

智慧楼宇型虚拟电厂辅助电网调频的优化方法

范宏, 罗昊, 陈舒阳, 徐涛, 徐勇杰

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对高比例新能源接入电力系统所引发的系统调频资源不足等问题, 提出了一种基于虚拟电厂(virtual power plant, VPP)技术, 聚合楼宇内灵活性资源, 联合参与多能市场与调频辅助服务市场的两阶段优化方法。首先, 构建了以智慧楼宇为单元的气电虚拟电厂模型。其次, 考虑到楼宇内电储能和电动汽车作为优质的调频资源, 设计了VPP辅助电网调频的日前-实时两阶段优化策略。在日前阶段, 依据风光等预测信息, 以VPP运行总成本最小化为目标函数, 运用混合整数线性规划方法, 获取日前全局最优调度方案; 在实时阶段, 根据调频信号等实测数据, 采用模型预测控制结合混合整数二次规划进行滚动优化, 以减小预测误差。最后在不同场景下对所提方法进行仿真验证, 结果表明, VPP利用电储能和电动汽车辅助电网调频能够充分挖掘其灵活性潜力, 实现资源在能量和调频市场上的最优配置, 显著提升VPP的整体运行效益。

关键词: 虚拟电厂; 智慧楼宇; 优化运行; 调频; 辅助服务

Optimization Method for Auxiliary Power Grid Frequency Regulation of Smart Building-Type Virtual Power Plant

FAN Hong, LUO Hao, CHEN Shuyang, XU Tao, XU Yongjie

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To address the issue of insufficient frequency regulation resources in power systems caused by high penetration of renewable energy, a two-stage optimization method is proposed based on virtual power plant (VPP) technology. This method aggregates flexible resources within buildings to jointly participate in multi-energy markets and frequency regulation ancillary service markets. Firstly, a gas-electric VPP model is constructed with smart buildings as units. Secondly, considering the high-quality frequency regulation potential of electric energy storage and electric vehicles within buildings, a day-ahead and real-time two-stage optimization strategy is designed for VPP-assisted grid frequency regulation. In the day-ahead stage, based on forecasts such as wind and solar generation, the mixed-integer linear programming method is applied to obtain the global optimal day-ahead scheduling scheme, aiming to minimize the total operating cost of the VPP. In the real-time stage, model predictive control combined with mixed-integer quadratic programming is used for rolling optimization based on real-time measurements such as frequency regulation signals, reducing prediction errors. Finally, simulation results under different scenarios demonstrate that the proposed method enables the VPP to fully exploit the flexibility potential of electric energy storage and electric vehicles for grid frequency regulation, achieving optimal resource allocation in both energy and frequency regulation markets while significantly improving the overall operational efficiency of the VPP.

Key words: virtual power plant; smart buildings; optimizing operation; frequency regulation; ancillary service

0 引言

随着能源需求的不断增长以及国内双碳目标的

明确提出, 电力系统中新能源的渗透率持续提升, 逐渐取代了传统的发电机组, 电力系统整体呈现出低惯性的特征。现有的资源已难以满足日益增长的调频需求^[1-3]。调频技术涵盖一次调频和二次调频, 其中二次调频主要依靠常规火电机组提供的自动发电控制(automatic generation control, AGC)辅助服务, 但这种方式存在调节速度慢、调节精度差等显

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFA1004600)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFA1004600).

著缺陷^[4]。在此背景下,迫切需要研究如何有效利用需求侧的柔性资源参与电力系统调频,以解决系统灵活性不足的问题^[5]。

储能因其双向充放电和快速响应的特性在电力系统中得到广泛应用。随着储能技术的进步和电池成本的降低,其在电力市场中的辅助服务功能也得以进一步拓展。文献[6-7]提出了一种基于工程应用的飞轮储能与火电机组协同调频的控制方法,该方法能有效提升调频的关键电能质量指标。文献[8]指出由电储能和氢储能构成的复合储能系统可同时参与电能量市场和辅助服务市场,相较于仅参与电能量市场,其收益更为可观。

此外,能够参与调频辅助服务的资源还包括电动汽车(electric vehicle, EV)^[9-10],作为一种绿色环保的出行工具, EV在电力系统终端可作为灵活负荷,且借助车网互动技术(vehicle to grid, V2G),其具备了储能的特性。文献[11]探讨了利用入网电动汽车的可调度容量参与电网调频辅助服务的可行性。同时,文献[12]还提出了EV参与二次调频的具体方案,并设计了调频过程中EV电池荷电状态(state of charge, SOC)的管理规则。

以储能和电动汽车为代表的灵活性资源参与电网辅助服务已成为研究热点。然而,这类资源地理位置靠近用户端,具有较强的分布式特征,且个体容量通常较小,无法直接并入电网参与调度。通过虚拟电厂(virtual power plant, VPP)技术整合不同区域内的多样化资源,实现统一的数据管理和指令控制^[13],既能与传统发电单元协同,也能以独立单元形式参与电力市场辅助服务,从而提升电力系统的安全性,有效解决上述问题。

目前, VPP的研究主要集中在内部资源优化调度^[14-16]和参与电力市场^[17-19]等方面。随着能源互联网与需求响应技术在电力系统中的广泛应用,采用新的优化方法,综合考虑多能源耦合与能源市场交易,能够有效解决虚拟电厂中电、热、气等多种能源的优化运行和市场交易问题^[20]。

智慧楼宇是一种能够通过自动化流程控制内部能量转换设备、储能设备以及可控负载的建筑^[21]。它通过能源管理系统对各类信息资源进行采集、传输和分析实现自身资源的调控和优化。智慧楼宇内部包含大量分布式能源,作为重要的需求侧资源,大量接入配电网^[22-23]有利于消纳新能源并降低自身

经济成本。

目前,已有较多文献研究智慧楼宇的优化调度与参与辅助服务问题。文献[24]建立了综合能源楼宇模型,通过多能互补降低了楼宇的运行成本,并在孤岛模式下利用电动汽车为楼宇提供辅助服务,但未考虑EV与其他资源的灵活配合。文献[25]构建了包含EV和温控负荷的低碳楼宇框架,通过空调节能和光伏等措施显著降低碳排放,但缺乏EV与楼宇其他能源设备的联合调度。文献[26]提出了基于多智能体深度强化学习的多智慧楼宇实时调度方法,相较于传统算法,该方法能提高一定的经济性。除了考虑运行成本,文献[27]构建了电氢互补的智慧楼宇系统,并加入了频率稳定约束,在优化调度的同时确保系统安全运行,但目前楼宇大规模制氢设备的技术尚不成熟。文献[28]提出了一种基于多智能体马尔可夫决策过程的方法,用以协调多个智能建筑在多阶段不确定性下的能源管理,以实现全局最优的能源消费控制。文献[29]提出了一种针对智能建筑与电动汽车集成的最优能源管理方案,利用电动汽车的能源缓冲能力,在联合能源和备用辅助服务市场中实现智能建筑集群的高效能源调度和风险管理,但未充分考虑楼宇用能需求,仅参与单一能源市场。文献[30]提出了智能楼宇型VPP参与系统调频辅助服务的控制策略,但该楼宇规模较小,模型过于简单,且调度时间受限。

综上所述,当前对智慧楼宇的研究仍存在若干问题。一方面,智慧楼宇的建模过于简化,未能实现多能市场与辅助服务市场的协同优化;另一方面,未能充分挖掘智慧楼宇内部灵活性资源的调频潜力。储能和EV凭借其出色的功率实时响应能力,为补充发电侧频率响应提供了可能。因此,本文提出了一种基于智慧楼宇型虚拟电厂辅助电网调频的方法,具体贡献如下。

1)将电储能和EV集群作为灵活性资源,通过协同配合充分发掘其调频潜力。

2)构建以智慧楼宇为单元的气电耦合虚拟电厂,实现多能市场与调频辅助服务市场的协同优化,从而提升辅助电网调频的响应能力和经济效益。

3)采用两阶段优化方法,第一阶段制定初步的整体计划,第二阶段对第一阶段的结果进行修正,以减小不确定因素带来的偏差。

1 VPP模型建立

1.1 VPP主体框架

本文构建了如图1所示的智慧楼宇作为模块化单元的气电耦合VPP。楼宇外部安装了风机,所产电能可供楼宇共享。在楼宇地下二层的能源中心配备了燃气锅炉、电锅炉等能源耦合设备,灵活地向用户供应电、热等多样化能源。同时,考虑到地下一层停车场的电动汽车,在闲置状态下,可利用其柔性负荷与储能特性为楼宇提供辅助服务,从而增强系统协调运行的灵活性。所有楼宇通过天然气管道经气泵接入配气网,并与楼宇外的风机通过该区域的公共连接点(point of common coupling, PCC)连接至配电网。设立VPP管理中心,对楼宇和风机进行统一调控,每栋楼宇和风机均配备独立的测量装置和控制器,通过通信网络与VPP管理中心进行信息交互。VPP管理中心负责监测和收集楼宇内各设备的运行信息,并与上级配电、配气网进行能量及辅助服务市场的交易。

