

多元资源电能量-惯量和一次调频辅助服务两阶段联合出清

代江¹, 赵晋泉², 陈涛²

(1. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵阳 550005; 2. 教育部海上风电技术工程研究中心(上海电力大学), 上海 200090)

摘要: 高比例新能源电力系统的构建伴随着以常规同步机惯量/一次调频资源的降低, 需要考虑构建多元资源提供惯量/一次调频的辅助服务市场。因此, 提出了多元资源电能量和惯量/一次调频辅助服务两阶段联合出清机制, 建立了包含储能、风电、光伏和频率支撑型负荷的联合出清优化模型。在考虑频率安全约束的预出清中得到系统所需各类辅助服务资源容量和启停情况, 在正式出清模型中考虑简单的惯量和一次调频辅助服务容量需求约束, 在计及频率安全的基础上市场定价更为简单透明。对改进IEEE 39节点系统的算例仿真结果表明所提两阶段市场出清机制是有效的。

关键词: 频率安全; 惯量辅助服务; 一次调频辅助服务; 市场机制; 多元资源

Two-Stage Joint Clearing for Eclectic Energy and Inertia/Primary Frequency Regulation Response Ancillary Services Considering Multiple Type Resources

DAI Jiang¹, ZHAO Jinquan², CHEN Tao²

(1. Power Dispatching and Control Centre of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550005, China; 2. Engineering Research Center of Offshore Wind Technology Ministry of Education, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The construction of a high proportion of new energy power systems is accompanied by a reduction in inertia/primary frequency regulation(PFR) resources with conventional synchronous machines. In order to address this, it is necessary to consider the construction of ancillary service market with multiple type resources to provide inertia and primary frequency regulation. In this paper, a two-stage joint clearing mechanism considering multiple type resources electrical energy and inertia/PFR ancillary service is proposed, and a joint clearing optimization model including energy storage, wind power, photovoltaic and frequency-supported loads is established. The capacity of all kinds of ancillary service resources required by the system and the start and stop of each resource are solved in the security constrained unit commitment(SCUC) pre-clearing model considering the frequency security constraints. In the formal clearing model, the simple inertia and the demand constraint of PFR ancillary service capacity are considered, and the market pricing is simpler and more transparent taking into account frequency security. The simulation results of the improved IEEE 39-node system demonstrate the effectiveness of the proposed two-stage market clearing mechanism.

Key words: frequency security; inertia ancillary service; primary frequency regulation ancillary service; market mechanism; multiple type resources

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577049); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20222444)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51577049); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20222444).

0 引言

伴随着新型电力系统的发展,系统中常规机组的装机占比将不断被削减,系统中惯量、一次调频等资源逐渐开始变得稀缺,系统的安全稳定运行面临挑战^[1-7]。基于构网型逆变器的多元资源主体可以通过预留一定的有功功率容量提供频率支撑的辅助服务,成为系统惯量和一次调频资源构成的重要组成部分^[8-12]。同时,我国国家能源局颁布的《电力辅助服务管理办法》中首次将惯量和一次调频纳入有功功率平衡辅助服务中,并建议采用市场机制^[13];全国电力辅助服务市场试点省份之一的山西省已于 2022 年正式开启一次调频市场^[14]。为适应新形势的电力发展要求,激励多方市场主体参与频率安全辅助服务市场,推动我国惯量和一次调频辅助服务市场发展,亟需开展多元资源电能-惯量和一次调频辅助服务的市场机制和出清方法的研究。

目前国内外学者针对多元资源电能-惯量和一次调频辅助服务的市场机制已经开展了较多的研究。系统惯量和一次调频资源与电能具有强耦合性,相较于顺序出清,联合出清有助于寻求全局最优解,同时也尊重背后的物理机理^[15-20]。文献[16]探讨了含储能的能量与一次调频服务市场联合优化出清机制,构建了基于储能运营商和市场运营角度的双层均衡规划模型,一次调频服务出清价格由相关约束条件的对偶乘子求出;文献[17]提出了常规机组与储能提供电能、一次调频和二次调频服务的联合出清定价机制,构建了对应的出清模型,并以服务作用时的功率平衡约束拉格朗日乘子来定义该服务的容量价格。上述文献没有将与惯量和一次调频资源耦合的频率稳定约束纳入优化调度模型中考虑,出清结果依赖历史数据,存在被第三方投机的风险。文献[18]将市场中不同响应延迟的一次调频辅助服务加以区分,并基于频率安全约束的拉格朗日乘子给予不同价格;文献[19]在此基础上考虑了储能的运行约束,细分构建了储能参与提供惯量和一次调频资源的联合优化出清模型;文献[20]构建了新能源参与提供虚拟惯量和一次调频的电能-惯量和一次调频辅助服务联合出清模型。上述文献在预出清和出清模型中均考虑了频率安全约束,但出清模型中的频率约束求解复杂,定价机制

不直观、不透明。此外,随着新能源占比的进一步提高,部分时刻可能出现调频资源不足的情况。电力电子设备的发展使得多元资源具备向系统提供惯量和一次调频辅助服务的能力^[21-24],构建多元资源参与的电能-惯量和一次调频辅助服务的联合出清模型有利于推动优化惯量和一次调频市场资源构成,提升系统频率稳定性。

本文针对多元资源电能-惯量和一次调频辅助服务的市场机制和出清方法设计,提出了考虑多元资源电能-惯量和一次调频辅助服务联合出清机制,建立了包含储能、风电、光伏和频率支撑型负荷(frequency support load, FSL)的电能市场与一次调频辅助服务联合优化模型,同时也考虑了储能和频率支撑型负荷参与调峰市场。在预出清模型中求解出系统所需各类辅助服务资源容量和各资源启停情况;在出清模型中确定机组启停,储能充放电状态等,并将频率安全约束转化为辅助服务需求约束,在计及频率安全物理机理的基础上市场定价更为简单透明。对改进的 IEEE 39 节点系统进行算例分析,仿真结果表明了所提市场出清机制的有效性。

