

· 专论与综述 ·

调频辅助服务市场环境下的频率控制技术研究

仇进^{1,2}, 吴继平^{2,3}, 滕贤亮^{2,3}, 陈谦¹, 喻洁⁴

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106; 4. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:随着调频服务市场化的逐步推进, 现有的频率控制策略已经不适应市场化的运行要求, 因此, 需要对现有的控制策略进行改进。从市场角度出发, 提出了市场环境下频率控制策略的整体架构, 包括调频辅助服务市场机制、调频容量需求实时计算方法、市场环境下的频率控制策略及机组调节性能评价指标。在某省级电网进行了试验, 结果验证了该方案的有效性。

关键词:调频服务市场; 市场机制; 调频容量需求; 频率控制策略; 性能评价指标

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)02-0001-07

0 引言

随着电力市场化的进一步推进, 调频服务市场化机制将逐步建立。目前国内的电网调频在需求计算、机组调用、补偿结算等方面未充分考虑市场化因素, 没有从服务使用成本或经济性的角度去考虑频率控制策略和控制目标, 难以明确调频辅助服务的真实成本及调节效果。随着调频服务逐步趋向市场化, 可通过建立市场来引导调频服务提供商, 提供更加优质的调频服务, 优先调用质优价廉的调频服务, 优化机组调频效果, 促进电厂改进技术水平, 提高运行经济性。

在调频辅助服务市场机制方面, 许多国家如美国、英国等都已经形成了成熟的电力市场。文献[1—2]分析了美国独立系统运营商 PJM (Pennsylvania-New Jersey-Maryland, PJM) 及加州的调频市场, 包括市场的投标、竞价、出清及结算机制。文献[3]讨论了电力市场环境下的辅助服务的获取与成本的分摊问题, 对我国电力工业市场化后辅助服务的获取和定价原则提出了一些看法。

随着风电、光伏等新能源大规模并网发电, 其间歇性和波动性对电网频率的影响越来越显著, 针对在调频市场中需要购买的调频容量, 传统的调频需求计算方法越来越不适用。文献[4]以浙江电力系统为例, 提出了基于负荷预测偏差概率统计和控制性能指标 (control performance standards, CPS) 违

反修正的调频需求计算方法, 新能源接入和电网机组发电计划等因素并未考虑。文献[5]提出了平衡监管区域控制偏差限制 (balancing authority ACE limits, BAAL) 标准下调频需求预测, 仅考虑了负荷本身, 忽略了负荷预测精度以及机组发电计划对容量需求计算的影响。文献[6]考虑风电出力特点, 建立了含风电辅助服务需求评估模型, 为新能源并网情况下调频需求的确定提供了参考。

调频市场出清后, 需要设计合理的频率控制策略, 从而更好地运用现有调频资源来满足系统的调频需求, 同时尽量节省控制成本。目前国内电网频率控制还是基于分省平衡机制, 主要由省级调度中心负责电网频率和联络线的控制。省级调度中心自动发电控制首要是根据所采用的控制性能评价标准 (包括 CPS 标准, A 标准等) 对调管范围内机组进行实时控制, 以满足控制性能考核标准要求, 采用的自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 策略主要是基于经典 PI 控制策略^[7], 对频率控制策略的研究主要集中于常规控制策略的研究, 重点关注利用各种调节资源、设计不同的控制策略提高频率控制水平, 满足控制性能评价标准要求^[7-8]。部分省调针对特定的控制目标, 例如特高压联络线功率^[9-10]、水火电协调等, 对控制策略作了对应的改进和完善, 满足电网特定控制目标要求^[11-12]。随着控制理论和智能算法的发展, 基于最优控制理论的优化控制策略、模型预测、自适应控制、模糊逻辑以及遗传算法等智能控制算法在 AGC 控制器设计的相关研究得到逐步深入, 但目前还处于研究阶段, 不能投入实际应用^[13]。

随着国内调频辅助服务市场的逐步建立, 需要

收稿日期: 2017-11-16; 修回日期: 2018-01-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51407030); 国家电网有限公司科技项目“市场环境下电网调频辅助服务技术研究”

