶段分配框架

1.1 匹配资源调节特性的AGC指令分配框架

本节所提面向多源协调互济的AGC指令两阶段分配框架如图1所示。首先将系统调频需求分为两部分。

1) 预测调频需求(颗粒度为1 min): 基于超短期预测获得未来AGC调度时段的净负荷预测功率^[22]，并结合系统当前运行状况计算得到预测调频需求；

2) 实时调频需求(颗粒度为4 s): 基于系统当前运行状态计算得到的实时调频需求，可补偿超前分配阶段的预测误差及预测时段内的功率波动。由于净负荷超短期预测误差以及预测时段内的功率波动一般较小，因而实时调频需求一般较小。

进一步，通过超前分配和实时分配分别应对上述调频需求。

1) 超前分配阶段(调度颗粒度为1 min): 建立AGC指令优化分配模型以提前调度调频资源，完成预测调频需求的响应，详见1.3节；

2) 实时分配阶段(调度颗粒度为4 s): 设计AGC

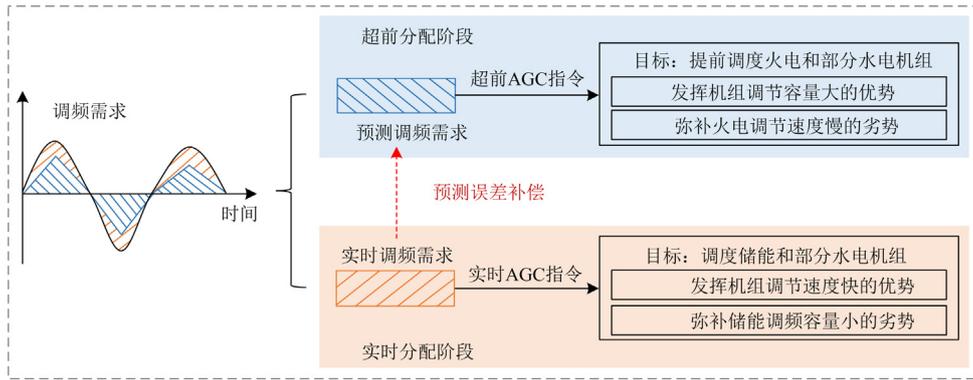


图1 面向多源协调互济的 AGC 指令两阶段分配框架

Fig. 1 A two-stage allocation framework for AGC command with multi-resource coordination

指令实时分配规则以快速分配更新频次较高的实时指令, 详见 1.2 节。

综上所述, 超前分配阶段调度周期较长且将提前执行 AGC 响应, 对资源调节速度要求较低, 故本文安排调节速度较慢的火电参与超前分配; 实时分配阶段调度周期较短且调频需求较小, 故安排调节容量较小而调节速度极快的储能参与实时分配; 对于调节容量较大而调节速度较快的水电, 则一部分参与超前分配, 一部分参与实时分配, 以支撑每一阶段的调节, 如图 1 所示。所提框架中, 同一调频资源将只参与上述两个阶段中某一阶段的调频工作, 一方面可避免火电机组频繁响应 AGC 实时指令, 另一方面可避免调频资源同时收到两个阶段所下发的方向相反指令。对于超前/实时分配阶段的资源划分, 在实际应用中, 可根据当前 AGC 控制模式(即 AGC 实时分配)下电网积累的资源历史调频性能指标数据或机组调频性能试验结果, 将不同资源合理安排至超前分配和实时分配。

通过上述匹配资源自身特性的分配框架, 可实现多源协调互济的 AGC 指令分配。此外, 本文还分别针对实时与超前分配提出了面向多源协调互济的 AGC 指令分配策略, 将在下文进行详细介绍。

1.2 基于资源调节优先级的 AGC 指令实时分配

如 1.1 节所述, 本文所提框架中参与实时分配的资源包括水电机组和储能。其中, 本文所考虑的电池储能响应速度极快, 是非常优质的调频资源, 但频繁参与调节将影响其寿命。为此, 本文在系统频率状况良好(频率偏差绝对值未超过设定的频率阈值 f_t)时, 采用水电优先、储能其次的调节优先级执行 AGC 指令实时分配, 以减少储能调节次数。

步骤 1: 如果所有水电机组的调频容量能够满足 AGC 实时指令 D_{real} , 则将 D_{real} 全部分配至水电机组, 转步骤 2; 否则, 调用水电机组的全部调频容

量, 并将剩余指令分配至储能, 转步骤 2。

步骤 2: 分配至水电和储能的 AGC 指令, 进一步根据同品类间各资源的调频容量比例进行分配, 可避免某一资源的调频容量被过早用尽, 从而保障系统总体调节能力。

当系统频率状况较差(绝对频率偏差超过 f_t)时, 实时分配的调节优先级将调整为储能优先、水电其次, 发挥储能的调节速度优势以改善频率质量。具体分配方式与前述步骤类似, 此处不再赘述。

前述实时分配策略中频率阈值 f_t 是需要人为设置的参数。阈值设置过大, 将难以发挥储能的频率支撑作用, 影响系统频率质量; 阈值设置过小, 则将增加储能的寿命损耗。为合理设置频率阈值, 本文根据电网历史频率数据对储能参与电网调频前的绝对频率偏差分布进行拟合, 并以给定置信水平 $(1-\alpha)$ 下的频率偏差作为频率阈值 f_t (f_t 应小于频率偏差允许值), 其含义是: 即使没有储能的参与, 电网也能将 $(1-\alpha)\times 100\%$ 功率波动场景下的频率偏差控制在允许范围内, 储能将仅在水电无法有效应对的 $\alpha\times 100\%$ 功率波动场景下优先响应调节需求, 以避免频率偏差超过允许范围。