1 电能-惯量和一次调频辅助服务联合市场机制设计

本文电能-惯量和一次调频辅助服务联合市场机制设计如图 1 所示。

各市场成员在日前申报电能、惯量和一次调

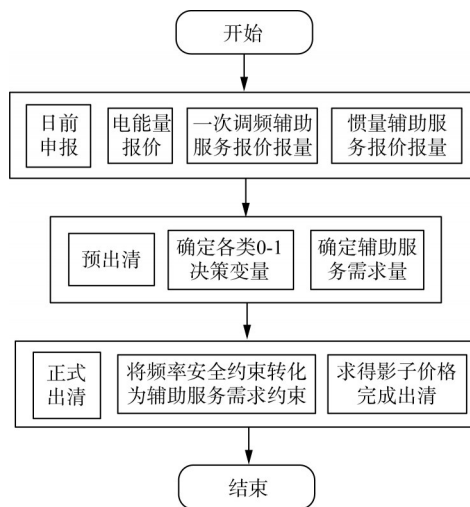


图 1 市场机制设计

Fig. 1 Market mechanism design

频价量信息,新能源报量报价。在日前电能量与辅助服务联合市场预出清模型中考虑频率安全约束,基于各类资源的日前电能量、辅助服务报价求解得到各类资源的启停情况以及各时段系统满足频率安全所需的惯量和一次调频资源。预出清模型中已经隐性包含了各类辅助服务最优配置的物理机理,考虑到市场定价需要简单、清晰、透明,日前电能量、辅助服务正式出清模型不应过于繁琐,因此本文提出的正式出清模型中将频率安全约束转化为各类辅助服务资源需求约束,并利用拉格朗日乘子求得电能量和辅助服务价格进行结算。

本文常规机组仅考虑参与电能量市场和一次调频辅助服务市场的报价,惯量报价为0。此外,考虑到基于电力电子设备的多元资源一次调频响应(enhanced frequency response, EFR)较传统常规机组具有响应时间短,完成交付快的特点,其单位容量的一次调频服务较传统机组对于系统频率安全提供的支撑能力更强。因此,本文对这两类价值不同的一次调频服务加以区分,视为两种不同的辅助服务参与市场报价和采购。基于电力电子设备的多元资源经过测试满足一定的响应时间和交付时间,即可参与快速频率响应一次调频容量的申报。

2 市场联合出清模型

2.1 日前电能+惯量/一次调频辅助服务联合预出清

下文给出多元资源电能量-惯量和一次调频辅助服务的日前联合安全约束机组组合(security constrained unit commitment, SCUC)模型。

2.1.1 目标函数

目标函数为系统总成本最小化。

$$\min F = F_{\text{en}} + F_{\text{g}} + F_{\text{H}} + F_{\text{pfr}} + F_{\text{sh}} \quad (1)$$

式中 F_{en} 、 F_{g} 、 F_{H} 、 F_{pfr} 和 F_{sh} 分别为系统总购电成本、常规机组启停成本、惯量购置成本、一次调频容量购置成本和调峰成本。具体表达式如下。

$$F_{\text{en}} = \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{\text{s}}} \rho_{i,k} P_{i,t,k}^{\text{th}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{w}}} \sum_{t=1}^T \rho_{w,i} P_{w,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{v}}} \sum_{t=1}^T \rho_{v,i} P_{v,i,t} \right) \Delta T \quad (2)$$

式中: T 为总时段数量; ΔT 为一个时段间隔; N_{G} 、 N_{w} 和 N_{v} 分别为常规机组、构网型风电场和构网型光伏站数量; N_{s} 为机组报价分段数量; $\rho_{i,k}$ 、 $\rho_{w,i}$ 和

$\rho_{v,i}$ 分别为常规机组 i 第 k 段的报价,风电场 i 发电报价和光伏站 i 发电报价,美元/MWh; $P_{i,t,k}^{\text{th}}$ 为 t 时段常规机组 i 第 k 段的有功功率; $P_{w,i,t}$ 和 $P_{v,i,t}$ 分别为 t 时段风电 i 和光伏 i 的有功功率。

$$F_{\text{g}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{G}}} \sum_{t=1}^T [(1 - u_{i,t-1}) u_{i,t} C_i^{\text{U}} + u_{i,t-1} (1 - u_{i,t}) C_i^{\text{D}}] \quad (3)$$

式中: $u_{i,t}$ 为常规机组 i 在 t 时段启停状态,取值0-1,1表示机组运行,0表示机组关停; C_i^{U} 和 C_i^{D} 分别为常规机组 i 的启动、关停成本。

$$F_{\text{H}} = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{ess}}} \rho_{\text{ess},i}^{\text{H}} (H_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}} + H_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{w}}} \sum_{t \in \Omega_{w,i}} \rho_{w,i}^{\text{H}} H_{w,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{v}}} \sum_{t \in \Omega_{v,i}} \rho_{v,i}^{\text{H}} H_{v,i,t} \quad (4)$$

式中: N_{ess} 为储能数量; $\rho_{\text{ess},i}^{\text{H}}$ 、 $\rho_{w,i}^{\text{H}}$ 和 $\rho_{v,i}^{\text{H}}$ 分别为储能、构网型风电场和构网型光伏站 i 的惯量报价; $\Omega_{w,i}$ 和 $\Omega_{v,i}$ 分别为构网型风电场和构网型光伏站 i 惯量/一次调频可用的时段(考虑随机性而排除新能源低发时段)集合; $H_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}$ 和 $H_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}}$ 分别为储能 i 在 t 时段充、放电状态下提供的惯量; $H_{w,i,t}$ 与 $H_{v,i,t}$ 分别为 t 时段构网型风电场 i 和构网型光伏站 i 提供的经过折算(即考虑新能源预测偏差而有所冗余)和聚合后的惯量。

$$F_{\text{pfr}} = \sum_{i=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}} \rho_{\text{g},i}^{\text{pfr}} R_{i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ess}}} \rho_{\text{ess},i}^{\text{pfr}} (R_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} + R_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}) \right] \Delta T + \sum_{i=1}^{N_{\text{w}}} \sum_{t \in \Omega_{w,i}} \rho_{w,i}^{\text{pfr}} R_{w,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{v}}} \sum_{t \in \Omega_{v,i}} \rho_{v,i}^{\text{pfr}} R_{v,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{fsl}}} \sum_{t \in \Omega_{\text{fsl},i}} \rho_{\text{fsl},i}^{\text{pfr}} R_{\text{fsl},i,t} \quad (5)$$

式中: N_{fsl} 为FSL数量; $\Omega_{\text{fsl},i}$ 为FSL一次调频可用的时段集合; $\rho_{\text{g},i}^{\text{pfr}}$ 、 $\rho_{\text{ess},i}^{\text{pfr}}$ 、 $\rho_{w,i}^{\text{pfr}}$ 、 $\rho_{v,i}^{\text{pfr}}$ 和 $\rho_{\text{fsl},i}^{\text{pfr}}$ 分别为常规机组 i 、储能 i 、风电场 i 、光伏站 i 和FSL i 的一次调频容量报价; $R_{i,t}$ 、 $R_{w,i,t}$ 、 $R_{v,i,t}$ 和 $R_{\text{fsl},i,t}$ 分别为 t 时段常规机组 i 、风电场 i 、光伏站 i 和FSL i 提供的(经过折算的)一次调频容量; $R_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}}$ 和 $R_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}$ 分别为 t 时段储能 i 在充、放电状态下一次调频容量。

$$F_{\text{sh}} = \sum_{i=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{ess}}} (c_{\text{ess},i}^{\text{dch}} P_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} - c_{\text{ess},i}^{\text{ch}} P_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{fsl}}} (c_{\text{fsl},i}^- P_{\text{fsl},i,t}^- + c_{\text{fsl},i}^+ P_{\text{fsl},i,t}^+) \right] \Delta T \quad (6)$$