提前设计适应调频市场环境的频率控制策略,既满足电网频率控制需要,又能适应调频服务市场化的特性要求。本文基于调频服务市场机制,从调频需求实时计算方法、市场化下的频率控制策略及机组调频性能指标等方面开展研究,提出了市场环境下频率控制整体架构,为实现调频服务市场化的频率控制提供参考。

1 调频服务市场环境下频率控制整体架构

调频服务市场运行整体架构如图1所示,整体架构分为调频服务提供商、调频服务市场及市场环境下频率控制策略三部分。调频服务提供商给市场交易系统提交调频机组的相关参数,市场负责调频资源准入,并基于调频需求组织调频资源进行竞价、出清和结算。市场环境下频率控制策略主要负责调频需求的实时计算,并能根据市场交易出清结果自动选择调频机组、确定调频机组调频范围,根据电网实时发用电平衡情况,进行区域调节需求(area regulation requirement, ARR)的计算分配及调频资源的调用,并根据调频机组实际跟踪控制指令情况统计其控制性能和调节贡献,为市场结算提供基础数据。

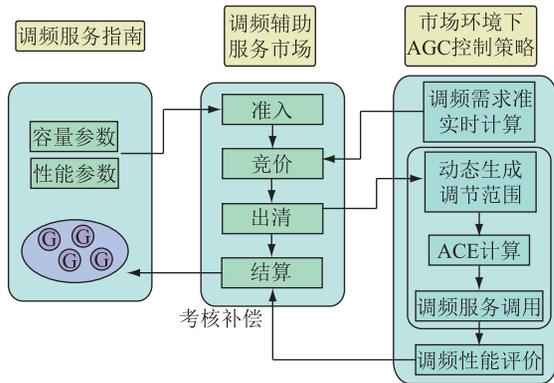


图1 调频服务市场环境下频率控制整体架构

Fig.1 Frequency adjustment framework based on market

2 调频服务市场运行机制

2.1 市场准入及参与方式

调频市场主体包括发电企业、电力用户及独立辅助服务提供者。发电企业为安装有自动发电控制装置的发电机组,同时要求参与实时调频市场的调频机组必须参与主能量市场,且留有一定调频能力。有意愿参与调频市场的调频厂商提前一周向市场运营机构提交申请,市场运营机构基于准入指标的门槛值对各调频机组进行准入考核;电力用户为10 kV及以上电压等级电力用户,鼓励优先购电

的企业和电力用户自愿进入市场;对于独立辅助服务提供者,鼓励电储能设备、需求侧(如可中断负荷)等尝试参与。

2.2 市场交易机制

交易中心提前将系统的调频需求公布,在日前调频市场中调频商提前将投标信息提交给交易中心,投标信息包括调频容量及单位容量价格,单位电量价格及机组综合调频性能指标值。交易中心参考各调频商历史考核指标值,根据各调频商上报的调频容量价格,将单位容量价格与综合调频性能值的商进行排序,并将其作为购买标准,提前一个调度时刻由低到高进行排序并购买,直至满足系统所需的容量为止。

市场结算包括两部分:日前容量费用结算和实时调节电量费用结算。将中标调频商的报价进行排序,最后一个调频商的报价为系统的边际电价,每一个时段以此价格进行结算。同时对不同机组参与调频的贡献程度进行量化,针对调频贡献大的机组,再给予一定的补偿奖励。

3 市场环境下调频需求实时计算方法

随着调频服务市场化的推进,尤其是调频现货市场的逐步建立,需要一种可在线化运行的调频需求实时计算方法。本文从电网发用电平衡的角度,综合考虑负荷预测、新能源发电预测、联络线交换计划、机组发电计划等多种因素,分别计算影响电网功率平衡的各种分量,最终得到全网总体的调频需求。针对实际运行中不满足考核指标的情况,再利用控制性能评价标准对计算结果进行修正,在保障电网运行安全的前提下,提高调频服务的经济性^[14-16]。

调频需求计算主要考虑负荷变化分量、新能源出力分量、联络线计划分量及机组计划分量。同时将各个分量的预测偏差也考虑到算法中去。用公式表达为:

$$P = (P_{\text{load}} + \Delta P_{\text{load}}) - (P_{\text{energy}} - \Delta P_{\text{energy}}) - P_{\text{line}} - P_{\text{G_plan}} + \Delta P_{\text{G_plan}} \quad (1)$$