相比于传统按单一特性的分配方式, 本文所提实时分配方式能够在缓解储能寿命损耗的同时, 发挥其频率支撑作用, 实现水电与储能的协调利用。

1.3 基于优化分配模型的 AGC 指令超前分配

如 1.1 节所述, 超前分配阶段将通过构建优化分配模型执行 AGC 指令分配。本文所构建的优化分配模型具体如下所述。

1.3.1 目标函数

模型的目标函数如式(1)所示, 其中, 第 1 项和第 2 项分别为火电机组和水电机组的调频里程成本; 第 3 项为与调节需求缺额相关的惩罚项, 其作用将在后文进行详细介绍。由于调频机组的调频容

量及调频容量成本在日内调度阶段^[23]即已确定, 故此不再考虑调频容量成本。

$$\min \sum_{i_T \in N_T} b_{M,i_T} |M_{i_T}^{AGC}| + \sum_{i_H \in N_H} b_{M,i_H} |M_{i_H}^{AGC}| + S\varepsilon \quad (1)$$

式中: i_T 、 i_H 分别为火电、水电机组的编号; N_T 、 N_H 分别为参与超前分配阶段的火电、水电机组集合; t_{AGC} 为 AGC 指令超前分配的目标调度时刻, 本文所采用的颗粒度为 1 min; b_{M,i_T} 、 b_{M,i_H} 分别为火电、水电机组的调频里程报价(美元/MW), 为已知参数; $M_{i_T}^{AGC}$ 、 $M_{i_H}^{AGC}$ 分别表示各火电、水电机组的调频里程, 为决策变量, 表征了机组在本次超前分配中的出力调整量, 负值表示下调频, 正值表示上调频; S 为取值极大的常数; ε 为表征调节需求缺额的变量。

1.3.2 运行约束

1) 调节需求约束

基于超短期预测技术可获得未来 AGC 调度时刻的净负荷预测功率 L^{AGC} , 即超前分配阶段系统的目标出力。为给数据收集和净负荷功率预测预留充足时间, 净负荷功率预测将在实时运行前 2 min 进行。随后, 结合机组当前出力情况和计划出力曲线获取系统预测调频需求 D_{pro}^{AGC} , 如式(2)所示。

$$D_{pro}^{AGC} = \left(L^{AGC} - \sum_{i \in N} P_i^{t^{AGC}-1} \right) - \left(\sum_{i \in N} P_i^{ID,t^{AGC}} - \sum_{i \in N} P_i^{ID,t^{AGC}-1} \right) \quad (2)$$

式中: $t^{AGC}-1$ 为执行 AGC 指令超前分配前的时刻, 即当前时刻与超前分配的目标调度时刻相差 1 min; i 为系统内所有资源的编号, 包括参与超前分配和实时分配的资源以及未参与 AGC 调频的资源; N 为系统内所有资源的集合; P_i 为资源出力; P_i^{ID} 为资源计划出力, 不同时刻的计划出力可由计划出力曲线获得。

获取 D_{pro}^{AGC} 后, 建立如式(3)所示的系统调节需求约束。

$$\sum_{i_T \in N_T} M_{i_T}^{AGC} + \sum_{i_H \in N_H} M_{i_H}^{AGC} = D_{pro}^{AGC} \quad (3)$$

式(3)要求系统应完全满足系统调节需求。然而, 当系统总体调节能力不足时, 受爬坡能力、调节容量等限制, 系统将无法完全满足调节需求。此时, 超前优化分配模型无解, 无法给出合理的超前指令分配方案。事实上, 即使无法完全满足调节需求, 系统也应在自身能力范围内朝调节需求的方向进行调节。为此, 本文对式(3)所示的系统调节需求等式约束进行了松弛, 如式(4)和式(5)所示, 并在目

标函数式(1)中嵌入了松弛量 ε 的惩罚项, 如式(1)中的第 3 项。

$$-\varepsilon \leq \sum_{i_T \in N_T} M_{i_T}^{AGC} + \sum_{i_H \in N_H} M_{i_H}^{AGC} - D_{pro}^{AGC} \leq \varepsilon \quad (4)$$

$$\varepsilon \geq 0 \quad (5)$$

由于松弛量 ε 的惩罚系数极大, 为使目标函数式(1)最小, 松弛量 ε 将为其能够达到的最小值。当系统能够完全满足调节需求时, ε 将为 0; 当系统无法完全满足调节需求时, 为减小松弛量 ε 的取值, 系统也将执行机组出力调整来减少系统调节量与系统调节需求间的差异, ε 将大于 0。

2) 其他运行约束

除系统调节需求约束外, 机组在超前分配阶段的出力调整还需满足常见的机组调频容量约束及爬坡能力约束, 此处不再赘述。

通过建立优化分配模型, AGC 指令超前分配能够在综合考虑调节裕度、调节速度及调节成本条件下, 实现不同资源的协调最优利用。

本文所提两阶段分配框架中的超前分配与日内调度决策相似, 且均由电网调度控制中心执行, 但两者在功率预测精度、调度颗粒度、模型约束条件等方面存在差异, 详述如下:

(1) 在功率预测精度方面, 相比于日内调度决策, 所提超前分配阶段的净负荷功率预测时刻(实时运行 2 min 前)更加接近于实时运行时刻, 在相同预测技术下能够取得更高预测精度, 从而有效指导 AGC 调频阶段机组的出力调整;

(2) 在调度颗粒度方面, 日内调度决策的颗粒度一般为 5 min 或 15 min, 而面向 AGC 调频需求, 所提超前分配阶段采用了更加精细的调度颗粒度(1 min), 以应对日内调度决策时段内的系统功率波动;

(3) 在模型约束条件方面, 日内调度决策需制定各机组的调频容量预留方案, 以满足系统调频容量需求约束, 而在所提超前分配阶段中, 各机组预留的调频容量为确定值, 机组相对于计划出力的调整量受到不超过其调频容量预留范围的约束限制。

2 保障资源持续调节能力的 AGC 指令超前优化分配策略

2.1 问题描述

在根据 1.3 节所述优化分配模型执行 AGC 指令超前分配模型时, 易出现连续调用某一调节特性较优资源的情形, 导致资源出力达到其调频容量的上/下界, 不再具备继续参与上/下调频的能力, 从而影响系统总体调节能力。下面以上调频为例对这一问