1.2 楼宇内部模型

1.2.1 能源转换设备

能源转换设备能够实现多能耦合,强化电、热、气等不同能源之间的联系。楼宇内的能源转换设备主要包括燃气轮机(gas turbine, GT)、燃气锅炉(gas boiler, GB)和电锅炉(electric boiler, EB)。其中,天然气通过GT实现气转电的过程,并在此过程中产生热量;同时,天然气输入GB也可产生热量。EB则通过电磁感应的热效应将电能转化为

热能,从而减少化石燃料的燃烧,并提升楼宇对可再生能源的消纳能力。本文基于能源集线器理论对能源转换设备的输入输出进行建模,具体如式(1)所示。

$$\begin{pmatrix} p_{n,t}^{GT_e} \\ p_{n,t}^{GT_h} \\ p_{n,t}^{GBh} \\ p_{n,t}^{EBh} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta^{GT_e} & 0 & 0 \\ \eta^{GT_h} & 0 & 0 \\ 0 & \eta^{GB} & 0 \\ 0 & 0 & \eta^{EB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{n,t}^{GT} \\ p_{n,t}^{GB} \\ p_{n,t}^{EB} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $p_{n,t}^{GT}$ 、 $p_{n,t}^{GB}$ 、 $p_{n,t}^{EB}$ 分别为GT、GB、EB的输入功率,其中 n 为楼宇编号, t 为时刻; $p_{n,t}^{GT_e}$ 、 $p_{n,t}^{GT_h}$ 、 $p_{n,t}^{GBh}$ 、 $p_{n,t}^{EBh}$ 分别为GT发电功率、GT、GB、EB产热功率; η^{GT_e} 、 η^{GT_h} 分别为GT的电、热转换效率系数; η^{GB} 、 η^{EB} 分别为GB、EB的能源转换效率系数。

1.2.2 储能模型

楼宇中设置的储能装置能够有效储存多余的能量并在需要时释放。储能装置的种类主要包括电储能(electric energy storage, EES)和热储能(thermal energy storage, TES)。其数学模型可通过储能容量与储能功率进行构建,具体模型表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} S_{n,t+1}^{EES} = S_{n,t}^{EES} + \eta^{EESc} p_{n,t}^{EESc} - p_{n,t}^{EESd} / \eta^{EESd} \\ S_{n,t+1}^{TES} = S_{n,t}^{TES} + \eta^{TESc} p_{n,t}^{TESc} - p_{n,t}^{TESd} / \eta^{TESd} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_{n,t}^{EES}$ 、 $S_{n,t+1}^{EES}$ 和 $S_{n,t}^{TES}$ 、 $S_{n,t+1}^{TES}$ 分别为楼宇 n 内EES、TES在 t 、 $t+1$ 时刻的电、热量; $p_{n,t}^{EESc}$ 、 $p_{n,t}^{EESd}$ 和 $p_{n,t}^{TESc}$ 、 $p_{n,t}^{TESd}$ 分别为 t 时刻EES、TES的充放电、热功率; η^{EESc} 、 η^{EESd} 和 η^{TESc} 、 η^{TESd} 分别为EES、TES的充放电、热效率。

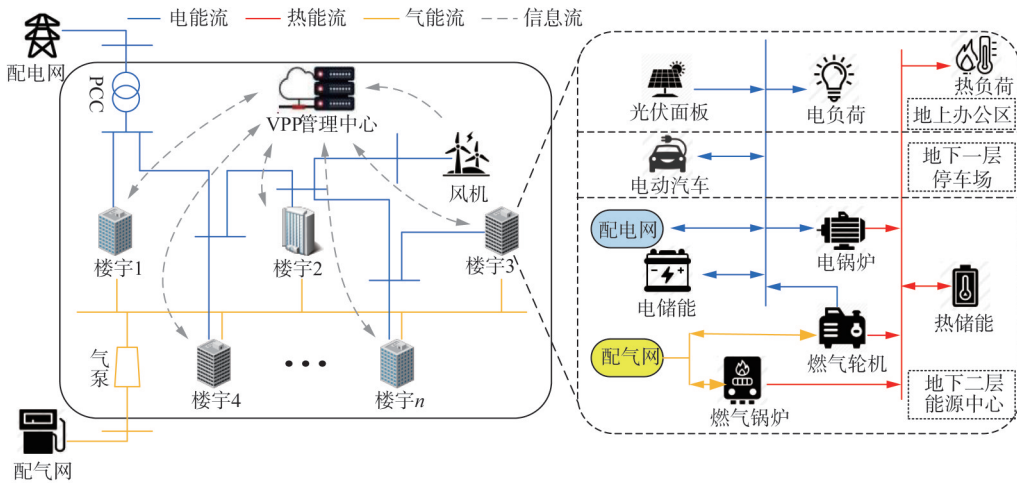


图1 虚拟电厂及楼宇内部结构

Fig. 1 Structure of the virtual power plant and the interior of the building

1.2.3 电动汽车

EV 车主根据自身出行计划, 设定次日 EV 的出行时间和各段行程的里程, 并将相关信息与 VPP 管理中心共享。当 EV 并网后, VPP 会制定相应的充放电策略, 确保 EV 拥有充足的电量, 满足下一次行驶的需求。同时, VPP 需确保 EV 车主通过参与聚合能够获得足够的收益, 以弥补因 VPP 管理中心调度所造成的损失, 从而促进 VPP 与 EV 用户之间的双边合作。

电动汽车个体数学模型涵盖以下关键变量: 并网时刻 T_i^{in} 、离网时刻 T_i^{out} 、并网容量 $S_{i,\text{in}}^{\text{EV}}$ 、离网容量 $S_{i,\text{out}}^{\text{EV}}$ 、各时刻的最大容量 $S_{i,t,\text{max}}^{\text{EV}}$ 、最小容量 $S_{i,t,\text{min}}^{\text{EV}}$ 、最大充放电功率 $P_{i,\text{max}}^{\text{EVc}}$ 、 $P_{i,\text{max}}^{\text{EVd}}$, 并以集合 Ω 形式表现如下。

$$\Omega = \{T_i^{\text{in}}, T_i^{\text{out}}, S_{i,\text{in}}^{\text{EV}}, S_{i,\text{out}}^{\text{EV}}, S_{i,t,\text{max}}^{\text{EV}}, S_{i,t,\text{min}}^{\text{EV}}, P_{i,\text{max}}^{\text{EVc}}, P_{i,\text{max}}^{\text{EVd}}\} \quad (3)$$

式中 i 为 EV 编号。

设定楼宇中 EV 的并/离网时刻 $f_s(t)$ 服从正态分布。

$$f_s(t_1) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}}, & (\mu_s - 12) \leq x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_s+24)^2}{2\sigma_s^2}}, & 0 \leq x \leq (\mu_s - 12) \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_1 为 EV 并/离网时刻; μ_s 、 δ_s 分别为 t 的期望值与标准差。

本文以 EV 每日行驶结束时的容量来表示其并网容量。EV 并网时刻的容量与其日行驶里程密切相关, 具体关系如式(5)所示。

$$S_{i,\text{in}}^{\text{EV}} = (1 - \frac{x}{x_m}) S_{i,\text{max}}^{\text{EV}} \quad (5)$$

式中 x 、 x_m 、 $S_{i,\text{max}}^{\text{EV}}$ 分别为 EV 的日行驶里程、最大行驶里程和最大容量。EV 的日行驶里程满足服从对数正态分布, 其概率密度函数 $f(x)$ 为:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中 μ 、 σ 分别为对数正态分布期望值和标准差。

则单个 EV 的功率和容量可调度域 $\Omega_{\text{EV},i}$ 表示为:

$$\begin{cases} \Omega_{\text{EV},i} = \{P_{i,\text{max}}^{\text{EVc}}, P_{i,\text{max}}^{\text{EVd}}, S_{i,t,\text{max}}^{\text{EV}}, S_{i,t,\text{min}}^{\text{EV}}\}, \forall t \in [T_i^{\text{in}}, T_i^{\text{out}}] \\ S_{i,t,\text{max}}^{\text{EV}} = \min\{S_{i,\text{in}}^{\text{EV}} + P_{i,\text{max}}^{\text{EVc}}(t - T_i^{\text{in}}) \cdot \eta^{\text{EVc}}, S_{i,\text{max}}^{\text{EV}}, S_{i,\text{out}}^{\text{EV}}\} \\ S_{i,t,\text{min}}^{\text{EV}} = \max\{S_{i,\text{in}}^{\text{EV}} - P_{i,\text{max}}^{\text{EVd}}(t - T_i^{\text{in}})/\eta^{\text{EVd}}, S_{i,\text{min}}^{\text{EV}}, S_{i,\text{out}}^{\text{EV}}\} \end{cases} \quad (7)$$