式中: P 为AGC调频容量需求; P_{load} 为负荷变化导致的总调频容量需求; ΔP_{load} 为负荷预测偏差; P_{energy} 为新能源预测发电出力变化导致的调频需求; ΔP_{energy} 为新能源预测偏差; P_{line} 为联络线计划变化分量; $P_{\text{G_plan}}$ 为跟计划机组的计划出力调频总量; $\Delta P_{\text{G_plan}}$ 为跟计划机组偏差量。其中,各分量的计算如下:

$$P_{i\text{-load}} = L_{i\text{-max}} - L_{i\text{-min}} \quad (2)$$

式中: $L_{i-\max}$ 为第 i 时段的最高负荷值; $L_{i-\min}$ 为第 i 时段的最低负荷值。

$$\Delta P_{i-\text{load}} = \text{AVG}(L_{i\text{a}} - L_{i\text{s}}) \quad (3)$$

式中: $L_{i\text{a}}$ 为 i 时段负荷实际运行值; $L_{i\text{s}}$ 为 i 时段负荷超短期预测值。

$$P_{\text{energy}} = L_{\text{fcst},(t+\Delta t)} - L_{\text{fcst},t} \quad (4)$$

式中: $L_{\text{fcst},t}$ 为经滚动平均法平滑后曲线在 t 时刻的新能源预测出力; $L_{\text{fcst},(t+\Delta t)}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻的新能源预测出力。

$$P_{\text{line}} = P_{\text{line},(t+\Delta t)} - P_{\text{line},t} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{line},t}$ 为 t 时刻联络线交换计划; $P_{\text{line},(t+\Delta t)}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻联络线交换计划。

$$P_{\text{G-plan}} = P_{\text{non-AGC}} + P_{\text{AGC-plan}} + P_{\text{AGC-plan}}^* \quad (6)$$

式中: $P_{\text{non-AGC}}$ 为 M 台非 AGC 机组的计划出力变化总量; $P_{\text{AGC-plan}}$ 为 N 台跟踪日前发电计划机组的计划出力变化总量; $P_{\text{AGC-plan}}^*$ 为 L 台实时滚动跟踪计划 AGC 机组的计划出力变化总量。

$$P_{\text{non-AGC}} = \sum_{i=1}^M [P_{i,(t+\Delta t)} - P_{i,t}] \quad (7)$$

式中: $P_{i,t}$ 为第 i 台非 AGC 机组 t 时刻的计划出力; $P_{i,(t+\Delta t)}$ 为第 i 台非 AGC 机组 $t + \Delta t$ 时刻的计划出力。

$$P_{\text{AGC-plan}} = \sum_{j=1}^N [P_{j,(t+\Delta t)} - P_{j,t}] \quad (8)$$

式中: $P_{j,t}$ 为第 j 台跟踪日前发电计划机组 t 时刻的计划出力; $P_{j,(t+\Delta t)}$ 为第 j 台跟踪日前发电计划机组 $t + \Delta t$ 时刻的计划出力。

$$P_{\text{AGC-plan}}^* = \sum_{k=1}^L [P_{k,(t+\Delta t)} - P_{k,t}] \quad (9)$$

式中: $P_{k,t}$ 为第 k 台实时滚动跟踪计划 AGC 机组 t 时刻的出力; $P_{k,(t+\Delta t)}$ 为第 k 台实时滚动跟计划 AGC 机组 $t + \Delta t$ 时刻的出力。

跟踪计划机组的调节偏差量 $\Delta P_{\text{G-plan}}$ 取各机组调节精度求和。

对于容量需求计算中的各个分量,由于不同电网的特性不同,例如:负荷特性,新能源占比等,各个分量所占比重不同,应针对电网特性引入不同分量的比重系数。实际应用时,可根据电网实际运行结果采取相关控制评价标准^[7],如 CPS 标准,对计算得到的调频容量进行再修正。

为了满足电网调控性能的要求,避免出现调节时容量够但调节速率达不到要求的问题,在调频容量的计算中应考虑到偏差分量的变化速率。在市场中购买调频容量时不仅需要满足每个时段所需的调频容量,还要对提供调频服务的机组调节速率提出一定的要求。