题进行具体阐述。

如附录 A 图 A1 所示, 假设机组 A 的调节速度高于机组 B 且调频成本低于机组 B, 为使 AGC 超前优化分配模型的目标函数最优, 超前分配将尽可能调用机组 A, 使得其调节裕度被用尽, 不再具备进一步上调出力的能力。因此, 之后的上调频只能调度仍具备上调节裕度且调节速度较慢的机组 B 来提供频率调节能力。此时, 即使机组 B 仍有足量调节裕度但相比于机组 A 与机组 B 均能被调用的场景, 系统总体调节速度将有所下降。

2.2 资源剩余调节裕度惩罚函数

为解决上述问题, 需尽可能避免调频机组的出力调整量达到调频容量的边界, 保证其具备应对下一次调节需求的能力。对此, 本文在超前优化分配模型目标函数中添加与资源剩余调节裕度相关的惩罚项, 其作用如附录 A 图 A2 所示, 下面进行详细介绍。

资源上/下调节裕度相关惩罚项的表达式分别如式(6)和式(7)所示。

$$\sum_{j \in J} \sum_{i_T \in N_T} f_{UP} C_{i_T, j} K_{i_T, UP, j} + \sum_{j \in J} \sum_{i_H \in N_H} f_{UP} C_{i_H, j} K_{i_H, UP, j} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i_T \in N_T} f_{DN} C_{i_T, j} K_{i_T, DN, j} + \sum_{j \in J} \sum_{i_H \in N_H} f_{DN} C_{i_H, j} K_{i_H, DN, j} \quad (7)$$

式中: j 为分段惩罚项中分段数的编号; J 为分段数的集合; f_{UP} 、 f_{DN} 为表征系统调节方向的参数, 为 1 表示系统将执行上/下调频, 为 0 则表示系统不执行上/下调频, 其值可根据预测调频需求直接确定; $C_{i_T, j}$ 和 $C_{i_H, j}$ 分别为火电和水电机组在第 j 段的惩罚系数; $K_{i_T, UP, j}$ 和 $K_{i_T, DN, j}$ 分别为表征火电机组在第 j 个分段区间剩余上调频和下调频调节裕度; $K_{i_H, UP, j}$ 和 $K_{i_H, DN, j}$ 分别为表征水电机组在第 j 个分段区间剩余上调频和下调频调节裕度。

下面以水电机组的上调频为例, 具体阐述资源剩余调节裕度相关惩罚项的作用与计算方式。

如前所述, 资源剩余调节裕度惩罚函数为分段函数, 本文所采用的惩罚函数形式如图 2 所示。其中: $R_{i_H, UP}$ 为水电机组预留的上调频容量; $R_{i_H, DN}$ 为水电机组预留的下调频容量, 由日内调度决策阶段确定。

由图 2 可见, 本文的分段区间共包括两段, 其含义为: 当调节后的出力在非惩罚区时, 认为机组仍有足够上调节裕度来应对未来调节需求, 故不进行惩罚; 相反, 当调节后的出力在惩罚区时, 认为机组面临调节裕度不足的风险, 故对其进行惩罚以避免机组因参与上调节而进入惩罚区, 从而保障机组上调节裕度的充裕性。

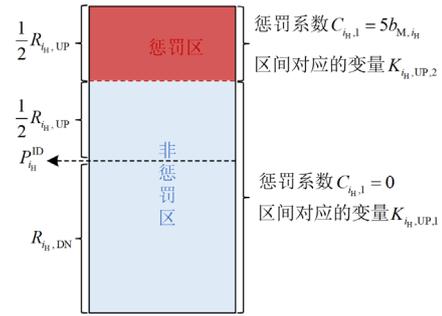


图 2 机组剩余调节裕度相关惩罚项的分段方式和惩罚系数示意图

Fig. 2 Schematic of piecewise mode and penalty coefficient of the penalty related to residual regulation redundancy

具体而言, 表征资源剩余调节裕度的变量 $K_{i_H, UP, j}$ 需满足式(8)一式(10)。

$$P_{i_H}^{AGC} - (P_{i_H}^{ID} - R_{i_H, DN}) = K_{i_H, UP, 1} + K_{i_H, UP, 2} \quad (8)$$

$$0 \leq K_{i_H, UP, 1} \leq R_{i_H, DN} + \frac{1}{2} R_{i_H, UP} \quad (9)$$

$$0 \leq K_{i_H, UP, 2} \leq \frac{1}{2} R_{i_H, UP} \quad (10)$$

由式(8)可见, 变量 $K_{i_H, UP, j}$ 表征了机组调节后出力与调频容量下界(即 $P_{i_H}^{ID} - R_{i_H, DN}$)间的距离, 该值越大, 表明机组上调节裕度越小, 处在惩罚区时, 资源剩余调节裕度的相关惩罚力度也将越大。由于目标函数为最小化惩罚项且分段惩罚系数为递增关系, 故由式(8)可推断, 只有当非惩罚区的 $K_{i_H, UP, 1}$ 取最大值时, 惩罚区的 $K_{i_H, UP, 2}$ 取值才会大于 0, 故所有区间的分段惩罚项(即 $C_{i_H, j} K_{i_H, UP, j}$)之和能够准确反映资源剩余调节裕度的相关惩罚结果, 不会出现机组出力未进入惩罚区但惩罚项却大于 0 的情形。下面仍以上调频为例, 分两类情况进一步阐述上述分段惩罚函数的有效性。

当某一机组的当前出力处在惩罚区时, 由于继续上调出力将增大惩罚区 $K_{i_H, UP, j}$ 的取值从而导致惩罚项增大, 故系统在能够满足调节需求的前提下, 将不会调度该机组上调出力, 从而避免其上调节裕度被用尽。同时, 当其余机组的调节能力比较充裕时, 系统还将调度该机组下调出力以离开惩罚区, 从而进一步保障机组上调节裕度。此外, 由于调节需求缺额的惩罚系数远大于资源剩余调节裕度的惩罚系数, 故当系统其余机组的调节能力不足以应对系统上调需求时, 也将调度该机组上调出力。