式中 η^{EVc} 、 η^{EVd} 分别为 EV 充、放电效率。

本文采用闵可夫斯基求和来表示各楼宇 EV 集群的可调度域, 如图 2 所示, 通过此方法将同一调度时刻的 EV 调度域映射得到 EV 集群的可调度域。

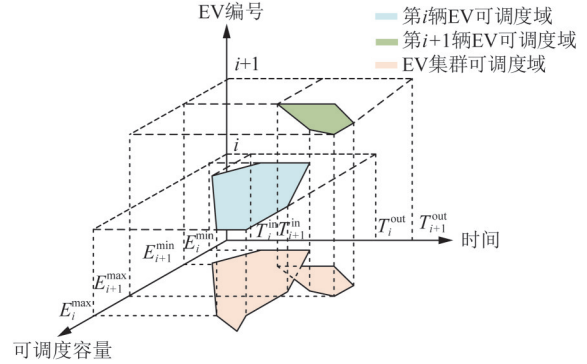


图 2 EV 集群可调度容量映射图

Fig. 2 Mapping diagram of EV cluster dispatchable capacities

每辆 EV 的并网和离网时段不同, 这将导致调度时段不一致。为此, 引入布尔变量 $s_{i,t}$ 来表示第 i 辆 EV 在时刻 t 的并离网状态。通过将所有个体 EV 的可调度时段扩展至同一调度时段, 可以确保在同一时刻对所有 EV 进行统一调度。

$$s_{i,t} = \begin{cases} 1, \forall t \in [T_i^{\text{in}}, T_i^{\text{out}}] \\ 0, \forall t \notin [T_i^{\text{in}}, T_i^{\text{out}}] \end{cases} \quad (8)$$

式中 $s_{i,t}$ 为第 i 辆 EV 的并/离网状态, 取 1 时表示并网, 取 0 时表示离网。

VPP 通过补贴机制激励 EV 参与统一调控, 依据设定的激励价格, 将用户的响应情况划分为 3 个阶段: 沉默区、响应区和饱和区。在沉默区, 由于激励价格较低, 用户缺乏参与调度的意愿; 进入响应区, 随着激励价格的提升, 用户参与度呈现线性增长; 而在饱和区, 尽管部分用户因紧急需求仍不愿参与调度, 当激励价格达到某一阈值后, 无论价格如何继续增加, EV 的响应数量将保持不变。用户响应度 α 与激励价格 ρ 的具体关系可由式(9)描述。

$$\alpha = \begin{cases} 0, \rho < a \\ \beta(\rho - a), a \leq \rho \leq b \\ \alpha_{\text{max}}, \rho > b \end{cases} \quad (9)$$

式中: β 为用户响应程度; α_{max} 为用户响应最大值; a 、 b 分别为激励价格最小、最大值。

设楼宇内存在的 EV 数量为 n_{EV} , 则 VPP 可调度的 EV 数量 N_{EV} 为:

$$N_{\text{EV}} = \alpha n_{\text{EV}} \quad (10)$$

某时刻个体EV的并/离网瞬间会导致EV集群可调度容量的突变,需引入变量 ΔS_t^{EVA} 表示某时刻EV集群刻调度容量的阶跃变化。

$$\Delta S_t^{\text{EVA}} = \sum_{i \in N_{\text{EV}}} [s_{i,t}(s_{i,t} - s_{i,t-1})S_{i,\text{in}}^{\text{EV}} - s_{i,t-1}(s_{i,t} - s_{i,t-1})S_{i,\text{out}}^{\text{EV}}] \quad (11)$$

各楼宇EV集群的功率和容量可调度域表示为:

$$\Omega_{\text{EVA}} = \{P_t^{\text{EVAc}}, P_t^{\text{EVAd}}, P_{t,\text{max}}^{\text{EVAc}}, P_{t,\text{max}}^{\text{EVAd}}, S_t^{\text{EVA}}, \Delta S_t^{\text{EVA}}, S_{t,\text{min}}^{\text{EVA}}, S_{t,\text{max}}^{\text{EVA}}\} \quad (12)$$

式中: P_t^{EVAc} 、 P_t^{EVAd} 分别为EV集群在 t 时刻的充、放电功率; $P_{t,\text{max}}^{\text{EVAc}}$ 、 $P_{t,\text{max}}^{\text{EVAd}}$ 分别为EV集群在 t 时刻最大充、放电功率; S_t^{EVA} 、 $S_{t,\text{max}}^{\text{EVA}}$ 、 $S_{t,\text{min}}^{\text{EVA}}$ 分别为EV集群 t 时刻的可调度容量、最大、最小调度容量; ΔS_t^{EVA} 为EV集群容量的阶跃变化量。

EV集群在 t 时刻的功率和容量可调度域满足:

$$\begin{cases} P_t^{\text{EVAc}} = \sum_{i \in N_{\text{EV}}} P_{i,t}^{\text{EVc}}, P_{t,\text{max}}^{\text{EVAc}} = \sum_{i \in N_{\text{EV}}} s_{i,t} P_{i,\text{max}}^{\text{EVc}} \\ P_t^{\text{EVAd}} = \sum_{i \in N_{\text{EV}}} P_{i,t}^{\text{EVd}}, P_{t,\text{max}}^{\text{EVAd}} = \sum_{i \in N_{\text{EV}}} s_{i,t} P_{i,\text{max}}^{\text{EVd}} \\ 0 \leq P_t^{\text{EVAc}} \leq P_{t,\text{max}}^{\text{EVAc}}, 0 \leq P_t^{\text{EVAd}} \leq P_{t,\text{max}}^{\text{EVAd}} \\ S_{t,\text{max}}^{\text{EVA}} = \sum_{i \in N_{\text{EV}}} s_{i,t} S_{i,\text{max}}^{\text{EV}}, S_{t,\text{min}}^{\text{EVA}} = \sum_{i \in N_{\text{EV}}} s_{i,t} S_{i,\text{min}}^{\text{EV}} \\ S_t^{\text{EVA}} = \sum_{i \in N_{\text{EV}}} s_{i,t} S_t^{\text{EV}} \end{cases} \quad (13)$$

2 VPP参与电网辅助调频调控策略

2.1 VPP辅助电网调频机制

VPP参与电网调频辅助服务的过程如图3所示。区域电网调度中心首先发送AGC指令至VPP,随后VPP调控该区域楼宇内的调频资源以响应电网AGC指令。具体步骤如下。

首先,VPP从测控单元装置RTU中采集当前时刻的AGC指令值。接着,VPP管理中心通过通讯系统读取楼宇内EES和EV集群的运行状态,以确定各自的上下调频容量。

其次,各楼宇的EES和EV集群采用虚拟同步机控制(virtual synchronous generator, VSG)经变流器接入电网,模拟同步机转子运动。在频率变化瞬间,它们可为系统提供惯量支撑。当不参与调频时,EES和EV的功率参考值根据能量市场上的响应功率 $P_{\text{EESen},i}$ 、 $P_{\text{EVen},i}$ 和设定输出进行调整。参与调频时,VPP根据实时读取的AGC指令值以及EES和EV的上下调频容量,在调频功率分配控制器中进行功率最优分配,确定EES和EV各自应响应的

调频功率 $P_{\text{EESf},n}$ 、 $P_{\text{EVf},n}$,并得出EES和EV的VSG控制功率输出的实际参考值 $P_{\text{EESref},n}$ 、 $P_{\text{EVref},n}$ 。

最终,VPP将EES和EV集群响应的总调频功率 P_{VPPf} 输送至电网。

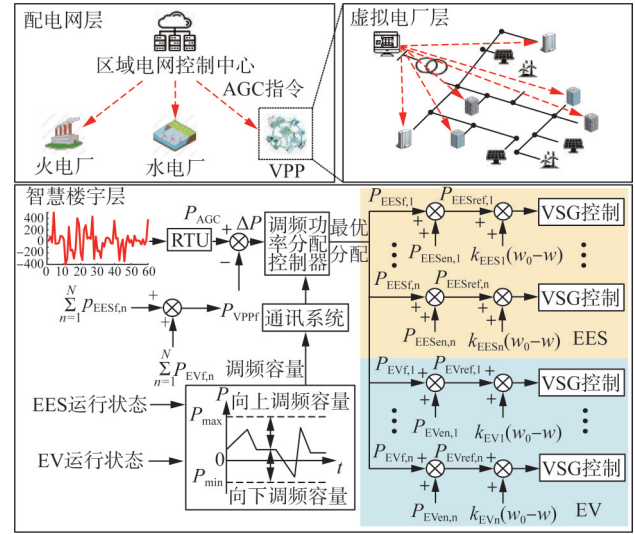


图3 VPP参与AGC调频辅助服务过程

Fig. 3 Process of the virtual power plant participating in the AGC frequency regulation control