式中: $c_{\text{ess},i}^{\text{dch}}$ 和 $c_{\text{ess},i}^{\text{ch}}$ 分别为储能在 t 时段放电、充电价格; $P_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}$ 和 $P_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}}$ 分别为储能 i 在 t 时段充、放电功

率； $c_{\text{fsl},i}^+$ 、 $c_{\text{fsl},i}^-$ 分别为 FSL i 的上、下调价格； $P_{\text{fsl},i,t}^-$ 和 $P_{\text{fsl},i,t}^+$ 分别为 FSL i 在 t 时段下、上调功率。

2.1.2 约束条件

1) 常规系统级约束

(1) 系统有功功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} + \sum_{i=1}^{N_w} P_{w,i,t} + \sum_{i=1}^{N_v} P_{v,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ess}}} P_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} \quad (7)$$

$$= P_{\text{load},t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ess}}} P_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{fsl}}} P_{\text{fsl},i,t} \cdot \lambda_{0,t}$$

式中： $P_{i,t}$ 为常规机组 i 在 t 时段有功功率， $P_{i,t} = \sum_{k=1}^{N_s} P_{i,t,k}^{\text{th}}$ ， $P_{i,t,k}^{\text{th}}$ 为 t 时段常规机组 i 第 k 段的有功功率， N_s 为机组报价分段数量； $P_{\text{load},t}$ 为系统 t 时段除 FSL 外的预测有功负荷； $P_{\text{fsl},i,t}$ 为 FSL i 在 t 时段有功功率； $\lambda_{0,t}$ 为 t 时段约束对应的拉格朗日乘子。

(2) 正负旋转备用约束

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t} (P_{i,\max} - P_{i,t}) \geq R_{L,t} + R_{w,t,\text{up}} \\ \sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t} (P_{i,t} - P_{i,\min}) \geq R_{w,t,\text{down}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为常规机组 i 最小、最大有功功率出力； $R_{L,t}$ 为 t 时段对应负荷所需有功功率备用； $R_{w,t,\text{up}}$ 和 $R_{w,t,\text{down}}$ 分别为 t 时段风电所需的正、负旋转备用。其中， $R_{L,t}$ 、 $R_{w,t,\text{up}}$ 和 $R_{w,t,\text{down}}$ 分别都是按负荷出力、风电出力的一定比例取值。

(3) 支路潮流安全约束

$$-P_{l,\max} \leq \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} G_{j,l} \left(P_{g,j,t} + P_{w,j,t} + P_{v,j,t} + P_{\text{ess},j,t}^{\text{dch}} - P_{\text{ess},j,t}^{\text{ch}} - P_{\text{load},j,t} - P_{\text{fsl},j,t} \right) \leq P_{l,\max} \quad (9)$$

$$l = 1, 2, \dots, N_b$$

式中： N_{bus} 为系统节点数量； N_b 为线路数量； $P_{l,\max}$ 为线路 l 的有功功率限值； $G_{j,l}$ 为节点 j 对线路 l 的功率转移因子； $P_{g,j,t}$ 、 $P_{w,j,t}$ 、 $P_{v,j,t}$ 分别为在 t 时段节点 j 上的常规机组、风电场、光伏站的有功功率； $P_{\text{ess},j,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{ess},j,t}^{\text{dch}}$ 分别为在 t 时段节点 j 上储能充、放电功率； $P_{\text{load},j,t}$ 和 $P_{\text{fsl},j,t}$ 分别为在 t 时段节点 j 上除 FSL 外的预测有功负荷与 FSL。

2) 系统频率安全约束

考虑到常规机组与构网型多元资源的频率响应响应延迟与交付时间均有一定差距，两类资源具有不同的市场价值，因此在市场交易中将这两类一次调频资源加以区分。将常规机组与构网型多元资源

的频率响应进行线性近似处理，频率安全约束表达式如下。

(1) RoCoF 约束^[25]

$$\frac{P_{L,t} \cdot f_0}{2H_{\text{sys},t}} \leq f_{\text{RoCoF},\max} \quad (10)$$

式中： $f_{\text{RoCoF},\max}$ 为系统允许最大频率变化率； f_0 为系统额定频率； $P_{L,t}$ 为 t 时段的有功功率缺额； $H_{\text{sys},t}$ 为 t 时段系统总惯量，表达式如式(11)所示。

$$H_{\text{sys},t} = \sum_{i=1}^{N_G} h_{g,i} u_{i,t} P_{i,\max} + \sum_{i=1}^{N_w} H_{w,i,t} + \sum_{i=1}^{N_v} H_{v,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ess}}} (H_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}} + H_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}}) \quad (11)$$

式中 $h_{g,i}$ 为常规机组 i 的惯性时间常数。

(2) 频率最低点约束^[25]

$$H_{\text{sys},t} \geq \frac{f_0}{2\Delta f_{\max}} \cdot \left[T_{\text{PFR}} (P_t^{\text{EFR}} - P_{L,t})^2 / 2P_t^{\text{PFR}} + P_{L,t} t_{\text{del},\text{PFR}} - P_t^{\text{EFR}} \cdot (t_{\text{del},\text{PFR}} - t_{\text{del},\text{EFR}} - T_{\text{EFR}}/2) \right] \quad (12)$$

式中： $\Delta f_{\max}$ 为系统允许最大频率偏差； T_{PFR} 和 T_{EFR} 分别为常规机组参与一次调频和 EFR 一次调频服务的交付时间； $t_{\text{del},\text{PFR}}$ 和 $t_{\text{del},\text{EFR}}$ 分别为常规机组一次调频和 EFR 的响应延时； P_t^{PFR} 和 P_t^{EFR} 分别为 t 时段常规机组参与的一次调频和 EFR 的总容量，表达式如式(13)~(14)所示。

$$P_t^{\text{PFR}} = \sum_{i=1}^{N_G} R_{i,t} \quad (13)$$

$$P_t^{\text{EFR}} = \sum_{i=1}^{N_w} R_{w,i,t} + \sum_{i=1}^{N_v} R_{v,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ess}}} (R_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} + R_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{fsl}}} R_{\text{fsl},i,t} \quad (14)$$