当某一机组的当前出力处在非惩罚区时, 系统将在能够满足系统调节需求的前提下, 避免其进入

惩罚区。同时，由于该机组下调出力将导致系统总体调频里程成本增加(其余机组的上调量将增加)，并且也不会引起惩罚项的降低(非惩罚区内惩罚项均为0)，故在系统需执行上调调节时，将不会调度该机组下调出力从而影响机组下调调节裕度的充裕性。

在目标函数中添加资源剩余调节裕度相关惩罚项后，形成了本文最终所采用的 AGC 指令超前优化分配模型。采用附录 B 所述方法将目标函数中的绝对值项进行线性化处理，该超前优化分配模型为线性规划模型，算例中本文采用 Matlab 内置的 linprog 函数对其进行求解。

3 算例分析

3.1 算例说明

本节首先在 IEEE 30 节点系统中验证本文所提面向多源协调互济的 AGC 指令两阶段分配方法的有效性，进而在实际 661 节点系统中验证所提方法在大规模系统中的适用性。在实际 661 节点系统中，本文着重关注 AGC 指令分配时间能否满足实际电网计算要求。仿真所用负荷数据收集自我国某省级电网，新能源数据收集自 PJM 官网^[24]，最终形成了新能源渗透率为 28%、颗粒度为 15 s 的净负荷曲线。本节选用某一天的实际运行数据来开展算例仿真。对于在 AGC 指令超前分配阶段开展的系统净负荷功率预测，预测颗粒度为 1 min，测试日全天平均绝

对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)仅为 0.43%，单个预测点最大绝对百分比误差仅为 4.68%。针对不同测试系统，对所收集的实际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。

为比较不同方法的运行性能，本文采用由 Matlab/Simulink 搭建的频率仿真模型来进行模拟电力系统实际运行的时域仿真。在实时分配阶段中 AGC 指令每 4 s 更新一次，与工业实际一致；在超前分配阶段中 AGC 指令每 1 min 更新一次。本文所采用的频率仿真模型如图 3 所示。图 3 中： L 为通过插值得到的颗粒度为 1 s 的实际净负荷曲线； M 为和转动惯量相关的转子时间常数； D 为负荷的有功频率响应系数； Δf 为频率偏差； B 为 AGC 系统的频率偏差系数(MW/0.1 Hz)，用于计算区域控制偏差(area control error, ACE)；ACE 经过 AGC 控制器后可得到区域调节需求(area regulation requirement, ARR)，即 AGC 指令；ARR 死区的设置旨在避免系统频率的频繁调节；采样保持模块的设置旨在模拟 AGC 系统每 4 s 更新一次 AGC 指令的实际情况；下标 real 表示参与实时分配的机组；下标 pro 表示参与超前分配的机组； N_{real} 、 N_{pro} 分别表示参加实时与超前分配的机组数目； P^{ID} 为机组在日内调度决策中的计划出力； R_g 为机组调速器的下垂特性，表征机组的一次调频能力。

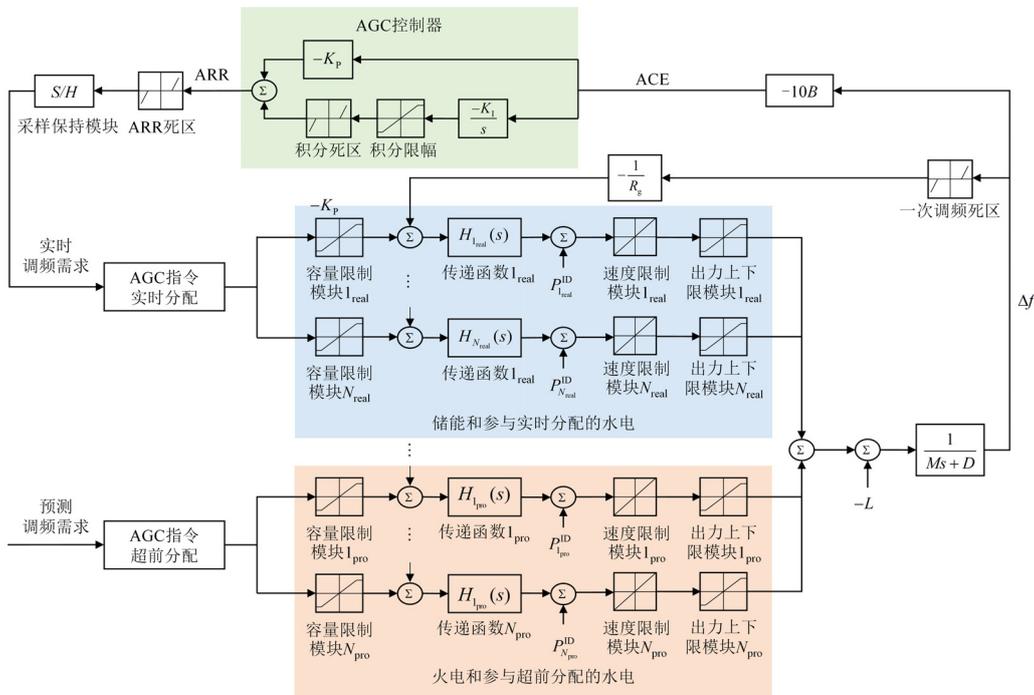


图 3 AGC 指令两阶段分配的频率仿真模型

Fig. 3 Frequency response model of the two-stage allocation of AGC command

本节所有算例均在 AMD Ryzen 5 3500X 6-Core Processor @ 3.59 GHz、16 GB RAM 的硬件环境下进行测试。

仿真中的对比方法如下所述。

M1: 根据机组调频容量的比例进行实时分配, 该方法与工业界采用的分配方法类似^[11];

M2: 根据机组调节速度的比例进行实时分配, 该方法与工业界采用的分配方法类似^[11];