2.2 VPP申报调频功率

调频信号是调度机构根据当前电力系统的区域控制误差计算所得,用来衡量系统调频需求的时间序列指令。VPP在提供调频服务时需要根据接收的调频信号 δ_t^f 分配自身优化和调频功率,其中 $\delta_t^f \in [-1, 1]$,当 $\delta_t^f = 0$ 时表示VPP无需参与调频服务,当 $\delta_t^f \in (0, 1]$ 时表示VPP提供向上调频服务,即可调频资源从电网少吸收电能或为电网提供电能,当 $\delta_t^f \in [-1, 0)$ 时表示VPP提供向下调频服务,即可调频资源从电网多吸收电能。为区分调频的方向性,将 δ_t^f 分为两个独立的向上、下调频信号 δ_t^{fu} 、 δ_t^{fd} ,以便VPP清楚在该时刻应提供哪种具体的调频服务,并获取该时刻相对应的调频容量以制定优化调度计划,并根据自身可调度容量和调频信号计算得到向电网输送的调频功率。

$$\begin{cases} \delta_t^{\text{fu}} = \delta_t^f, \delta_t^{\text{fu}} \in (0, 1] \\ \delta_t^{\text{fd}} = \delta_t^f, \delta_t^{\text{fd}} \in [-1, 0) \\ p_{n,t}^{\text{EESfu}} = p_{n,t}^{\text{EESuc}} \delta_t^{\text{fu}}, p_{n,t}^{\text{EESfd}} = -p_{n,t}^{\text{EESdc}} \delta_t^{\text{fd}} \\ p_{n,t}^{\text{EVfu}} = p_{n,t}^{\text{EVuc}} \delta_t^{\text{fu}}, p_{n,t}^{\text{EVfd}} = -p_{n,t}^{\text{EVdc}} \delta_t^{\text{fd}} \\ p_t^{\text{VPPf}} = \sum_{n=1}^N (p_{n,t}^{\text{EESfu}} + p_{n,t}^{\text{EVfu}} + p_{n,t}^{\text{EESfd}} + p_{n,t}^{\text{EVfd}}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: p_t^{EESfu} 、 p_t^{EESfd} 和 p_t^{EVfu} 、 p_t^{EVfd} 分别为 t 时刻楼宇 n 内的 EES 和 EV 申报的向上、下调频功率; $p_{n,t}^{\text{EESuc}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{EESdc}}$ 和 $p_{n,t}^{\text{EVuc}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{EVdc}}$ 分别为 t 时刻楼宇 n 内 EES 和 EV 集群的向上、下可调频容量; p_t^{VPPf} 为 t 时刻 VPP 申报的调频功率; N 为楼宇数量。

3 VPP 辅助电网调频两阶段优化方法

本文 VPP 辅助电网调频所采用的优化方法分为基于全局运行成本最优的日前调度和考虑预测偏差的实时调整两阶段。

3.1 日前阶段

3.1.1 目标函数

日前阶段, VPP 管理中心根据日前预测数据对各楼宇进行了合理调度, 减少了 VPP 整体运行费用, 同时 VPP 管理中心检测了各楼宇 EES 和 EV 集群的运行情况, 从而确定了各时刻剩余的可调频容量。目标函数为:

$$\min C_{\text{da}} = C_{\text{en}} + C_{\text{op}} + C_{\text{dr}} + C_{\text{EV}} + C_{\text{cb}} - C_{\text{fcq}} \quad (15)$$

式中: C_{da} 为 VPP 日前阶段的总运行成本; C_{en} 、 C_{op} 、 C_{dr} 、 C_{EV} 、 C_{cb} 、 C_{fcq} 分别为能源购售成本、设备运维成本、需求响应成本、EV 补贴成本、碳排放成本和调频收益。

1) 能源购售成本 C_{en} 包括 VPP 向电市场和天然气市场购买电能和天然气的费用, 并减去 VPP 向电市场出售电能的收益。

$$C_{\text{en}} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (\rho_{\text{eb}} p_{n,t}^{\text{eb}} - \rho_{\text{es}} p_{n,t}^{\text{es}} + \rho_{\text{gb}} p_{n,t}^{\text{gb}}) \quad (16)$$

式中: ρ_{eb} 、 ρ_{es} 、 ρ_{gb} 分别为购电、售电、购气价格; $p_{n,t}^{\text{eb}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{es}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{gb}}$ 分别为第 n 栋楼宇购电、售电、购气功率。

2) 设备运维成本 C_{op} 包括楼宇中 PV、GT、GB、EB、EES、TES 及楼外风机在运行中所产生的费用。

$$\begin{cases} C_{\text{op}} = \sum_{t=1}^T (\sum_{n=1}^N \delta_i p_{n,t}^i + \sum_{w=1}^W \delta_{\text{WT}} p_{w,t}^{\text{WT}}) \\ i \in \{G_{\text{GT}}, G_{\text{GB}}, E_{\text{EB}}, E_{\text{EES}}, T_{\text{TES}}\} \end{cases} \quad (17)$$

式中: δ_i 、 δ_{WT} 分别为楼宇内各设备和楼宇外风机的运维单价; $p_{n,t}^i$ 、 $p_{w,t}^{\text{WT}}$ 分别为第 n 栋楼宇各设备出力及楼外第 w 台风机出力; G_{GT} 、 G_{GB} 、 E_{EB} 、 E_{EES} 、 T_{TES} 分别为燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、电储能、热储能设备。

3) 需求响应成本 C_{dr} 主要包括对楼宇内部分电、热负荷进行转移的补偿费用。

$$C_{\text{dr}} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (c_e |p_{n,t}^{\text{el}} - p_{n,t}^{\text{tel}}| + c_h |p_{n,t}^{\text{hl}} - p_{n,t}^{\text{thl}}|) \quad (18)$$

式中: c_e 、 c_h 分别为电、热负荷转移的单位补偿成本; $p_{n,t}^{\text{el}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{hl}}$ 及 $p_{n,t}^{\text{tel}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{thl}}$ 分别为原电、热负荷及转移后的电、热负荷。

4) EV 补贴成本 C_{EV} 包括 EV 进行 V2G 和辅助调频服务的费用。

$$C_{\text{EV}} = \rho \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (p_{n,t}^{\text{EVAd}} - p_{n,t}^{\text{EVAc}} + p_{n,t}^{\text{EVfu}} + p_{n,t}^{\text{EVfd}}) \quad (19)$$

式中 $p_{n,t}^{\text{EVAc}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{EVAd}}$ 分别为楼宇 n 内 EV 集群的充、放电功率。

5) 碳排放成本 C_{cb} 。向电网购电及楼宇内能源设备运行伴随着碳排放, 机组碳排放强度的不同影响碳排放费用。

$$C_{\text{cb}} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (\mu_g p_{n,t}^{\text{eb}} + \mu_{\text{GT}} p_{n,t}^{\text{GT}} + \mu_{\text{GB}} p_{n,t}^{\text{GB}}) \quad (20)$$

式中 μ_g 、 μ_{GT} 、 μ_{GB} 分别为电网、楼宇内 GT 和 GB 的碳排放系数。

6) 调频收益包括调频容量收益、调频里程收益减去用于调频的 EES 和 EV 的损耗。其中, 调频容量收益是指为调频服务所预留的调节容量获得的收益, 调频里程收益是指根据调频指令上调或下调出力的绝对值之和所获得的收益。

$$C_{\text{fcq}} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N [(\rho_t^{\text{cap}} + k_t m \rho_t^{\text{mail}}) p_t^{\text{VPPf}} - \delta_{\text{EES}} p_{n,t}^{\text{EESf}} - \delta_{\text{EV}} p_{n,t}^{\text{EVf}}] \quad (21)$$

式中: k_t 为归一化后历史调频性能综合指标, 由精确性、相关性、延迟性 3 个部分构成, 具体计算方法参照文献[31]; ρ_t^{cap} 、 ρ_t^{mail} 分别为调频市场调频容量及里程补偿价格; m 为平均里程调用率。

3.1.2 约束条件

1) 外网能量交互约束

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{n=1}^N p_{n,t}^{\text{eb}} \leq \varepsilon_t^{\text{net}} p_{\text{max}}^{\text{eb}} \\ 0 \leq \sum_{n=1}^N p_{n,t}^{\text{es}} \leq \varepsilon_t^{\text{net}} p_{\text{max}}^{\text{es}} \\ 0 \leq \sum_{n=1}^N p_{n,t}^{\text{gb}} \leq p_{\text{max}}^{\text{gb}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\varepsilon_t^{\text{net}}$ 为电网功率交互标志, 当取 1 或 0 时, 分别表示 VPP 向电网购电或售电; $p_{\text{max}}^{\text{eb}}$ 、 $p_{\text{max}}^{\text{es}}$ 、 $p_{\text{max}}^{\text{gb}}$ 分

别为VPP购电、售电、购气最大功率。

2) 可再生能源约束

$$\begin{cases} p_{n,t}^{\text{PV}} = p_{n,t}^{\text{PVmax}} \\ 0 \leq p_{n,t}^{\text{WT}} \leq \sum_{w=1}^W p_{w,t}^{\text{WTmax}} \\ \sum_{n=1}^N p_{n,t}^{\text{WT}} = \sum_{w=1}^W p_{w,t}^{\text{WTmax}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $p_{n,t}^{\text{PVmax}}$ 、 $p_{w,t}^{\text{WTmax}}$ 分别为光伏、风机的最大出力;
 $p_{n,t}^{\text{WT}}$ 为风机共享给楼宇 n 的功率; W 为风机数量。

3) 楼宇设备约束

$$\begin{cases} 0 \leq p_{n,t}^i \leq p_{n,\max}^i \\ |p_{n,t}^i - p_{n,t-1}^i| \leq R_{n,\max}^i, i \in \{G_{\text{GT}}, G_{\text{GB}}, E_{\text{EB}}\} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $p_{n,t}^i$ 、 $p_{n,\max}^i$ 分别为各楼宇内设备 i 在 t 时刻的运行功率和最大功率; $R_{n,\max}^i$ 为设备 i 的最大爬坡率。