(3) 频率准稳态约束

$$P_t^{\text{PFR}} + P_t^{\text{EFR}} \geq P_{L,t} \quad (15)$$

3) 多元资源运行约束

(1) 储能运行约束

储能放电状态下运行约束有：

$$0 \leq P_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} + P_{\text{ess},i,t}^{\text{dch},\text{H},\max} + R_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} \leq \eta_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} P_{\text{ess},i,\max}^{\text{dch}} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} \quad (17)$$

$$P_{\text{ess},i,t}^{\text{dch},\text{H},\max} = 2H_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} f_{\text{RoCoF},\max} / f_0 \quad (18)$$

$$H_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} = u_{i,t}^{\text{dch}} h_{\text{ess},i,t} P_{\text{ess},i,\max}^{\text{dch}} \quad (19)$$

$$0 \leq R_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} \leq R_{\text{ess},i,\max} \quad (20)$$

式中： $P_{\text{ess},i,\max}^{\text{dch}}$ 和 $R_{\text{ess},i,\max}$ 分别为储能 i 的最大放电功率和一次调频容量最大值； $\eta_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}}$ 为储能放电状态

的0-1变量,1表示储能处于放电状态; $P_{ess,i,t}^{ch,H,max}$ 为储能*i*在放电状态下时段*t*的最大惯性支撑功率^[26]; $u_{i,t}^{dch}$ 为储能*i*放电时段*t*是否提供惯量的0-1决策变量,0为不提供; $h_{ess,i}$ 为储能*i*的惯性时间常数。

储能充电状态下运行约束有:

$$0 \leq P_{ess,i,t}^{ch,H,max} + R_{ess,i,t}^{ch} \leq P_{ess,i,t}^{ch} \leq \eta_{ess,i,t}^{ch} P_{ess,i,max}^{ch} \quad (21)$$

$$P_{ess,i,t}^{ch,H,max} = 2H_{ess,i,t}^{ch} f_{RoCoF,max} / f_0 \quad (22)$$

$$H_{ess,i,t}^{ch} = u_{i,t}^{ch} h_{ess,i} P_{ess,i,max}^{ch} \quad (23)$$

$$0 \leq R_{ess,i,t}^{ch} \leq R_{ess,i,max} \quad (24)$$

式中: $P_{ess,i,max}^{ch}$ 为储能*i*在*t*时段的充电功率最大值; $\eta_{ess,i,t}^{ch}$ 为储能充电状态的0-1变量,1表示储能处于充电状态; $P_{ess,i,t}^{ch,H,max}$ 为储能*i*在*t*时段充电状态下的最大惯性支撑功率; $u_{i,t}^{ch}$ 为储能*i*在*t*时段充电状态下是否提供惯量的0-1决策变量,0为不提供惯量^[27]。

储能的充放电状态约束和充放电惯量约束有:

$$\eta_{ess,i,t}^{ch} + \eta_{ess,i,t}^{dch} \leq 1 \quad (25)$$

$$u_{i,t}^{ch} + u_{i,t}^{dch} = u_{i,t}^H \quad (26)$$

式中 $u_{i,t}^H$ 为储能*i*次日是否提供惯量的0-1决策变量,1表示提供惯量。

考虑储能荷电状态(state of charge, SOC),有:

$$S_{ess,i,t} = S_{ess,i,t-1} + \gamma_{ess,i,t}^{ch} \Delta TP_{ess,i,t}^{ch} / E_{i,ess} - \Delta TP_{ess,i,t}^{dch} / \gamma_{ess,i,t}^{dch} E_{i,ess} \quad (27)$$

$$S_{ess,i,min} + S_{ess,i,t}^{res} \leq S_{ess,i,t} \leq S_{ess,i,max} \quad (28)$$

$$S_{ess,i,0} = S_{ess,i,T} \quad (29)$$

式中: $S_{ess,i,t}$ 为储能*i*在*t*时段的SOC; $E_{i,ess}$ 为储能*i*的额定容量; $S_{ess,i,min}$ 和 $S_{ess,i,max}$ 分别为储能*i*稳定运行下的最小和最大容量; $\gamma_{ess,i,t}^{ch}$ 和 $\gamma_{ess,i,t}^{dch}$ 分别为储能*i*充、放电效率; $S_{ess,i,t}^{res}$ 表示为了保障储能放电状态有足够能量以支撑频率安全,储能*i*在*t*时段需要的SOC预留。 $S_{ess,i,t}^{res}$ 计算式为:

$$S_{ess,i,t}^{res} = (E_{ess,i,t}^H + E_{ess,i,t}^{pfr}) / E_{i,ess} \quad (30)$$

$$E_{ess,i,t}^H = P_{ess,i,t}^{dch,H,max} \Delta f_{max} / f_{RoCoF,max} \quad (31)$$

$$E_{ess,i,t}^{pfr} = T_{ess} R_{ess,i,t}^{dch} / 2 \quad (32)$$

式中: $E_{ess,i,t}^H$ 和 $E_{ess,i,t}^{pfr}$ 分别为储能*i*在*t*时段提供惯量和一次调频服务所需要预留的能量; T_{ess} 为储能一次调频服务交付时间。其中, $E_{ess,i,t}^{pfr}$ 来源于对储能一次调频响应曲线的积分,本文采用线性近似处理。

(2) FSL运行约束

FSL如电动汽车充电桩、智能中央空调等在感知到频率跌落超过阈值时,可以通过降低用电功率

来缓解电网频率的压力。

地区零散的FSL通过负荷聚合商聚合起来,通过负荷调控平台与调度方连接。同时聚合商上报总可调上、下限、总调节允许偏差功率等数据并基于接受到的调度指令完成对具体负荷的调节。

FSL模型式(33)~(37)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq R_{fsl,i,t} \leq P_{fsl,i,t} - P_{fsl,i,min}, & t \in \Omega_{fsl,i} \\ R_{fsl,i,t} = 0, & t \notin \Omega_{fsl,i} \end{cases} \quad (33)$$

$$W_{fsl,i,min} \leq \sum_{t=1}^T P_{fsl,i,t} \Delta T \leq W_{fsl,i,max} \quad (34)$$

$$0 \leq P_{fsl,i,t}^+ \leq \eta_{fsl,i,t} (P_{fsl,i,max} - P_{fsl,i,t}^*) \quad (35)$$

$$0 \leq P_{fsl,i,t}^- \leq (1 - \eta_{fsl,i,t}) P_{fsl,i,t}^* \quad (36)$$

$$P_{fsl,i,t} = P_{fsl,i,t}^* + P_{fsl,i,t}^+ - P_{fsl,i,t}^- \quad (37)$$

式中: $P_{fsl,i,t}^*$ 为FSL*i*在*t*时段的负荷基线功率; $P_{fsl,i,max}$ 和 $P_{fsl,i,min}$ 分别为FSL*i*的功率上、下限; $W_{fsl,i,max}$ 和 $W_{fsl,i,min}$ 分别为FSL*i*调度周期内电量最大、最小值; $\eta_{fsl,i,t}$ 为描述FSL上调或下调的0-1变量,0表示下调,1表示上调。式(33)表示FSL一次调频容量约束,式(34)表示FSL调节容量上下限约束,式(35)~(37)表示FSL调节功率约束。