M3: 将 AGC 指令分解为低频分量和高频分量, 低频分量下发给本文所提框架中参与超前分配的火电和部分水电机组, 高频分量下发给参与实时分配的储能和部分水电机组, 高/低频分量在不同资源间按照调频容量比例进行分配^[12];

M4: 仅考虑 AGC 指令超前分配, 与文献[16]所用方法类似;

M5: AGC 指令两阶段分配方法, 所有资源同时参与超前与实时分配, 实时调节需求按机组调频容量比例进行分配, 超前调节需求通过优化分配模型进行分配, 超前分配未嵌入资源剩余调节裕度惩罚函数, 与文献[19]所用方法类似;

M6: 同 M5, 但净负荷功率预测在实时运行半小时前开展(与日内调度决策的执行时刻一致), 测试日的 MAPE 为 1.90%, 单个预测点最大绝对百分比误差为 13.20%。

M7: 同 M5, 但火电和部分水电机组参与超前分配, 储能和部分水电机组参与实时分配, 同一资源仅参与某一阶段的调频工作;

M8: 同 M7, 但采用 1.2 节所述的实时分配策略, 其中, 根据测试日之前的频率仿真结果将频率阈值设为 0.08 Hz(置信水平为 80%);

M9(本文所提方法): 同 M8, 但在超前优化分配模型中嵌入资源剩余调节裕度惩罚函数;

M10: 同 M8, 但根据机组可调节量的比例分配超前调节需求, 与工业界 AGC 控制系统中的超前控制模式类似。

3.2 面向多源协调互济的 AGC 指令两阶段分配方法有效性验证

3.2.1 IEEE 30 节点系统

本节选用 IEEE 30 节点系统进行仿真分析, 该系统原本共有 6 台火电机组, 根据仿真需要将其 2 台修改为水电机组。仿真中, 假定 2 台火电机组(T1 和 T2)以及 2 台水电机组(H1 和 H2)参与 AGC 调频, 而另外 2 台火电机组不参与。此外, 在节点 10 上引入了一个容量为 1 MW/0.1 MWh 的储能(ES1), 充放电效率为 95%。T1、T2 以及 H1 将参与 AGC 指令超前分配, H2 及 ES1 将参与实时分配。

各调频资源的参数如表 1 所示。其中, r 为机组每分钟的爬坡速度。

表 1 各调频资源参数

机组编号	T1	T2	H1	H2	ES1
r /(MW/min)	0.96	0.96	1.92	1.92	—
b_M /(美元/MW)	2.00	2.50	1.80	2.50	1.50

M1—M10 得到的系统运行性能指标如表 2 所示。其中: $\sigma_{\Delta f}$ 为频率偏差标准差; Δf_{\max} 为最大绝对频率偏差; E_T 为储能的吞吐量(energy throughput, ET), 表征了储能的使用率, 吞吐量越大, 则储能寿命损耗越大^[25]; d_{DoDmax} 为储能的深度放电深度(depth of discharge, DoD), 在相同吞吐量下, 充放电深度越大, 则储能寿命损耗越大^[26]; T_{pro} 为 AGC 指令超前分配的平均求解时间; ΔD_{\max} 为超前优化分配模型中调节需求缺额相对于系统总体调节需求的最大占比。

表 2 IEEE 30 节点系统中 M1—M10 所得系统运行性能指标

	$\sigma_{\Delta f}$ /Hz	Δf_{\max} /Hz	E_T /MWh	d_{DoDmax} /%	T_{pro} /s	ΔD_{\max} /%
M1	0.0395	0.2031	2.1575	74.8824	—	—
M2	0.0385	0.2397	8.4114	97.8996	—	—
M3	0.0365	0.1664	3.9386	10.8192	—	—
M4	0.0440	0.1304	7.7532	100.0000	0.0070	0.0000
M5	0.0354	0.1362	13.6490	100.0000	0.0070	0.0000
M6	0.0490	0.1882	11.6500	100.0000	0.0070	0.0000
M7	0.0343	0.1330	2.1942	52.5508	0.0060	15.7399
M8	0.0342	0.1178	0.1749	27.1802	0.0060	15.7399
M9	0.0334	0.1159	0.1162	27.6532	0.0065	0.0000
M10	0.0334	0.1162	0.1488	27.5475	0.0001	0.0000

1) AGC 指令两阶段分配框架有效性验证

由表 2 可见, M1 和 M2 仅考虑了调频容量或调节速度以进行 AGC 指令的简单分配, 频率质量较差。相较之下, M3 通过 AGC 指令分解在一定程度上实现了多源协调互济, 频率质量较 M1 和 M2 有所提升。但由于存在滞后性, 且高/低频分量在不同资源间仍按照调频容量比例进行简单分配, M3 的频率质量仍有提升空间。此外, 由于储能需要频繁响应高频指令, 因而 M3 中储能吞吐量较大, 引起储能寿命损耗。

M4 中, 系统频率调节完全依赖于 AGC 指令超前分配。由于无法应对功率预测误差及预测周期内

的功率波动，M4 的频率质量较差。相较于 M4，M5 引入了实时分配阶段，可更有效应对实时功率偏差，进而改善系统频率质量。此外，相比于采用传统“日内调度决策和 AGC 实时分配”框架的 M1 而言，M5 在日内调度决策和实时分配之间引入了更接近实时运行时刻的超前分配阶段，使机组提前执行出力调整以跟随精准的超短期功率预测值，可缓解实时分配的滞后性以及火电机组调节速度较慢的劣势，因而有效提升了系统频率质量。同时，对比 M5 和 M6 的频率质量可以发现，超短期净负荷功率预测准确性的下降将引起系统频率质量的恶化，并且当预测时刻距实时运行时刻较远时，将导致预测准确性的降低。因此，相比于超前分配，即使日内调度决策也采用 1 min 的调度颗粒度，其也将因净负荷功率预测准确性不足而导致频率质量的恶化。由此，验证了引入超前分配的有效性。