4) 调频申报容量约束

$$\begin{cases} 0 \leq p_{n,t}^{\text{EESc}} + p_{n,t}^{\text{EESuc}} \leq p_{n,\max}^{\text{EESc}} \\ 0 \leq p_{n,t}^{\text{EESd}} + p_{n,t}^{\text{EESdc}} \leq p_{n,\max}^{\text{EESd}} \\ 0 \leq p_{n,t}^{\text{EVAc}} + p_{n,t}^{\text{EVuc}} \leq p_{n,\max}^{\text{EVAc}} \\ 0 \leq p_{n,t}^{\text{EVAd}} + p_{n,t}^{\text{EVdc}} \leq p_{n,\max}^{\text{EVAd}} \end{cases} \quad (25)$$

5) 储能约束

储能约束包括功率和容量约束, 以EES为例, 有:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{n,t}^{\text{EESc}} \leq p_{n,\max}^{\text{EESc}}, 0 \leq p_{n,t}^{\text{EESd}} \leq p_{n,\max}^{\text{EESd}} \\ S_{n,\min}^{\text{EES}} \leq S_{n,t}^{\text{EES}} \leq S_{n,\max}^{\text{EES}}, S_{n,0}^{\text{EES}} = S_{n,T}^{\text{EES}} \\ S_{n,t}^{\text{EES}} = S_{n,t-1}^{\text{EES}} + (p_{n,t}^{\text{EESc}} + p_{n,t}^{\text{EESfu}}) \cdot \eta^{\text{EESc}} - (p_{n,t}^{\text{EESd}} + p_{n,t}^{\text{EESfd}}) / \eta^{\text{EESd}} \end{cases} \quad (26)$$

6) EV 集群约束

EV 集群约束包括功率、容量约束(式(13))和SOC约束。

$$\begin{cases} S_{\text{socn},\min}^{\text{EV}} \leq S_{\text{socn},t}^{\text{EV}} \leq S_{\text{socn},\max}^{\text{EV}} \\ S_{\text{socn},0}^{\text{EV}} = S_{\text{socn},T}^{\text{EV}} \\ S_{\text{socn},t}^{\text{EV}} = S_{\text{socn},t-1}^{\text{EV}} + [(p_{n,t}^{\text{EVAc}} + p_{n,t}^{\text{EVfu}}) \cdot \eta^{\text{EVc}} - (p_{n,t}^{\text{EVAd}} + p_{n,t}^{\text{EVfd}}) / \eta^{\text{EVd}}] / (S_{n,t}^{\text{EVA}} + \Delta S_{n,t}^{\text{EVA}}) \end{cases} \quad (27)$$

7) 功率平衡约束

$$\begin{cases} p_{n,t}^{\text{WT}} + p_{n,t}^{\text{PV}} + p_{n,t}^{\text{eb}} + p_{n,t}^{\text{GTc}} + p_{n,t}^{\text{EESd}} + p_{n,t}^{\text{EVAd}} \\ = p_{n,t}^{\text{tel}} + p_{n,t}^{\text{es}} + p_{n,t}^{\text{EB}} + p_{n,t}^{\text{EESc}} + p_{n,t}^{\text{EVAc}} \\ p_{n,t}^{\text{GTh}} + p_{n,t}^{\text{GBh}} + p_{n,t}^{\text{EBh}} + p_{n,t}^{\text{TESd}} = p_{n,t}^{\text{thl}} + p_{n,t}^{\text{TESc}} \\ p_{n,t}^{\text{gb}} = p_{n,t}^{\text{GT}} + p_{n,t}^{\text{GB}} \end{cases} \quad (28)$$

8) 需求响应约束

VPP管理中心可在固定范围内平移类负荷的供能时段, 转移后保证调整后的负荷总量不变, 同时负荷转移量满足上下限约束, 以电负荷为例, 有:

$$\begin{cases} |p_{n,t}^{\text{el}} - p_{n,t}^{\text{tel}}| \leq \Delta p_{n,\max}^{\text{tel}} \\ \sum_{t=1}^T p_{n,t}^{\text{el}} = \sum_{t=1}^T p_{n,t}^{\text{tel}} \end{cases} \quad (29)$$

式中 $\Delta p_{n,\max}^{\text{tel}}$ 为各时刻电负荷最大转移量。

3.2 实时阶段

3.2.1 目标函数

实时阶段的目标为消除日前预测误差造成的功率波动, 使实际运行情况尽可能追踪日前计划, 减小不确定性带来的经济损失, 同时VPP调度可调频资源响应配电网实时下发的AGC指令。以实时出力与日前计划和响应实际调频指令偏差最小为目标。

$$\min C_{\text{di}} = \lambda_1 C_{\text{ce}} + \lambda_2 C_{\text{oc}} + \omega_f C_{\text{fe}} \quad (30)$$

式中: C_{ce} 、 C_{oc} 、 C_{fe} 分别为VPP购能偏差、设备运行偏差与响应调频指令偏差; λ_1 、 λ_2 为偏差系数; ω_f 为调频惩罚系数。

1) 购能偏差包括向配电网购售电与向配气网购气偏差。

$$C_{\text{ce}} = \sum_{t=1}^T \left| \sum_{n=1}^N (p_{n,t}^{\text{cb, in}} - p_{n,t}^{\text{eb}} + p_{n,t}^{\text{cs, in}} - p_{n,t}^{\text{es}} + p_{n,t}^{\text{gb, in}} - p_{n,t}^{\text{gb}}) \right| \quad (31)$$

式中 $p_{n,t}^{\text{cb, in}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{cs, in}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{gb, in}}$ 分别为VPP实时购电、售电、购气功率。

2) 设备运行偏差包括楼宇内各设实时运行与日前计划偏差。

$$\begin{cases} C_{\text{oc}} = \sum_{t=1}^T \left| \sum_{n=1}^N (p_{n,t}^{\text{in}} - p_{n,t}^{\text{plan}}) \right| \\ i \in \{G_{\text{GT}}, G_{\text{GB}}, E_{\text{EB}}, E_{\text{EES}}, T_{\text{TES}}, E_{\text{EV}}\} \end{cases} \quad (32)$$

式中 $p_{n,t}^{\text{in}}$ 为设备 i 实时功率。

3) 响应调频指令偏差指可调频资源实际响应调频出力达不到电网调频需求时, 需向电网支付惩罚费用。

$$C_{\text{fe}} = \sum_{t=1}^T \left| \sum_{n=1}^N (p_{n,t}^{\text{EESfu}} + p_{n,t}^{\text{EVfu}} - r_t^{\text{fu}} + p_{n,t}^{\text{EESfd}} + p_{n,t}^{\text{EVfd}} - r_t^{\text{fd}}) \right| \quad (33)$$

式中 r_t^{fu} 、 r_t^{fd} 分别为向上、向下调频实际指令。

3.2.2 约束条件

1) 响应调频信号约束

EES、EV 在响应 AGC 指令时不得超过各自的调频容量, 同时追踪调频指令。

$$\begin{cases} 0 \leq p_{n,t}^{\text{EESfu}} \leq p_{n,t}^{\text{EESuc}}, 0 \leq p_{n,t}^{\text{EESfd}} \leq p_{n,t}^{\text{EESdc}} \\ 0 \leq p_{n,t}^{\text{EVfu}} \leq p_{n,t}^{\text{EVuc}}, 0 \leq p_{n,t}^{\text{EVfd}} \leq p_{n,t}^{\text{EVud}} \\ \sum_{n=1}^N (p_{n,t}^{\text{EESfu}} + p_{n,t}^{\text{EVfu}}) \leq r_t^{\text{fu}}, \sum_{n=1}^N (p_{n,t}^{\text{EESfd}} + p_{n,t}^{\text{EVfd}}) \leq r_t^{\text{fd}} \end{cases} \quad (34)$$

2) 其余约束与日前一一致, 参照式(13)、式(22)—(24)及式(26)—(28)。

3.3 求解流程

本文提出的虚拟电厂参与电网辅助调频两阶段优化方法求解流程如图4所示。

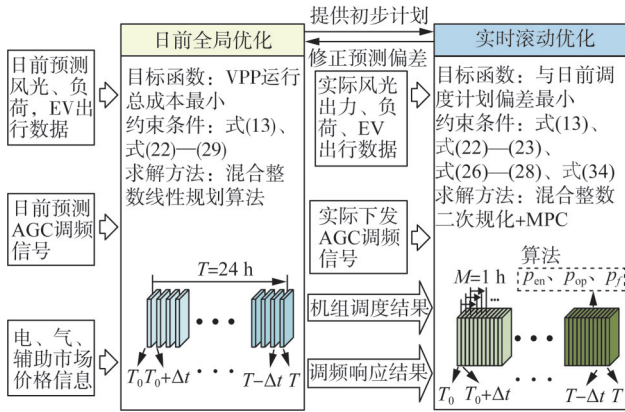


图4 两阶段优化方法求解流程

Fig. 4 Solution flow of two-stage optimization method

日前阶段, 调度周期为 24 h, 起止时间为当日 06:00 至次日 06:00, 调度时间尺度为 1 h。此阶段采用混合整数线性规划算法求解模型, 得到日前各机组调度结果及调频资源的功率分配, 为实时阶段提供初步的全局优化结果。

实时阶段, 调度周期为 1 h, 调度时间尺度为 15 min。VPP 管理中心基于实际风、光出力, AGC 调频信号等实测数据, 采用模型预测控制(model predictive control, MPC)算法进行实时滚动优化, 在日前调度提供的初步全局优化结果的基础上对各机组和调频功率进行修正, 减小预测误差带来的经济损失, 提高优化控制的精度。