(3) 常规机组运行约束

$$u_{i,t} P_{i,min} \leq P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{i,max} - R_{i,t} \quad (38)$$

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{i,UR} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq P_{i,DR} \end{cases} \quad (39)$$

$$\begin{cases} X_{i,t} \geq M_{i,GT}, & X_{i,t} > 0 \\ -X_{i,t} \geq M_{i,DT}, & X_{i,t} < 0 \end{cases} \quad (40)$$

$$0 \leq R_{i,t} \leq u_{i,t} R_i^{max} \quad (41)$$

式中: $P_{i,UR}$ 和 $P_{i,DR}$ 分别为常规机组*i*有功功率最大上升值和下降值; $X_{i,t}$ 为机组*i*在*t*时段连续运行($X_{i,t}$ 为正值)或连续停机($X_{i,t}$ 为负值)的时段数量; $M_{i,GT}$ 和 $M_{i,DT}$ 分别为机组*i*最小运行时段数和最小停机时段数; R_i^{max} 为常规机组*i*一次调频容量爬坡极限。式(38)表示常规机组出力上下限约束,式(39)表示常规机组爬坡约束,式(40)表示常规机组启停时间约束,式(41)表示常规机组提供一次调频容量约束。

(4) 风电场运行约束

风电机组传动轴系的转动惯量可以为系统提供一定惯量支撑。风电需要在输出功率中预留一定容量来向系统一次调频服务。风电场的出力约束、一次调频容量约束有:

$$0 \leq P_{w,i,t} \leq P_{w,i,t}^* - R_{w,i,t} \quad (42)$$

$$\begin{cases} 0 \leq R_{w,i,t} \leq \varepsilon_{w,i} P_{w,i,t}^*, & t \in \Omega_{w,i} \\ R_{w,i,t} = 0, & t \notin \Omega_{w,i} \end{cases} \quad (43)$$

$$\begin{cases} H_{w,i,t} = u_{w,i}^H h_{w,i} P_{w,i,\max}, & t \in \Omega_{w,i} \\ H_{w,i,t} = 0, & t \notin \Omega_{w,i} \end{cases} \quad (44)$$

式中: $P_{w,i,t}^*$ 为风电场 i 在 t 时段的预测功率; $\varepsilon_{w,i}$ 为风电 i 一次调频容量取值比例系数; $P_{w,i,\max}$ 为风电 i 的额定功率; $h_{w,i}$ 为风电场 i 的惯性时间常数(折算后); $u_{w,i}^H$ 为风电场 i 次日是否提供惯量的 0-1 决策变量, 1 表示提供惯量。

(5) 光伏站运行约束

光伏站的出力约束和一次调频容量约束有:

$$0 \leq P_{v,i,t} \leq P_{v,i,t}^* - R_{v,i,t} \quad (45)$$

$$\begin{cases} 0 \leq R_{v,i,t} \leq \varepsilon_{v,i} P_{v,i,t}^*, & t \in \Omega_{v,i} \\ R_{v,i,t} = 0, & t \notin \Omega_{v,i} \end{cases} \quad (46)$$

$$\begin{cases} H_{v,i,t} = u_{v,i}^H h_{v,i} P_{v,i,\max}, & t \in \Omega_{v,i} \\ H_{v,i,t} = 0, & t \notin \Omega_{v,i} \end{cases} \quad (47)$$

式中: $P_{v,i,t}^*$ 为光伏站 i 在 t 时段的预测功率; $\varepsilon_{v,i}$ 为光伏电站 i 一次调频容量取值比例系数; $P_{v,i,\max}$ 为光伏电站 i 的额定功率; $h_{v,i}$ 为光伏电站 i 配置储能的惯性时间常数(折算后); $u_{v,i}^H$ 为光伏电站 i 次日是否提供惯量的 0-1 决策变量, 1 为提供惯量。

2.1.3 模型求解

本文通过基于 MATLAB 的商业软件 CPLEX 求解, 因此需要对模型进行线性化处理。频率最低点约束式(12)为非线性约束。

2.1.4 惯量与一次调频需求量统计

求解日前电能+惯量/一次调频辅助服务联合预出清模型后, 统计系统各时段所需惯量、EFR 一次调频容量和常规机组一次调频容量, 表达式如下。

$$H_{\text{dem},t} = \sum_{i \in \Omega_{g,t}} h_{g,i} P_{i,\max} + \sum_{i \in \Omega_{\text{ess},h}} (H_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}} + H_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}}) + \sum_{i \in \Omega_{w,h}} H_{w,i,t} + \sum_{i \in \Omega_{v,h}} H_{v,i,t} \quad (48)$$

$$P_{\text{dem},\text{EFR},t} = \sum_{i \in \Omega_{\text{ess},\text{pfr},t}} (R_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}} + R_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}) + \sum_{i \in \Omega_{w,\text{pfr},t}} R_{w,i,t} + \sum_{i \in \Omega_{v,\text{pfr},t}} R_{v,i,t} + \sum_{i \in \Omega_{\text{fsl},\text{pfr},t}} R_{\text{fsl},i,t} \quad (49)$$

$$P_{\text{dem},\text{PFR},t} = \sum_{i \in \Omega_{g,\text{pfr},t}} R_{i,t} \quad (50)$$

式中: $H_{\text{dem},t}$ 、 $P_{\text{dem},\text{EFR},t}$ 和 $P_{\text{dem},\text{PFR},t}$ 分别为系统 t 时段所需惯量、EFR 一次调频容量和常规机组一次调频容量; $\Omega_{g,t}$ 为 t 时段提供惯量的常规机组集合; $\Omega_{\text{ess},h}$ 、 $\Omega_{w,h}$ 和 $\Omega_{v,h}$ 分别为次日提供惯量的储能集合、风电

场集合和光伏电站集合; $\Omega_{g,\text{pfr},t}$ 、 $\Omega_{\text{ess},\text{pfr},t}$ 、 $\Omega_{w,\text{pfr},t}$ 、 $\Omega_{v,\text{pfr},t}$ 和 $\Omega_{\text{fsl},\text{pfr},t}$ 分别为 t 时段提供一次调频的常规机组集合、储能集合、风电场集合、光伏电站集合和 FSL 集合。

2.2 电能+惯量/一次调频辅助服务联合市场正式出清

在预出清模型确定开机方式后, 通过正式出清模型确定发电计划。下文给出正式出清的安全约束经济调度 (security-constrained economic dispatch, SCED) 模型。

1) 目标函数

目标函数为系统总成本最小化。

$$\min F = F_{\text{en}} + F_{\text{H}} + F_{\text{pfr}} + F_{\text{sh}} \quad (51)$$