4 市场环境下频率控制策略

本文分别从市场环境下中标机组调节范围的生成、ARR 计算以及调频机组的调用策略三个角度,提出适应调频市场化特性的频率控制策略。

4.1 调频机组调节范围的生成

一般情况下机组的调节带宽主要受机组实际运行限额影响,在自动控制模式下,机组基点功率始终为当前实际出力,与发电计划无关联,机组根据承担的调节功率,在整个调节范围内上下调节。机组在参与调频服务市场竞标时,其调节范围在机组常规运行约束影响外,还受到机组能量市场交易结果影响和中标容量影响,如图 2 所示。因此,为适应调频市场化特性要求,在确定调频中标机组的调节范围时,首先根据机组在能量市场中得到一个基础计划值,将该计划值作为基点功率,再在基点功率的基础上,上下增加一个调频范围作为调频带宽,形成调频带宽模式下的机组实时调节范围,如图 3 所示。

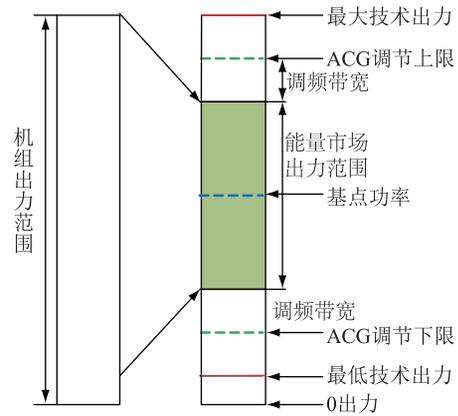


图2 市场环境下的AGC机组调节范围

Fig.2 Regulation range of AGC unit under market environment

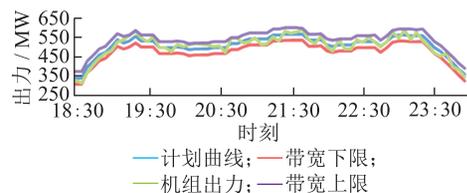


图3 计划带宽模式下的机组调节范围

Fig.3 Unit regulation range in planned bandwidth pattern

调整带生成方法如下:设计划值为 P_b , 机组调节上限为 P_{\max} , 机组调节下限为 P_{\min} , 中标调频范围为 w , 调整带上限为 B_{\max} , 调整带下限为 B_{\min} 。调整带边界为:

$$B_{\max} = P_b + w \quad (10)$$

$$B_{\min} = P_b - w \quad (11)$$

同时根据以下条件进行修正:

$$B_{\max} = P_{\max} \quad P_b + w > P_{\max} \quad (12)$$

$$B_{\min} = P_{\min} \quad P_b - w < P_{\min} \quad (13)$$

通过上述方法计算机组实时调节范围,机组可以在这个调节范围内自由调节,在满足电网频率控制需求的同时适应市场化特性要求。

4.2 ARR 计算

AGC 的控制目标是控制区的区域控制偏差 (area control error, ACE)。 E_{ACE} 是根据电力系统当前的负荷和频率等因素计算形成的偏差值,它反映了区域内发电和负荷的不平衡情况^[9-10]。 E_{ACE} 同时考虑到了 ACE 和频率偏差 Δf 两个因素,定联络线及频率偏差模式控制 (tie-line load frequency bias control, TBC) 方式下计算方法如式 (14) 所示:

$$E_{ACE} = (P_a - P_s) + B(f_a - f_s) \quad (14)$$

式中: P_a 为联络线实际交换功率; P_s 为联络线计划交换功率; B 为频率偏差系数; f_a 为实际频率; f_s 为计划频率。

在市场环境下,计算出 E_{ACE} 后,考虑到 E_{ACE} 波动比较频繁,为减少机组的无效调节,再基于实时计算得到 E_{ACE} 值,并结合 ARR 历史数据,采用傅里叶变换法对 E_{ACE} 数据序列进行分频,如式 (15) 所示,针对分频所得到的不同波动频率 E_{ACE} 分量,高频分量可直接滤除。对低频分量,可采用性能较好的机组进行调节;对于直流分量,采用性能较差的机组调节,以改善电网总体的调频效果,经过处理后的 E_{ACE} 作为区域调节需求 ARR。