本文选取的仿真平台为 MATLAB 2022a, 采用 MATLAB 环境下的 YALMIP 工具箱与 CPLEX 求解器求解模型。

4 算例分析

4.1 算例说明

为验证本文所提出的 VPP 辅助电网调频策略的

应用效果, 选取我国东部某地区的智慧园区示范工程进行仿真, 包括 6 栋楼宇和 3 台风机, 其中楼宇 1—4 为居民楼宇, 楼宇 5—6 为商业楼宇。以该智慧园区一年当中一天的调度数据为例, 风电机组出力以及各楼宇的光伏出力和电热负荷曲线如图 5—6 所示。电、天然气及辅助调频市场的价格信息如图 7 所示, 每栋楼宇设备的关键参数分别如表 1—2 所示。假设每栋楼宇最大能容纳 100 辆 EV, 每辆 EV 的容量均为 50 kWh, 最大充放电功率为 6、4 kW, 充放电效率为 0.95, 其余信息如表 3 所示。

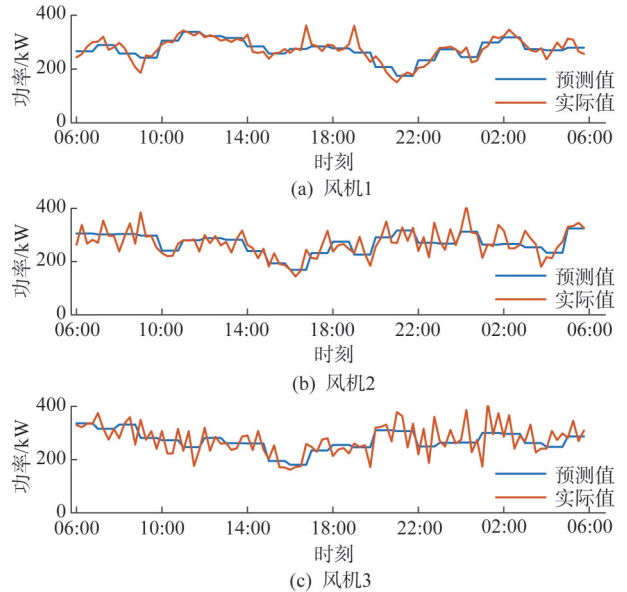


图5 系统风机出力预测值与实际值

Fig. 5 Predicted values and actual values of system wind turbine outputs

4.2 日前调度结果分析

4.2.1 楼宇层优化调度分析

为比较不同类型楼宇的优化结果, 选取居民楼宇 1 与商业楼宇 5 进行对比分析, 其电、热功率优化结果如图 8—9 所示。

由图 8—9 可知, 在 06:00 至 08:00 期间, 居民楼宇的用电需求主要由电动汽车(EV)和燃气轮机(GT)满足, 而用热需求则由燃气锅炉(GB)和电锅炉(EB)提供。随着用户陆续驾驶 EV 上班离开楼宇, EV 的可调度范围急剧缩小, 此时用电需求主要由光伏发电来满足。由于白天电价较高, 通过燃烧天然气供热成本较低, 因此采用 GT 和 GB 进行产热以满足用热需求, 同时 GT 产生的电能可减少从电网购电量, 多余电能可出售给电网或为楼内剩

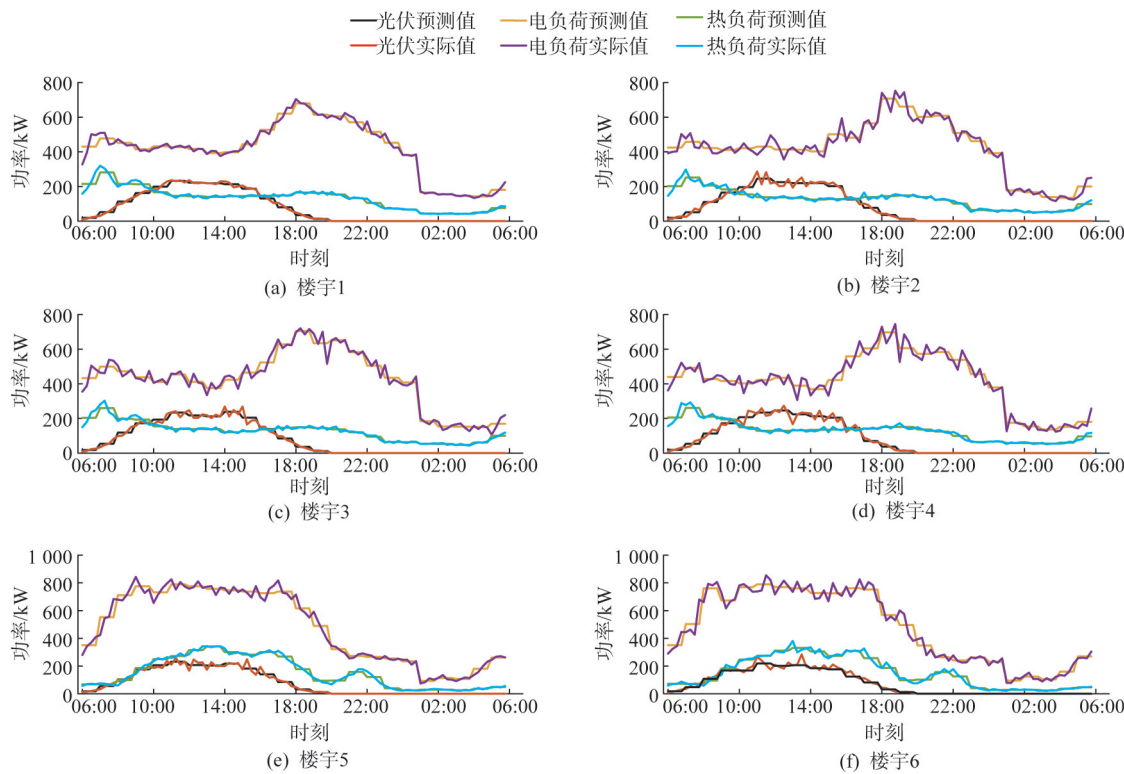


图 6 各楼宇光伏出力、电热负荷预测值与实际值

Fig. 6 Predicted and actual PV outputs, electrical loads and thermal loads of each building

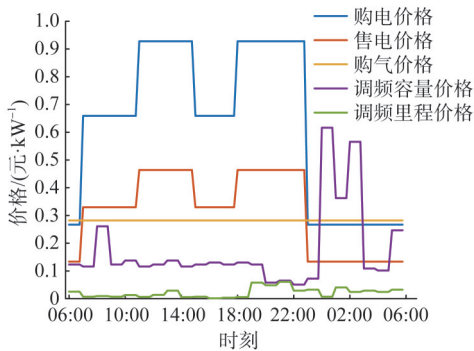


图 7 各市场价格信息

Fig. 7 Prices information for various markets

表 1 各设备相关运行参数

Tab. 1 Relevant operating parameters of each equipment

设备类型	最大功率/kW	能源转化效率	运维单价/(元·kW ⁻¹)	碳排放系数
GT	200(民用)	0.40/0.45	0.042	0.08
	250(商用)			
GB	150(民用)	0.85	0.040	0.05
	200(商用)			
EB	100(民用)	0.95	0.040	
	150(商用)			
光伏	800		0.025	
风机	1 000		0.029	
配电网	6 000(购电)			0.1
	3 000(售电)			
配气网	3 000			

表 2 储能关键参数

Tab. 2 Key parameters for energy storage

储能类型	容量/kWh	最大充、放功率/kW	充、放效率	运维单价/(元·kW ⁻¹)	SOC值范围
储电	400(民用)	150、150	0.95、0.95	0.051	[0.1, 1]
	500(商用)				
储热	150(民用)	50、50	0.95、0.95	0.055	[0.1, 1]
	200(商用)				

余的EV和储能系统(EES)充电。

晚上用户下班驾驶EV返回楼宇, EV与GT协同工作, 同时满足电、热负荷需求。在23:00之后, 电价进入低谷时段, 此时楼宇大量购电以满足用电需求并为EV充电, 确保第二天出行所需, 而热需求则转由EB供给。

对于商业楼宇, 由于工作活动的特性, 用能高峰集中在白天, 主要由光伏发电和楼外风机出力来满足用电需求, 剩余电量则用于为EV和EES充电。用热需求同样主要由GT产热, 辅以GB产热来满

表 3 EV 相关参数

Tab. 3 Relevant parameters of electric vehicles

楼宇类型	到达时刻	驶离时刻	行驶里程	SOC 值范围
居民楼宇	$t \sim N(17, 1^2)$	$t \sim N(9, 0.8^2)$	$t \sim N(15, 2^2)$	$[0.2, 0.95]$
商业楼宇	$t \sim N(9, 0.8^2)$	$t \sim N(17, 1^2)$	$t \sim N(15, 2^2)$	$[0.2, 0.95]$