对比 M5 和 M7 可以发现，相比于所有资源同时参与超前与实时分配的现有框架，本文所提同一资源仅参与某一阶段调频工作的框架能够取得更优的频率质量以及更低的储能寿命损耗。下面以某一运行时段中火电机组 T1 所接收到的调节指令为例开展具体说明。

该时段 T1 在 M5 和 M7 中接收到的超前指令、实时指令和最终指令如图 4 所示(由于 IEEE 30 节点系统整体净负荷功率变化较小，故 T1 接收到的 AGC 指令也较小)。其中，T1 在 M7 中仅参与超前分配，故其最终接收到的指令即超前指令。

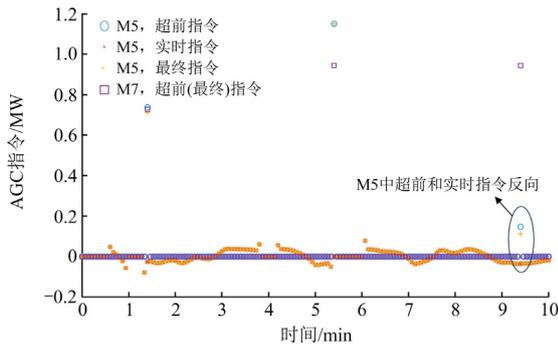


图 4 M5 和 M7 中某一运行时段 T1 接收到的 AGC 指令
Fig. 4 AGC commands allocated to T1 for a certain operating period in M5 and M7

由图 4 可见，在 M5 中，由于仍需参与 AGC 指令实时分配，T1 将频繁地接收实时指令，且存在超前指令和实时指令反向的情况。相较之下，T1 在 M7 中仅参与超前分配，其所接收到的指令间隔时

间较长，且不会受到实时分配的影响，故 T1 能够更有效地响应 M7 中下发的 AGC 指令。因此，相较于 M5，M7 的系统频率质量得到了进一步提升。此外，由于只需要参加调节幅度相对较小的实时分配，M7 中储能寿命损耗也得到了有效缓解。

综上所述，本文所提超前分配与实时分配相互独立的 AGC 指令两阶段分配框架将更能发挥多源协调潜力，进而保障系统频率质量。

2) 基于资源调节优先级的 AGC 指令实时分配有效性验证

对比表 2 中 M7 和 M8 的运行性能可以发现，由于所提 AGC 指令实时分配策略在系统频率状况良好时将优先调度水电机组参与调频，故 M8 中储能寿命损耗得到了进一步的缓解。此外，在系统频率状况较差时，M8 将优先调度储能来提供频率支援。因此，如图 5 所示，相较于 M7，M8 能够将系统频率偏差维持在更小范围内，验证了所提 AGC 指令实时分配策略的有效性。

3) 保障资源持续调节能力的 AGC 指令超前优化分配有效性验证

下面分别从系统频率质量及调节经济性两个方面对比 M8—M10 的运行性能，以验证本文所提超前优化分配策略的有效性。

在系统频率质量方面，对比表 2 中 M8 和 M9 的运行性能指标可以发现，M8 在执行超前指令优化分配过程中，存在无法完全满足超前调节需求的情形，影响了系统频率质量。相较之下，M9 在嵌入资源剩余调节裕度惩罚项后，能够保障资源持续调节能力，进而有效满足系统调节需求。因此，相较于 M8，M9 的系统频率质量得到了进一步改善。

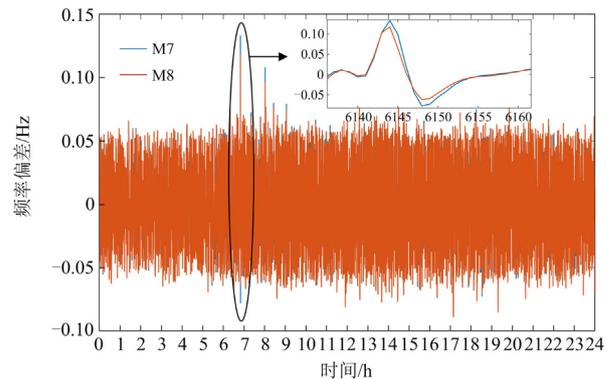


图 5 M7 和 M8 的频率偏差对比
Fig. 5 Comparison of frequency deviation in M7 and M8

下面以某一超前指令优化分配周期为例，进一步阐述资源剩余调节裕度惩罚项的有效性。该分配

周期中, 系统有上调节需求, 各机组的剩余调节裕度以及系统调节需求如表 3 所示。

表 3 某一超前优化分配周期中 M8 和 M9 各机组的
剩余调节裕度

Table 3 Residual regulation redundancy of each unit in a certain proactive dispatch period obtained by M8 and M9

	各机组剩余上调节裕度/MW			系统调节 需求/MW	调节需求 缺额/MW
	T1	T2	H1		
M8	4.3245	4.4720	0.0077	2.2878	0.3601
M9	2.9970	3.7935	2.0038	2.2878	0.0000

由表 3 可见, 尽管 M8 中各机组的上调节裕度之和能够满足系统调节需求, 但爬坡速度最快的水电机组 H1 已几乎没有上调节裕度, 在这一分配周期中, 只能提供 0.0077 MW 的上调节量, 而 2 台火电机组受限于爬坡能力, 只能各自提供 0.96 MW 的上调节量。最终, M8 在这一分配周期中产生了 0.3601 MW 的调节需求缺额。相较之下, M9 中各机组均具有较充足的上调节裕度, 各机组的爬坡能力均能得到有效发挥, 因而能够满足系统上调节需求, 未产生调节需求缺额。

另外, 由表 2 可见, M10 根据机组可调节量比例分配超前指令, 也能避免某一资源调节裕度被过早用尽的情形。因此, M10 的系统频率质量与所提方法 M9 相当。此外, M4—M6 中所有资源均参与超前分配阶段, 应对超前调节需求的资源更加充裕, 因而未产生调节需求缺额。