2) 约束条件

惯量辅助服务需求约束如下所示, 将它代替预出清模型中的系统频率安全约束如式(52)~(54)所示。

$$H_{\text{sys},t} \geq H_{\text{dem},t} \quad (52)$$

$$P_t^{\text{EFR}} \geq P_{\text{dem},\text{EFR},t}; \lambda_{\text{EFR},t} \quad (53)$$

$$P_t^{\text{PFR}} \geq P_{\text{dem},\text{PFR},t}; \lambda_{\text{PFR},t} \quad (54)$$

式中 $\lambda_{\text{EFR},t}$ 和 $\lambda_{\text{PFR},t}$ 为拉格朗日乘子。为简化正式出清模型且使各类辅助服务出清更为清晰透明, 本文将频率安全约束转化为各类辅助服务资源需求约束。

其他约束同式(7)~(9)和(16)~(47)。值得注意的是, SCED 模型中的 $u_{i,t}$ 、 $\eta_{\text{ess},i,t}^{\text{dch}}$ 、 $\eta_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}$ 和 $\eta_{\text{fsl},i,t}$ 等 0-1 决策变量均为 SCUC 模型的求解结果, 为常量。

3) 出清价格求解

基于拉格朗日乘子不难求得电能、一次调频和 EFR 辅助服务的影子价格为:

$$\begin{cases} \rho_{\text{power},t} = \lambda_{0,t} \\ \rho_t^{\text{EFR}} = \lambda_{\text{EFR},t} \\ \rho_t^{\text{PFR}} = \lambda_{\text{PFR},t} \end{cases} \quad (55)$$

式中: $\rho_{\text{power},t}$ 为 t 时段电能价格; ρ_t^{EFR} 和 ρ_t^{PFR} 分别为 t 时段构网型多元资源一次调频资源和常规机组一次调频资源价格。

惯量服务的出清价格按惯量的边际发电单元的价格结算。值得注意的是, 从大电网安全运行角度出发, 本文各资源提供惯量非连续且除火电外的多元资源提供惯量购得后次日全时段提供, 因此

SCED模型惯量需求约束的拉格朗日乘子无法正确反应惯量的价格,本文采取惯量的边际发电单元的价格结算惯量。

3 算例分析

本文基于MATLAB软件调用CPLEX求解器对所提模型进行计算求解,分析比对各个场景下的求解结果,以验证模型的有效性。

3.1 算例系统及数据

本文采用改进后的IEEE 39节点仿真系统,包含10台火电机组、4台储能、2台风电和2台光伏,新能源占比22.4%。其中,火电机组分为位于节点30—39;储能分别位于节点2、6、16、22;风电分别位于节点3、4;光伏分别位于节点14、18。分别取节点7、20、28和39负荷的5%为FSL。 $\Omega_{w,i}$ 均取时段06:00—19:00, $\Omega_{w,i}$ 与 $\Omega_{fsl,i}$ 均取全时段。取各时段机组总出力的10%为有功功率缺额,系统额定频率取50 Hz,最大频率变化率取1 Hz/s^[19],最大频率偏差取1 Hz。常规机组一次调频响应延时 $t_{del,PFR} = 2$ s、EFR的响应延时 $t_{del,EFR} = 0.3$ s、常规机组参与一次调频服务的交付时间 $T_{PFR} = 10$ s、EFR一次调频服务的交付时间 $T_{EFR} = 2$ s^[14]。

为分析不同场景对出清结果的影响,本文设置以下场景进行对比分析。

场景1:基于本文各类多元资源参数及报价,求解得到各类服务的出清价格。

场景2:分别在场景1的基础上降低储能容量和充、放电功率为原来的50%以及增加储能容量和充、放电功率为原来的150%。

场景3:在场景1的基础上分别令系统各时段有功功率缺额为总出力的6%以及系统各时段有功功率缺额为总出力的10%。

3.2 场景求解结果与分析

场景1各时段惯量、一次调频容量构成如图2所示,电能、常规机组一次调频容量、EFR一次调频容量和惯量各时段出清价格如图3所示。

3.3 储能资源对出清结果影响分析

场景2储能容量和充、放电功率为原来的50%与150%,求解各时段常规机组一次调频价格与

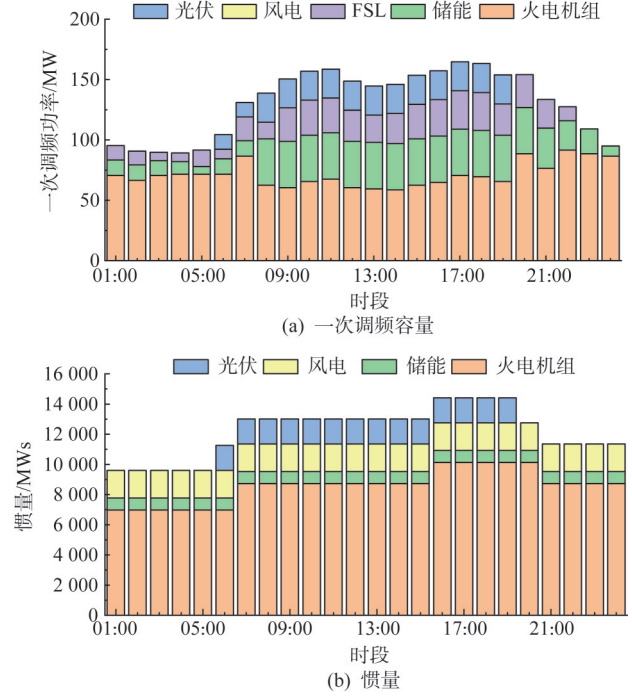


图2 场景1各时段一次调频容量、惯量构成图

Fig. 2 Structure diagram of PFR reserved capacity and the inertia of scenario 1 for each time period

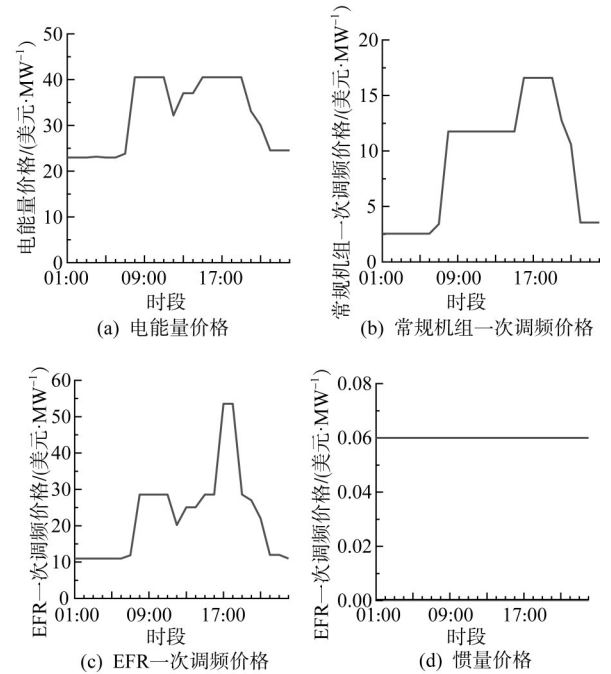


图3 场景1各类资源出清价格

Fig. 3 Clearing prices for various resources of scenario 1

EFR一次调频价格如图4所示。其中,储能容量和充、放电功率为原来的50%场景下惯量出清价格为0.07美元/MWs;储能容量和充、放电功率为原

来的 150 % 场景下 06:00—19:00 时段为 0.06 美元/MWs, 其余时段为 0.05 美元/MWs。场景 1 与场景 2 的结算费用如表 1 所示。