足。23:00 以后, 电热需求均较低, 电需求通过少量购电即可满足, 热需求则由 EB 提供。

此外, VPP 采用补贴激励方式对楼宇内的可控负荷进行调度, 将楼宇高峰时段的部分电热负荷转移至其余时段, 减小了负荷峰谷差, 具有较好的削峰填谷效果。

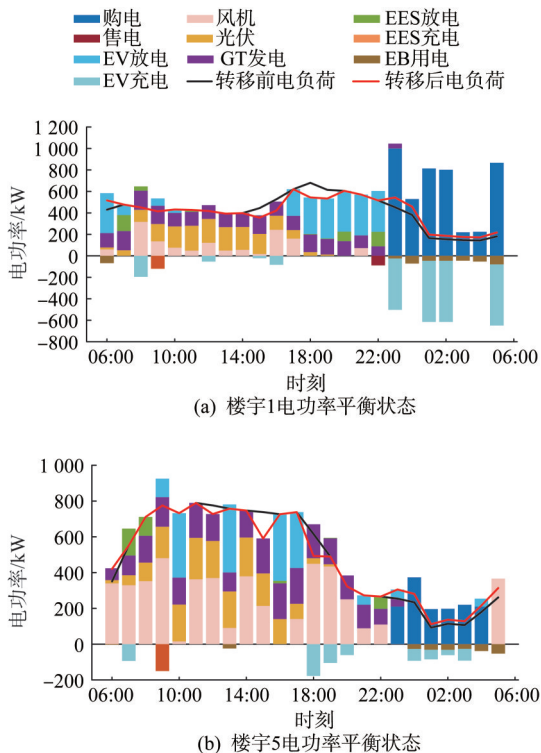


图 8 楼宇 1、5 电功率调度结果

Fig. 8 Electrical power dispatching results for buildings 1, 5

4.2.2 VPP 优化调度分析

为说明本文所提调度方法的性能, 设置其它两种场景进行对比仿真, 场景 3 为本文所提方法。

场景 1: VPP 不参与电网辅助调频服务。

场景 2: VPP 仅调度 EV 集群参与电网辅助调频服务。

场景 3: VPP 调度 EV 集群和 EES 参与电网辅助调频服务。

VPP 在各场景下的电、热功率调度结果如图 9 所示。由图 9 可知, 在 3 种场景下, VPP 的优化调

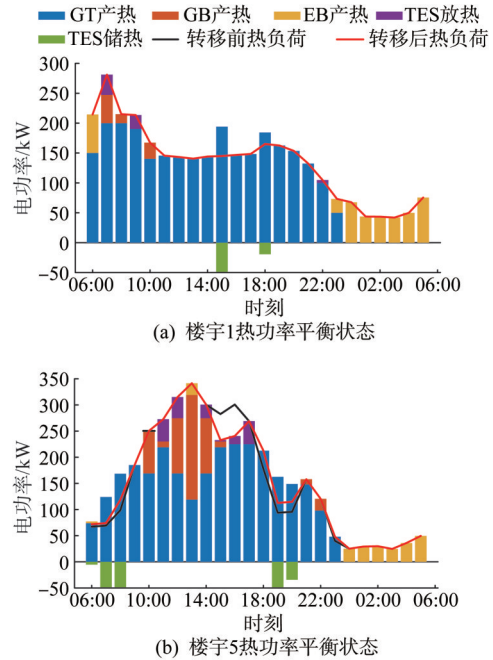


图 9 楼宇 1、5 热功率调度结果

Fig. 9 Thermal power dispatching results for buildings 1, 5

度整体运行情况大致相似。在用电需求方面, 白天主要由风光、EV 及 GT 供应, 23:00 后电价处于低谷期, 此时 VPP 购电并向负荷和 EV 供电。在用电需求方面, 白天由 GT 和 GB 供热, 同时 GT 发电以缓解用电压力; 夜晚由于电价处于低谷期, 转而调度效率较高的 EB 供热。不同之处在于, 场景 1 下 VPP 不参与电网调频, 相比场景 2 和场景 3, EV 集群在优化调度上的可行域最大, 11:00—14:00 时段可持续放电, 并向电网出售电能以获取收益; 且夜晚 VPP 向电网的购电量最少。场景 2 中, 由于 EV 集群需参与电网调频, 优化调度中的放电量减少, 电压力增加, 因此夜晚需购买更多电量。场景 3 下, EES 和 EV 集群同时参与调频, 尽管最优调度受到限制, 但相比场景 2 更具灵活性。

经优化求解计算, 各个场景下 VPP 自身优化调度成本及参与调频服务收益如表 4 所示。由表 4 可知, 在场景 1 下, VPP 不需要留有功率裕度参加调频辅助服务, 能够在最大程度上调控自身资源优化成本, 因此向外购能成本最小, 然而, VPP 优化后仍有一定的剩余功率未得到有效利用, 导致总成本最大, 未能实现最大化收益。场景 2 下 VPP 优化调度的同时利用 EV 集群参与调频辅助服务, 相比于场景 1, VPP 在调度 EV 集群时需留有功率裕度给电

网辅助调频,导致优化自身资源时偏离最佳运行状态,向电网售电量减少,且购电量增加,同时调频仅依赖EV集群需要向用户支付较高补贴,但参与调频服务市场可获得收益,总成本减少。场景3中EES和EV集群同时参与调频,相比于场景2中EV集群单独参与调频,ES和EV集群相互配合有着更高的活性,调频效果更好,并减少了向用户支付的补贴,因此调频收益更高,实现利益最大化,使得VPP总成本最小。

4.2.3 日前申报调频功率分析

在场景2、3中,VPP日前在调频市场上申报调频功率,如图10所示。

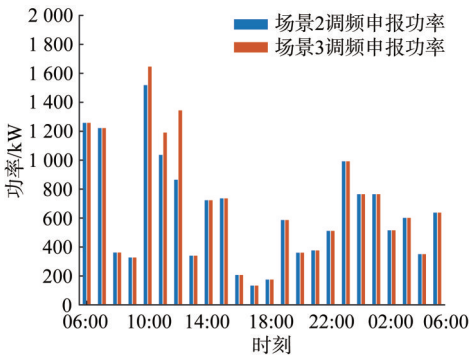


图 10 场景2、3调频申报功率
Fig. 10 Frequency regulation powers declared in scenario 2, 3

VPP在场景2中仅申报EV集群的调频功率,在10:00—15:00,由于用户出行需要,大部分EV驶离居民楼宇,VPP整体EV集群可调度域较小,无法预留较高容量满足电网的调频需求,获得的收益也减少,而场景3中EES也参与调频,在EV集群可调度域小时辅助出力,共同满足电网调频信号,进而能获得更大收益。

4.3 实时调整结果分析

4.3.1 VPP实时参与调频市场分析

电网下发的AGC信号与预测调频存在一定的偏差,需要通过实时调整EES和EV集群的充放电

功率来快速响应AGC信号,确保VPP在调频市场上的响应与实际AGC指令接近一致。

从图11中可以看出,当电网下发实际AGC信号时,场景2仅EV集群参与电网调频,因用户出行需求导致在10:00—15:00期间未能完全响应AGC信号,尤其是11:00—12:00调频功率缺额最显著。场景3中EES与EV集群配合调频,通过快速充放电填补EV集群的调频功率缺口,从而减小因EV出行对辅助电网调频的不利影响,精准追踪AGC信号。

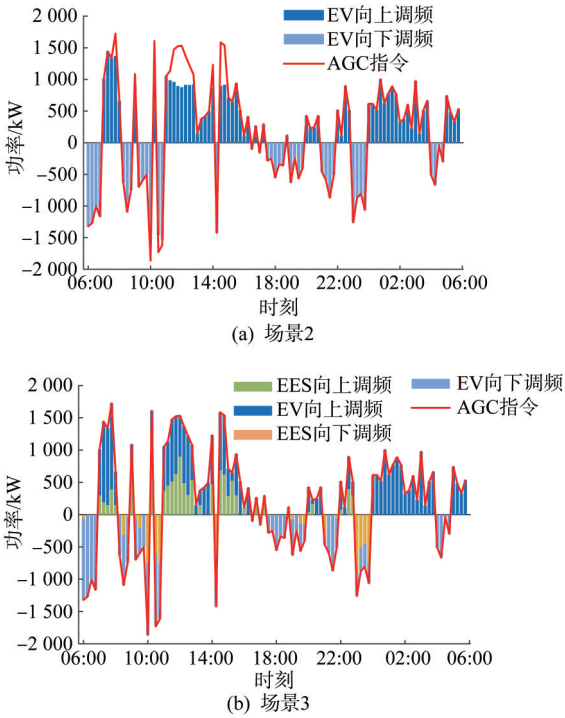


图 11 实时场景2、3下VPP响应AGC信号
Fig. 11 VPP responds to AGC signals under real-time scenario 2,3

4.3.2 实时-日前结果对比

经实时滚动优化后,VPP在各场景下的电热调度结果如图12—13所示,购售电偏差如图14所示,各项成本与日前计划成本的偏差如表5所示。

表 4 日前阶段各场景下VPP成本对比

Tab. 4 Comparison of the costs of VPP for each scenario in day ahead

元

场景	日前阶段各成本(收益)							总成本
	购售电	购气	设备运维	需求响应	EV补贴	碳排	调频收益	
1	3 598.92	10 509.98	2 823.00	500.38	1 374.20	2 727.86	0	21 534.34
2	4 571.48	10 805.26	2 943.35	509.34	3 643.30	2 995.40	5 538.16	19 929.97
3	4 564.31	10 572.29	2 760.69	501.54	1 971.59	2 997.31	6 278.89	17 088.84