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (15)$$

式中: $x(t)$ 为时域信号; $X(\omega)$ 为变换后得到的频谱。

4.3 调频机组调用策略

确定好控制区的调节需求后,下一步就是调用调频机组对 ARR 进行控制。随着调频市场的逐步建立,在机组调用时不能按照传统的比例分担或优先级排序分配策略,应考虑机组在调频服务市场中的报价情况,综合机组性能和服务报价两方面因素得到每台机组的综合排序因子,计算方法如式 (16)、(17),并构造机组调节优先级排序队列,如图 4 所示。图中,按机组的综合排序因子从上往下由小到大排列,当需要升出力时,则自上而下调用机组构成机组的升出力序列,若需要降出力,则自下而上调用机组构成机组的降出力序列。根据优先级排序队列,顺序调用机组对控制区 ARR 进行控制。

$$K_1(i) = \alpha V + \beta T + \gamma E \quad (16)$$

$$K = \frac{P_{\text{bid}}(i)}{K_1(i)} \quad (17)$$

式中: $K_1(i)$ 为 i 机组的调节性能指标; V 为调节速率指标; T 为机组 i 的响应时间; E 为调节精度指标; α, β, γ 分别为调节速率指标、响应时间指标及调节精度指标的权重系数; K 为机组综合排序因子; $P_{\text{bid}}(i)$ 为机组 i 的单位电量报价。

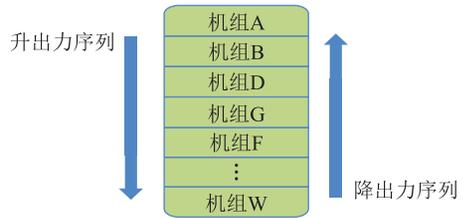


图 4 机组调节优先级排队序列

Fig.4 Priority sequence of unit adjustment

5 市场环境下调频机组考核评价指标设计

针对机组调节性能指标,目前的评价方法和评价指标主要关注对机组的考核评价,不能完全满足调频市场化后对调频资源的全面评价要求^[17-19]。为了实现 AGC 与市场交易系统的全面对接,对机组考核评价可以从准入、考核、补偿三方面入手设计对应的机组调频考核评价性能指标。文献[20]中提出了相关性指标 C 、延时性指标 D 、里程度指标 M 及精确度指标 P 共 4 个评价指标。其中,关联性指标、延时性指标完全利用机组实际跟踪数据进行计算得到,适宜用作准入指标;精确度指标跟机组实际跟踪单个指令有关,适宜作为性能考核指标,用于促进机组提高调频性能。在此基础上根据调频市场特性,在考核指标中补充了可用度指标 A ,补偿指标中补充了调节深度指标 S 。

(1) 可用度指标 A : 反映机组在实际调节过程中所能达到的真实出力,与发电商在调频市场上报的机组可调容量对照,对机组进行调频性能考核。

按照每 5 s 一个计算点,每 5 min 计算一次机组 A 指标,计算机组每天的可用度指标 A :

$$A_i = \sum_{n=1}^{60} \frac{P_{i-n}}{P_{i-N}} \quad (18)$$

$$A = \frac{1}{288} \sum_{i=1}^{288} A_i \quad (19)$$

式中: P_{i-n} 为第 i 时段第 n 个采样点机组所能达到的真实出力; P_{i-N} 为该点对应时段机组上报的可调容量。

(2) 调节深度指标 S 反映的是机组实际调节里程总和。

$$S = \sum (M_{t+\Delta t} - M_t) \quad (20)$$

式中: S 为每个时段内, 机组实际出力跟踪目标出力变化的总和; $\sum (M_{t+\Delta t} - M_t)$ 为机组跟踪控制指令时实际出力与上一时刻实际出力差的累加, 若实际出力超出目标出力, 则不计入。