在系统调节经济性方面, M8—M10 在超前指令分配阶段产生的调频里程成本分别为 1.8430×10^3 、 1.8942×10^3 以及 2.0300×10^3 美元。其中, 相较于 M8, M9 为保障资源剩余调节裕度的充裕性, 将增加调节成本较高机组的调用量。而 M10 由于无法考虑机组调节成本, 系统调节经济性最差, 调节成本较 M9 高出 6.69%。

综上可见, 本文所提方法(M9)能够在保障系统频率质量的同时兼顾系统调节经济性, 由此验证了所提 AGC 指令超前优化分配策略的有效性。

4) 计算效率验证

M9 中基于常规计算方法的 AGC 指令超前优化分配模型平均求解时间 T_{pro} 小于 0.01 s, 能够满足计算要求。而实时分配阶段采用预设规则执行简单分配, 计算时间可忽略不计。可见, 所提方法在 IEEE 30 节点系统中能够满足计算效率要求。

3.2.2 实际 661 节点系统

为验证所提 AGC 指令两阶段分配方法的扩展

性, 本小节将采用实际 661 节点系统测试不同 AGC 指令分配方法的性能。该系统原本共有 48 台火电机组, 根据仿真需要将其中 24 台修改为水电机组。此外, 在实际 661 节点系统中引入了 3 个储能, 容量分别为 15 MW/5 MWh、12 MW/2.4 MWh 和 10 MW/2 MWh。该系统下不同 AGC 指令分配方法的运行性能如表 4 所示, 以第 1 个储能为例展示了储能寿命损耗情况。

表 4 实际 661 节点系统中 M1、M8、M9 所得系统
运行性能指标

Table 4 System operating performance index obtained by M1, M8, and M9 in practical 661-bus system

	$\sigma_{\Delta f}$ /Hz	Δf_{max} /Hz	ET/MWh	d_{DoDmax} /%	T_{pro} /s	ΔD_{max} /%
M1	0.0406	0.1529	23.6585	74.3643	—	—
M8	0.0345	0.1056	1.7342	16.8258	0.0100	20.0268
M9	0.0332	0.0980	1.5616	18.1516	0.0108	0.0000

由表 4 可见, 所提方法能够取得良好的系统运行性能, 包括系统频率性能、储能寿命损耗等, 其原因与 IEEE 30 节点系统中的阐述类似。同时, 在实际 661 节点系统中, 采用常规算法便可在 0.02 s 内完成超前优化分配模型的求解。值得一提的是, 本文关注点并非提出一种高效的超前优化分配模型求解方法, 此处展示模型求解时间旨在表明在所提方法下, 仅采用常规算法便能满足实际计算要求。

4 结语

针对现有 AGC 指令分配方法未能适配不同资源调节特性的问题, 本文提出了面向多源协调互济的 AGC 指令两阶段分配方法。首先将不同类型调节资源分别安排至与其自身调节特性相匹配的超前分配阶段和实时分配阶段, 以促进多源协调互济。随后, 针对实时分配, 提出了基于资源调节优先级的 AGC 指令分配策略, 针对超前分配, 提出了保障资源持续调节能力的 AGC 指令优化分配策略, 以进一步促进同一阶段中不同资源间的协调互济。仿真结果表明, 所提方法能够有效提升系统频率质量, 缓解储能寿命损耗, 同时兼顾系统调节经济性。

本文研究中涉及的调节资源主要为火电、水电和储能, 而随着新型电力系统的不断发展, 未来新能源、用户侧资源等调节特性差异显著的资源也将参与到频率调节中。在该背景下, 如何有效实现各类调节资源的协调互济是值得进一步研究的问题。

附录 A

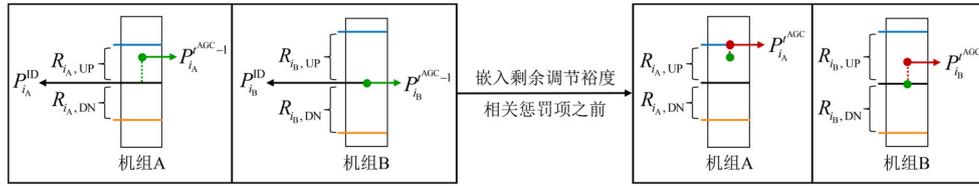


图 A1 嵌入剩余调节裕度相关惩罚项之前的机组调频示意图

Fig. A1 Schematic of frequency regulation before embedding the penalty term related to residual regulation redundancy

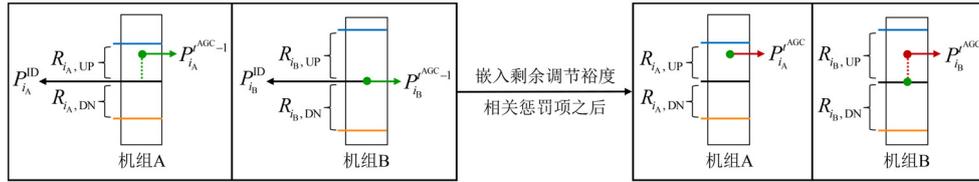


图 A2 嵌入剩余调节裕度相关惩罚项之后的机组调频示意图

Fig. A2 Schematic of frequency regulation before embedding the penalty term related to residual regulation redundancy

附录 B

含绝对值的目标函数最小化问题可表示为

$$\begin{cases} \min c|x| \\ \text{s.t. } Ax \leq b \end{cases} \quad (B1)$$

式中： x 为决策变量； c 为目标函数系数； A 为约束系数矩阵； b 为约束右端项常数。

通过引入非负辅助变量 z ，可将式(B1)所示的优化问题转换为不含绝对值的线性形式，具体如下：

$$\begin{cases} \min cz \\ \text{s.t. } \begin{cases} Ax \leq b \\ -z \leq x \leq z \\ z \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (B2)$$

在式(B2)所示优化问题中，由于需要最小化目标函数，故辅助变量 z 的最优值将为决策变量 x 最优值的绝对值，因此，式(B2)与式(B1)所示的优化问题是等价的，由此可将目标函数中的绝对值项转换为线性项。

参考文献

[1] 王中, 黎丽丽, 李振华, 等. 考虑新能源渗透的电网频率概率分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 65-73.
WANG Zhong, LI Lili, LI Zhenhua, et al. The evolution characteristics of power grid frequency probability distribution[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 65-73.