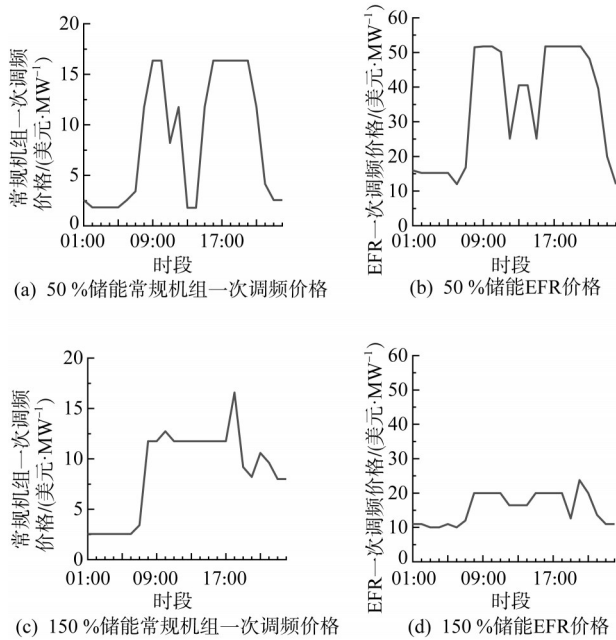


图 4 场景 2 各类资源出清价格

Fig. 4 Clearing prices for various resources of scenario 2

比较场景 1 与场景 2 的常规机组一次调频价格与 EFR 一次调频价格可以发现, 当系统储能容量与调频功率充足时, 一次调频资源的出清价格波动相对较低, 一次调频资源稀缺时刻与充裕时刻出清价格相差幅度较小, 此外, 各时段各类调频资源出清价格也相对较低。一方面, 储能更多的容量和充、放电功率带来了更多的 EFR 一次调频资源, 系统整体调频资源稀缺性降低, 影子价格由此降低; 另一方面, 储能能提供调峰、一次调频和惯量辅助服务之间具有一定灵活性, 在某类资源稀缺的时刻提供更多该类资源, 充裕时则提供另两类资源, 进而减小了一次调频资源出清价格波动。此外, 储能较高的容量和充、放电功率也意味着当储能惯性时间常数不变时, 可以提供更多的虚拟惯量, 因此, 场景 2 充足储能的惯量出清价格较低。

3.4 有功缺额需求对出清结果影响分析

场景 3 在场景 1 的基础上降低系统各时段有功缺额为总出力的 8 % 以及增加系统各时段有功功率缺额为总出力的 12 %, 求解各时段常规机组一次调频价格与 EFR 一次调频价格如图 5 所示。其中,

表 1 场景 1、场景 2 结算费用比较

出清场景	电能量费用	常规机组一次调频费用	EFR 一次调频费用	惯量费用	总费用
场景 1	102.76	1.458 4	3.976 3	1.753 2	1.09.86
场景 2 50 % 储能	102.81	1.678 8	5.434 2	2.181 2	112.10
场景 2 150 % 储能	102.22	1.328 8	2.739 5	1.572 1	107.87

有功功率缺额为总出力的 8 % 场景下, 06:00—19:00 时刻惯量出清价格为 0.06 美元/MWs, 其余时段为 0.02 美元/MWs; 有功功率缺额为总出力的 12 % 场景下, 惯量出清价格为 0.07 美元/MWs。场景 3 结算费用见表 2。

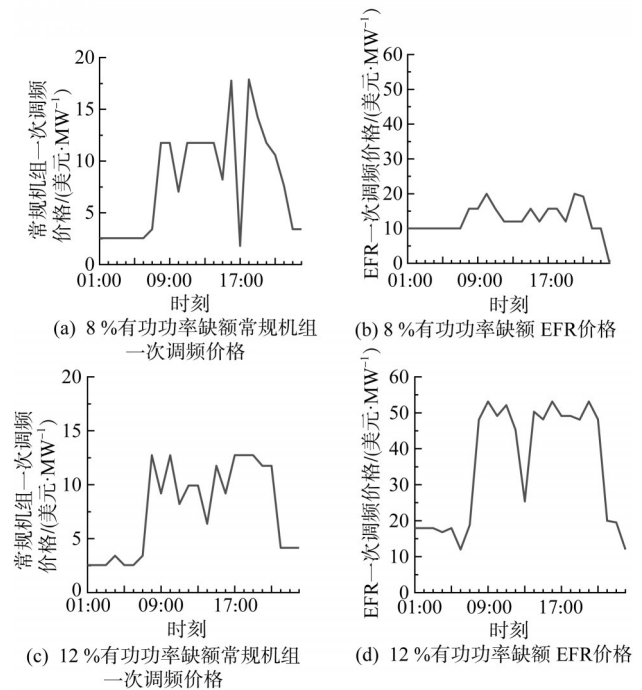


图 5 场景 3 常规机组一次调频与 EFR 出清价格

Fig. 5 Clearing prices for conventional unit frequency modulation and EFR of scenario 3

场景 3 系统抗有功功率缺额容量占总出力 8 % 时, 系统一次调频容量与惯量资源充裕, 各时段均可较好满足频率安全辅助服务需求, 因此结算价格低且波动较小; 当系统抗有功功率缺额容量提升至 12 % 时, 系统 08:00—12:00、14:00—21:00 时段的一次调频资源较为稀缺, 这些时刻结算价格较高。

表2 场景3结算费用比较

Tab. 2 Comparison of settlement costs of scenario 3

出清场景	电能量 费用	常规机组一 次调频费用	EFR一次 调频费用	万美元	
				惯量费用	总费用
场景3 8%有功功率 缺额	103.40	1.2709	1.5281	1.1348	1.07.33
场景3 12%有功功率 缺额	101.55	1.5864	7.7600	2.3730	1.13.27

系统不同程度抗有功功率扰动的安全性需求直接决定了系统对于调频辅助服务容量的需求。比较场景1与场景3可以发现,在系统可提供一次调频容量和惯量总量有限的情况下频率支撑辅助服务的需求提高,对应的结算费用也将变高。