在以上提出的指标基础上, 可以设计表征机组跟踪指令调节性能总指标 K_1, K_2, K_3 。

(1) 准入指标:

$$K_1 = \alpha C + \beta D \quad (21)$$

式中: α, β 分别为相关性、延迟性指标的权重系数。

(2) 考核指标:

$$K_2 = \mu P + \rho A \quad (22)$$

式中: μ, ρ 分别为精确度、可用度指标的权重系数。

(3) 补偿指标:

$$K_3 = S \quad (23)$$

对于指标计算中权重系数的设置并不是固定不变的, 与机组类型、电网实际运行情况有关, 在实践中, 要结合电网运行情况, 通过对机组实际跟踪过程进行测算来确定。利用上述指标, 可以实现市场环境下对调频机组的全面评价, 并能与市场交易系统闭环, 保障调频市场交易的顺利执行。

6 算例分析

本文提出的市场环境下的频率控制在广东电网已经开展了闭环控制试验。广东电网调频辅助服务市场调频服务提供商包括按照国家和行业标准具备 AGC 功能的、由省级及以上调度机构调管的并网发电单元, 或其他具备提供调频服务能力的装置, 包括储能装置、储能电站等。其闭环控制试验过程如下:

(1) 首先在模拟闭环前, 由 AGC 按日统计所有参与市场机组的准入指标和性能考核指标, 准入指标系数分别按 0.5 设置, 准入指标门槛设置为 0.6, 即准入 K_1 指标要求大于 0.6。在考核指标设计上, 按照 0.5, 0.25, 0.25 进行设置, 整体考核指标作为调频服务商调节性能因子纳入市场竞价。

(2) 再由第 3 小节介绍的实时调频需求算法计算出每小时的调频需求, 为简化工作流程按照模拟闭环前计算得到的每小时最大调频容量 1000 MW 进行市场需求发布。

(3) 市场交易系统每小时交易一次生成市场交易结果, 再实时传输至 AGC, AGC 根据出清结果自动切换中标机组投入调频模式, AGC 控制策略采用 4.3 小节的调用策略, 通过优先调用性能好、报价低的机组进行调节, 再通过调节深度补偿的方式鼓励

服务提供商提高性能、降低报价, 达到电网整体调频费用的目标。

(4) 在市场运行过程中, AGC 同时实时计算机组的考核性能指标, 用最新计算指标滚动更新机组平均考核性能指标。表 1 显示的是某时段市场中标的前 12 台机组性能指标和中标容量数据。

表 1 市场交易出清结果

Tab.1 Clearing results of market transactions

| 序号 | 机组名称 | 性能指标 | 调频容量/MW |
|----|--------|------|---------|
| 1 | HMC.2G | 0.64 | 77.70 |
| 2 | JHC.1G | 0.66 | 45.00 |
| 3 | JHC.3G | 0.64 | 75.00 |
| 4 | MMC.6G | 0.65 | 22.50 |
| 5 | MMC.7G | 0.76 | 45.00 |
| 6 | STC.1G | 0.58 | 22.50 |
| 7 | STC.3G | 0.67 | 45.00 |
| 8 | ZLC.3G | 0.69 | 75.00 |
| 9 | SJC.1G | 0.72 | 49.50 |
| 10 | SJC.2G | 0.74 | 49.50 |
| 11 | SJC.3G | 0.62 | 15.75 |
| 12 | SJC.4G | 0.68 | 15.75 |