[2] 陈沛, 张新松, 郭晓丽, 等. 考虑 AGC 指令随机特性的火-储混合电站二次调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 168-177.
CHEN Pei, ZHANG Xinsong, GUO Xiaoli, et al.

Secondary frequency regulation of a hybrid coal-fired generator and BESS power station considering random characteristics of AGC instructions[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 168-177.

[3] TUMMALA A S L V, INAPAKURTHI R K. A two-stage Kalman filter for cyber-attack detection in automatic generation control system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(1): 50-59.

[4] 高丙团, 胡正阳, 王伟胜, 等. 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-16[2023-10-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230530.1551.003.html>.

GAO Bingtuan, HU Zhengyang, WANG Weisheng, et al. Review on fast active power control and frequency support technologies of renewable energy stations[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-16[2023-10-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230530.1551.003.html>.

[5] 付阳, 宋运忠. 考虑可控负荷的多区域电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 101-109.
FU Yang, SONG Yunzhong. Distributed model predictive load frequency control of a multi-area power system considering controllable load[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 101-109.

[6] 付卓铭, 胡俊杰, 马文帅, 等. 规模化电动汽车参与电力系统二次调频研究综述[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 1-14.
FU Zhuoming, HU Junjie, MA Wenshuai, et al. Review of research on participation of numerous electric vehicles in power system secondary frequency-regulation service[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 1-14.

[7] 李建林, 姜冶蓉, 马速良, 等. 新型电力系统下分布式储能应用场景与优化配置[J/OL]. 高电压技术: 1-14[2023-12-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230203>.
LI Jianlin, JIANG Yerong, MA Suliang, et al. Application scenarios and optimal configuration of distributed energy storage under the new power system[J/OL]. High Voltage

- Engineering: 1-14[2023-12-15]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230203>.
- [8] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662-1677.
WU Shan, BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662-1677.
- [9] PJM Manual 28: operating agreement accounting [EB/OL]. [2016]. <http://www.pjm.com/~media/documents/manuals/m28-redline.ashx>.
- [10] NYISO manual 14: accounting and billing manual [EB/OL]. [2016]. <http://www.nyiso.com/public/webdocs/marketsoperations/documents/ManualsandGuides/Manuals/Administrative/acctbillmnl.pdf>.
- [11] CHENG Y, TABRIZI M, SAHNI M, et al. Dynamic available AGC based approach for enhancing utility scale energy storage performance[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1070-1078.
- [12] PAN X, XU H, LU C, et al. Energy storage system control strategy in frequency regulation[C] // 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), August 21-25, 2016, Fort Worth, TX, USA.
- [13] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5080-5087.
HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087.
- [14] 李卫国, 焦盘龙, 刘新宇, 等. 基于变分模态分解的储能辅助传统机组调频的容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 43-52.
LI Weiguo, JIAO Panlong, LIU Xinyu, et al. Capacity optimization configuration of energy storage auxiliary traditional unit frequency modulation based on variational mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 43-52.
- [15] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 电力市场环境考虑风电调度和调频极限的储能优化控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1791-1804.
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Optimal control strategy for energy storage considering wind farm scheduling plan and modulation frequency limitation under electricity market environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1791-1804.
- [16] WEN S, WANG Y, TANG Y, et al. Proactive frequency control based on ultra-short-term power fluctuation forecasting for high renewables penetrated power systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(12): 2166-2173.
- [17] YI Z, XU Y, GU W, et al. Distributed model predictive control based secondary frequency regulation for a microgrid with massive distributed resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 12(2): 1078-1089.
- [18] XIANG M, YANG Z, YU J. Hierarchical AGC dispatch with detailed modeling of energy storage system behaviors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1689-1701.
- [19] 唐陇军, 陈子墨, 朱兰, 等. 控制性能标准下考虑系统频率偏差特性的多时间尺度机组优化调度[J]. 现代电力, 2023, 40(3): 314-322.
TANG Longjun, CHEN Zimo, ZHU Lan, et al. Multi-time scale unit optimal scheduling considering system frequency deviation characteristics under CPS index[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(3): 314-322.
- [20] XIANG M, YANG Z, YU J, et al. Determination and cost allocation for regulation reserve with renewables: a data-driven assisted approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 813-825.
- [21] XIE X, GUO Y, WANG B, et al. Improving AGC performance of coal-fueled thermal generators using multi-MW scale BESS: a practical application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1769-1777.
- [22] ZHANG X, KUENZEL S, COLOMBO N, et al. Hybrid short-term load forecasting method based on empirical wavelet transform and bidirectional long short-term memory neural networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(5): 1216-1288.
- [23] 徐业琰, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于综合需求响应和博弈的区域综合能源系统多主体日内联合优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2506-2518.
XU Yeyan, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Multi-player intraday optimal dispatch of integrated energy system based on integrated demand response and games[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2506-2518.
- [24] Wind generation[DB/OL]. https://dataminer2.pjm.com/feed/wind_gen/definition.
- [25] DOENGES K, EGIDO I, SIGRIST L, et al. Improving AGC performance in power systems with regulation response accuracy margins using battery energy storage system (BESS)[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(4): 2816-2825.
- [26] XU B, OUDALOV A, ULBIG A, et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1131-1140.

收稿日期: 2024-01-15

作者简介:

雷雨(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: cqleiyu@126.com

向明旭(1994—), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电力系统运行优化与分析、电力市场;

E-mail: mxxiang@cqu.edu.cn

黄子蒙(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化分析。E-mail: 202011021088t@cqu.edu.cn

(编辑 姜新丽)