4 结语

本文提出了多元资源电能量和惯量/一次调频辅助服务联合出清机制,建立了包含储能、风电、光伏和频率支撑型负荷的两阶段联合出清优化模型。在考虑频率安全约束的SCUC预出清阶段中求解出系统所需各类辅助服务资源容量和各资源启停情况;在SCED正式出清阶段中考虑简单的惯量和一次调频辅助服务容量需求约束,使得市场对于频率支撑性资源采购、出清更为清晰透明。

参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):171-191.
- [2] 刘中建,周明,李昭辉,等.高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J].电力自动化设备,2021,41(12):1-11.
LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaoxue, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 45(9):171-191.
- [3] DU Pengwei, MAGO NITIKA V, LI Weifeng, et al. New ancillary service market for ERCOT [J]. IEEE Access, 2020(8):178391-178401.
- [4] 何伊慧,管霖,王彤,等.南方电网新型电力系统规划建设的质量评估与分析[J].南方电网技术,2024,18(10):40-53.
HE Yihui, GUAN Lin, WANG Tong, et al. Quantitative evaluation and analysis of the planning and construction of the new power system in China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10):40-53.
- [5] 陈亦平,卓映君,刘映尚,等.高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J].电力系统自动化,2021,45(10):174-183.
CHEN Yiping, ZHUO Yingjun, LIU Yingshang, et al. Development and recommendation of fast frequency response market for power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10):174-183.
- [6] 步雨洛,吴俊勇,史法顺,等.考虑新能源的暂态功角与电压稳定一体化评估[J].中国电力,2025,58(6):122-136.
BU Yuluo, WU Junyong, SHI Fashun, et al. Integrated assessment of transient angle stability and voltage stability considering renewable energy sources [J]. Electric Power, 2025, 58(6):122-136.
- [7] 刘俊磊,刘新苗,娄源媛,等.考虑源荷储不确定性的新型电力系统随机生产模拟方法[J].南方电网技术,2024,18(6):36-42.
LIU Junlei, LIU Xinmiao, LOU Yuanyuan, et al. Stochastic production simulation method for new power system considering uncertainty of source network load and storage [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6):36-42.
- [8] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017,37(2):349-360.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):349-360.
- [9] 徐耀,朱玲,吕振宇,等.虚拟同步机孤岛并联系统暂态同步稳定性分析[J].电力系统保护与控制,2023,51(15):1-11.
XU Yao, ZHU Ling, LÜ Zhenyu, et al. Transient synchronization stability analysis of a virtual synchronous machine isolated island parallel system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15):1-11.
- [10] 曹炜,钦焕乘,陆建忠,等.新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J].电力系统自动化,2023,47(4):190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4):190-207.
- [11] 国家电网有限公司.虚拟同步发电机技术导则:Q/GDW 11824—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.虚拟同步机第1部分:总则:GB/T 38983.1—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [13] 国家能源局.电力辅助服务管理办法[EB/OL].(2021-12-21)[2025-01-21].http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c1310391161.htm.
- [14] 山西能源监管办公室.山西电力一次调频市场交易实施细则(试行)[EB/OL].(2022-5-8)[2025-01-17].https://sx.nea.gov.cn/dtyw/jggg/202309/t20230913_60810.html.
- [15] PATURET M, MARKOVIC U, DELIKARAOGLOU S, et al. Economic valuation and pricing of inertia in inverter-dominated power systems [J/OL]. 2020.https://www.researchgate.net/publication/341615258.

- [16] 王霞. 含储能的能量与一次调频服务市场联合优化出清研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [17] PADMANABHAN N, BHATTACHARYA K, AHMED M. Procurement of energy, primary regulation, and secondary regulation reserves in battery energy storage systems integrated real-time electricity markets[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4): 6602 – 6613.
- [18] 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): 114334.
- [19] 朱兰, 董凯旋, 唐陇军, 等. 计及同步机惯性与储能虚拟惯性价值的电能、惯性及一次调频联合优化出清模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7543 – 7555.
- ZHU Lan, DONG Kaixuan, TANG Longjun, et al. Joint optimal clearing model for electric energy, inertia and primary frequency response considering synchronous inertia and energy storage virtual inertia values [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7543 – 7555.
- [20] LI Kexin, GUO Hongye, FANG Xichen, et al. Market mechanism design of inertia and primary frequency response with consideration of energy market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 38(6): 5701 – 5713.
- [21] 曹鑫. 电网电压不平衡条件下的负荷虚拟同步机控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [22] 赵晋泉, 邵媛媛, 周竞, 等. 可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估方法[J/OL]. 南方电网技术, 1 – 13 [2025 – 01 – 17]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20240223009>.
- ZHAO Jinquan, SHAO Yuanyuan, ZHOU Jing, et al. Multiple dimension evaluation method for adjustable load participation in spot market [J/OL]. Southern Power System Technology, 1 – 13 [2025 – 01 – 17]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20240223009>.
- [23] 李秉宇, 杜旭浩, 曾四鸣, 等. 电动汽车负荷虚拟同步机参与电网频率调节的充放电策略与实现[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(6): 11 – 21.
- LI Binyu, DU Xuhao, ZENG Siming, et al. Charge and discharge strategy based on load-side virtual synchronous machine for electric vehicles participating in grid frequency regulation and its realization [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(6): 11 – 21.
- [24] 蔡新雷, 董锴, 崔艳林, 等. 基于马尔科夫链理论的电动汽车集群充电负荷建模及可调能力评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(9): 29 – 37.
- CAI Xinlei, DONG Kai, CUI Yanlin, et al. Charging load modeling and dispatchable capability evaluation of electric vehicle cluster based on Markov chain theory [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(9): 29 – 37.
- [25] 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.
- [26] LIANG Z, MIETH R, DVORKIN Y. Inertia pricing in stochastic electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2071 – 2084.
- [27] 国家能源局. 电化学储能电站并网运行与控制技术规范 第7部分惯量支撑与阻尼控制: DL/T 2246.7—2021[S]. 北京, 中国电力出版社, 2021.

收稿日期: 2025-01-17; 网络首发日期: 2025-04-30

作者简介:

代江(1985), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力市场分析与运行, 553097875@qq.com;

赵晋泉(1972), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电压、稳定与控制、电力系统优化运行、电力市场, zhaojinquan@shiep.edu.cn;

陈涛(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化调度, 452253381@qq.com。

广 告

南网储能启鸣数智能源科技公司 A1(扉页)
 广东电网有限责任公司佛山供电局 A2– A3
 中国能源建设集团广东火电 有限公司 A4– A5
 佛山电力设计院有限公司 A6– A7
 天生桥二级水力发电有限公司 A8(彩页)

广州麦科凌电力装备有限公司 A9(彩页)
 南方电网电力科技股份有限公司 A10(彩页)
 中电普瑞电力 有限公司 A11(彩页)
 正泰电气股份有限公司 A12(彩页)