经过闭环测试后发现, 电网频率基本保持稳定, 并未出现频率质量大幅下降的现象, 保证了电网频率运行安全, 频率偏差情况如图 5、图 6 所示。

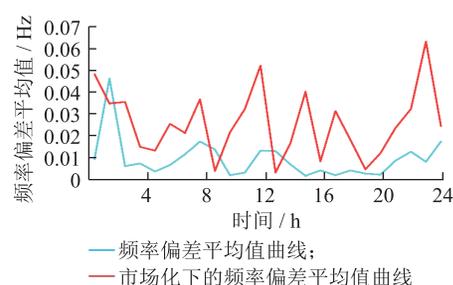


图 5 频率偏差平均值情况对比

Fig.5 Comparison of frequency deviation average value

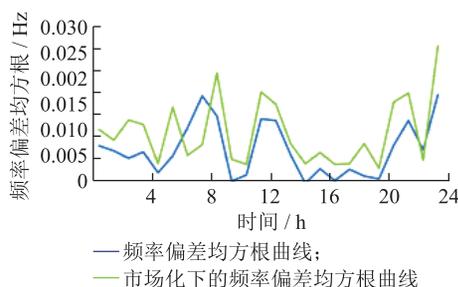


图 6 频率偏差均方根情况对比

Fig.6 Comparison of frequency deviation root mean square value

图 5、图 6 分别从平均值和均方根角度对电网引入市场前后的频率偏差变化情况进行对比, 从图

中可以看出,引入调频市场后,频率偏差变大,但电网频率基本保持稳定。

7 结语

基于调频服务市场机制,在保证电网频率运行稳定的前提下,提出了调频需求实时计算方法、调频机组调用策略及机组调频性能考核评价指标,建立调频服务市场环境下频率控制架构,满足了调频市场环境下频率控制需要。测试结果证明本文提出的调频市场环境下的频率控制技术的有效性,有力支撑了电网调频服务市场化的建设和电网频率控制。

参考文献:

- [1] PJM INT., L L C. Ancillary Services [EB/OL]. <http://www.pjm.com>.
- [2] 何永秀,马昕,王怡,等. 电力辅助服务市场(ASM)国际比较研究[J]. 华东电力,2003,31(7):9-13.
HE Yongxiu, MA Xin, WANG Yi, et al. Comparative study of ancillary service market (ASM) of different countries[J]. East China Electric Power,2003,31(7):9-13.
- [3] 焦连伟,文福拴,祁达才,等. 电力市场中辅助服务的获取与定价[J]. 电网技术,2002,26(7):1-6.
JIAO Lianwei, WEN Fushuan, QI Dacai, et al. Procurement and pricing of ancillary services in electricity markets [J]. Power System Technology,2002,26(7):1-6.
- [4] 赵学顺,汪震,文福拴,等. 一种新的自动发电控制容量预测和获取机制[J]. 浙江大学学报(自然科学版),2005,39(5):685-690.
ZHAO Xueshun, WANG Zhen, WEN Fushuan, et al. New framework for forecasting and procuring automatic generation control capacity [J]. Journal Of Zhejiang University (Engineering Science),2005,39(5):685-690.
- [5] 宋学杰,陈新仪,宋依群,等. 控制区二次调频容量需求预测新方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,(9):123-129.
SONG Xuejie, CHEN Xinyi, SONG Yiqun, et al. A new method for forecasting two frequency modulation capacity demand in control area[J]. Electric Power System and Automation,2016,(9):123-129.
- [6] 乔惠. 含风电 AGC 辅助服务需求评估方法的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
QIAO Hui. Research on evaluation method for AGC ancillary service requirement including wind power [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [7] 高宗和,滕贤亮,涂力群. 互联网 AGC 分层控制与 CPS 控制策略[J]. 电力系统自动化,2004,28(1):78-81.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, TU Liqun. Hierarchical AGC mode and CPS control strategy for interconnected power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(1):78-81.
- [8] 谭涛,姜杰,何潜,等. 省级电网 AGC 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(16):63-66.
TAN Tao, JIANG Jie, HE Qian, et al. Research on AGC control strategy of provincial power grid[J]. Power System Protection and Control,2011,39(16):63-66.
- [9] 江木,吴文传,张伯明,等. 特高压联网下 AGC 协调控制策略仿真[J]. 电力系统自动化,2010,34(14):75-78.
JIANG Mu, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Simulation of an AGC coordinated control strategy for ultra-high voltage interconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(14):75-78.
- [10] 高宗和,陈刚,杨军峰,等. 特高压互联电网联络线功率控制(一)AGC 控制策略[J]. 电力系统自动化,2009(15):51-55.
GAO Zonghe, CHEN Gang, YANG Junfeng, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid part one AGC control strategies [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(15):51-55.
- [11] 李予州,吴文传,张伯明,等. 多时间尺度协调的区域控制偏差超前控制方法[J]. 电网技术,2009,33(3):15-19.
LI Yuzhou, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A multi-timescale coordination method for area control error advanced control[J]. Power System Technology,2009,33(3):15-19.
- [12] 林静怀,江凡,许澄生,等. 扰动控制性能评价标准在福建电网的应用[J]. 电网技术,2009,33(13):64-66.
LIN Jinghuai, JIANG Fan, XU Chengsheng, et al. Application of disturbance control standard in fujian power grid[J]. Power System Technology,2009,33(13):64-66.
- [13] 颜伟,赵瑞锋,赵霞,等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(8):149-155.
YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review of research on control strategy of automatic generation control [J]. Power System Protection and Control,2013,41(8):149-155.
- [14] 陈逍潇,张粒子,杨萌,等. 考虑光伏发电功率波动性的 AGC 备用容量分析方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):16-21,52.
CHEN Xiaoxiao, ZHANG Lizi, YANG Meng, et al. A method for AGC reserve capacity analysis considering photovoltaic power fluctuation characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(22):16-21,52.
- [15] 滕贤亮,高宗和,朱斌,等. 智能电网调度控制系统 AGC 需求分析及关键技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(1):81-87.
TENG Xianliang, GAO Zonghe, ZHU Bin, et al. Requirements analysis and key technologies for automatic generation control for smart grid dispatching and control systems[J]. Automation Of Electric Power Systems,2015,39(1):81-87.
- [16] 杨林,葛毅,南开辉,等. 受端电网消纳区外电力规模的关键影响因素研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(3):21-24,28.
YANG Lin, GE Yi, NAN Kaihui, et al. The research on the key influences of power consumption for receiving grid [J].

- Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3):21-24, 28.
- [17] 徐春雷, 徐瑞, 仇晨光, 等. 发电机组一次调频在线测试与AGC性能考核系统设计[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3):1-6.
- XU Chunlei, XU Rui, CHOU Chenguang, et al. On line test of generator primary frequency regulation and design of AGC performance evaluation system[J]. Power Engineering Technology, 2017, 36(3):1-6.
- [18] 陈磊, 胡伟, 徐飞, 等. 互联电网联络线随机功率波动统计特性与评价标准分析[J]. 电网技术, 2013(11):3137-3143.
- CHEN Lei, HU Wei, XU Fei, et al. Analysis on statistic characteristic and evaluation criteria of tie-line stochastic power fluctuation in interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2013(11):3137-3143.
- [19] 李虎成, 袁宇波, 卞正达, 等. 面向特高压交流大受端电网的频率紧急控制特性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2):27-31, 109.
- LI Hucheng, YUAN Yubo, BIAN Zhengda, et al. Analysis of frequency emergency control characteristics for UHV AC/DC large terminal power grid[J]. Power Engineering Technology, 2017, 36(2):27-31, 109.
- [20] 吴继平, 谢旭, 郭磊, 等. 基于实际跟踪数据统计分析的机组调节性能评价指标[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4):163-169.
- WU Jiping, XIE Xu, GUO Lei, et al. Unit regulation performance indices based on statistical analysis of real tracking data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4):163-169.

作者简介:



仇进

仇进(1994—),女,硕士研究生,研究方向为市场环境下自动发电控制策略(E-mail: qiujiync@163.com);

吴继平(1984—),男,硕士,工程师,从事电力系统自动发电控制、新能源发电控制研究工作(E-mail: wuijiping@sgepri.sgcc.com.cn);

滕贤亮(1978—),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电网调度自动化、新能源运行控制研究工作。

Frequency Control Technology Based on Frequency Regulation Auxiliary Service Market

QIU Jin^{1,2}, WU Jiping^{2,3}, TENG Xianliang^{2,3}, CHEN Qian¹, YU Jie⁴

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. Mart Grid Protection and Control of Operation National Key Laboratory, Nanjing 211106, China;

4. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the gradual development of the frequency regulation service market, the existing frequency control strategy cannot meet the needs of the market. Therefore, it is necessary to improve the existing control strategy. Based on the market, put forward the overall framework of the frequency control strategy including market mechanism, calculation method for frequency regulation capacity, research on the control strategy and the unit performance evaluation index. The experiment is carried out in a provincial power grid, and the result shows the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: frequency regulation service market; market mechanism; AGC frequency regulation capacity; AGC frequency control strategy; performance evaluation index

(编辑 江林)