由图 12—13 可得, 实时优化结果与日前调度结果基本一致, 通过实时滚动优化, VPP 可按照日前计划进一步灵活运行, 且调度以分钟级为单位, 可及时响应负荷波动, 提升了系统可靠性。

由于日前预测的风光、负荷等数据与实测结果存在误差, 会对 VPP 电功率调度造成一定影响, 当风光剩余或用电需求下降时, 可向电网售电, 反之则需额外向电网购电, 因购电价格高于售电价格,

VPP 整体需向电网购电。场景 2、3 还需考虑 AGC 信号的不确定性, 购电量进一步增加, 并且场景 2 在 08:00 及 10:00—15:00 未达到调频需求, 需向电网支付惩罚费用, 调频收益与日前预测偏差较大, 导致总成本偏差最大。日前预测的不确定性对 VPP 热功率优化调度上影响较小, 因此 VPP 实时购气与日前购气偏差很小。

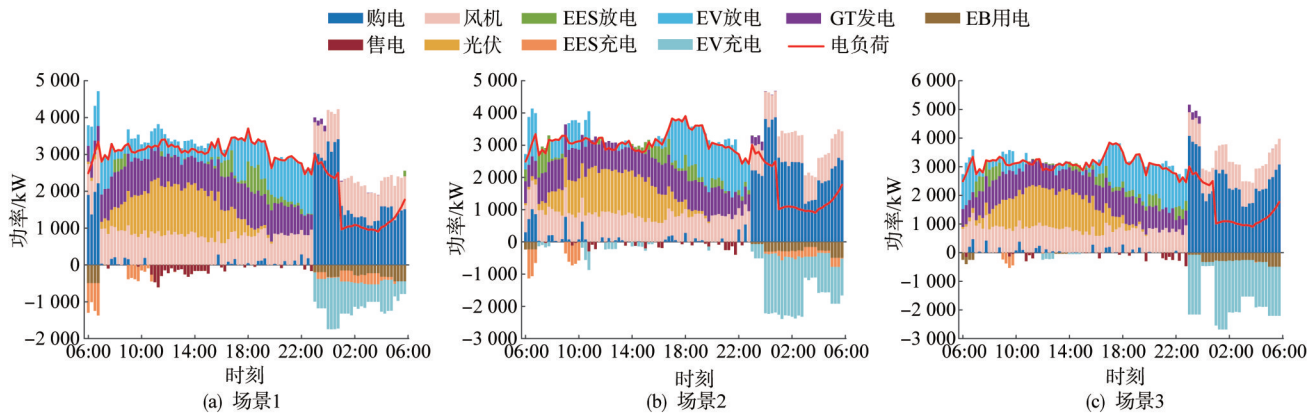


图 12 实时各场景下 VPP 电功率优化结果

Fig. 12 Electric power dispatching results of VPP for each scenario in real time

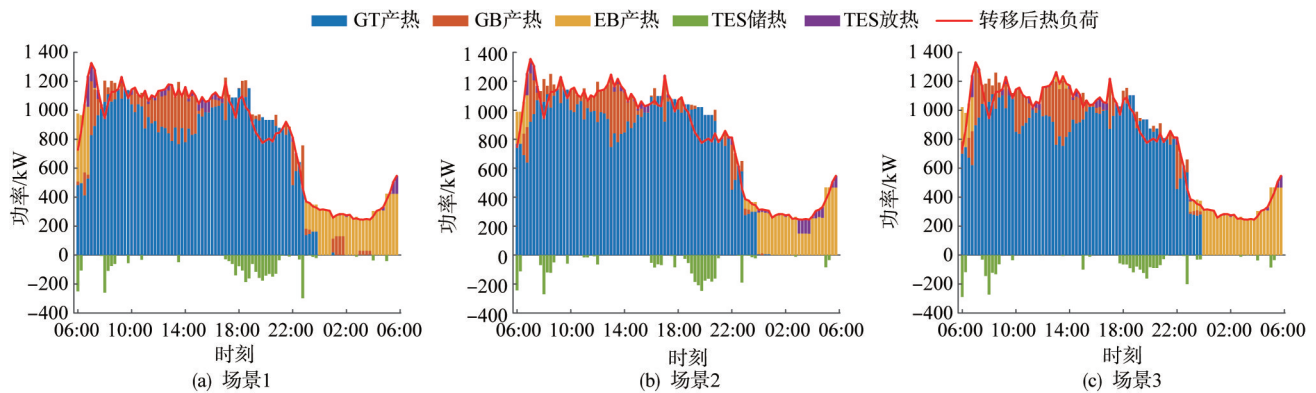


图 13 实时各场景下 VPP 热功率优化结果

Fig. 13 Thermal power dispatching results of VPP for each scenario in real time

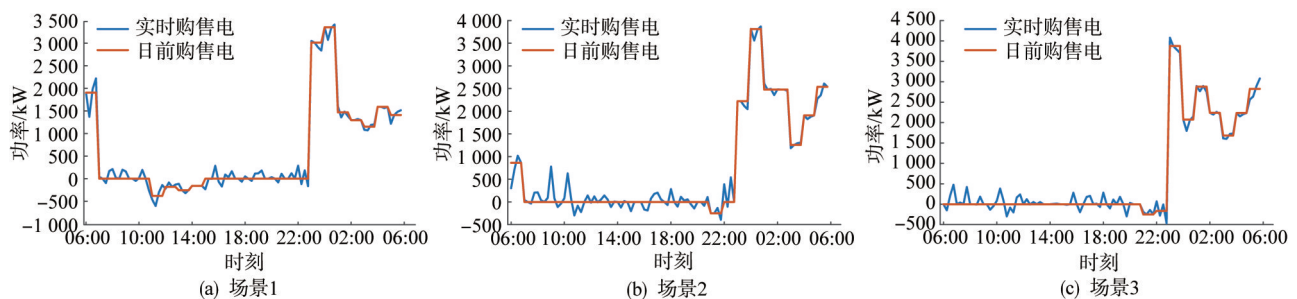


图 14 各场景实时-日前 VPP 购售电情况

Fig. 14 Real-time to day-ahead VPP power purchases and sales in each scenario

表5 各场景下VPP实时-日前成本偏差

Tab. 5 Real-time to day-ahead cost deviation of VPP in each

scenario							元
场景	实时-日前成本(收益)偏差						
	购售电	购气	设备运维	EV 补贴	碳排	调频收益	总成本
1	382.61	3.53	2.63	-69.42	60.36	0	379.71
2	611.35	0	-61.31	28.72	91.57	939.81	1 610.14
3	469.77	0	-10.12	744.45	87.06	174.21	1 116.95

5 结论

本文构建了以智慧楼宇为单元的虚拟电厂模型,并提出了一种利用楼宇内部灵活性资源辅助电网调频的策略。通过对不同场景下的仿真分析进行对比,得出以下结论。

1)电储能和电动汽车作为楼宇中的灵活性资源,能够迅速响应AGC信号,辅助电网调频,充分挖掘其灵活潜力。同时,实现不同资源的多能互补,为虚拟电厂带来额外收益。

2)电储能与电动汽车联合调度参与电网调频,能够耦合楼宇的调度功率和调频容量,两者相互配合支撑,最大程度地满足电网下发的AGC调频信号,提升电网运行稳定性,从而使虚拟电厂获得更高的运行效益。

3)采用日前-实时两阶段优化方法求解模型,可有效降低因日前预测引起的偏差,确保实时调度基本按照日前最优计划执行。

参考文献

- [1] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿.虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J].中国电机工程学报,2022,42(1):37-56.
- [2] 黄润,刘梓宁,余强,等.考虑全寿命周期效益的风电场站储能系统参与一次调频服务容量及功率配置优化[J].南方电网技术,2025,19(4):122-131.
- [3] 周霞,刘懿诗,戴剑丰,等.考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):30-44.
- [4] 袁桂丽,苏伟芳.计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与AGC调频服务研究[J].电网技术,2020,44(7):2538-2548.
- [5] 赵冬梅,徐辰宇,陶然,等.多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1776-1799.
- [6] 梁志宏,刘吉臻,洪烽,等.电力级大功率飞轮储能系统耦合火电机组调频技术研究及工程应用[J].中国电机工程学报,2024,44(21):8518-8530.
- [7] 房方,刘渝斌,王冰玉,等.基于NSGA-II的飞轮-火电联合二次调频最优负荷分配策略[J].电力系统自动化,2024,48(12):79-88.
- [8] 朱宗耀,王秀丽,吴雄,等.复合储能参与电能量及辅助服务市场的运行策略[J].电力系统自动化,2023,47(18):80-90.
- [9] DONG Chaoyu, CHU Ronghe, MORSTYN T, et al. Online rolling evolutionary decoder-dispatch framework for the secondary frequency regulation of time-varying electrical-grid-electric-vehicle system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 871-884.
- [10] DUTTA A, DEBBARMA S. Frequency regulation in deregulated market using vehicle-to-grid services in residential distribution network[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(3): 2812-2820.
- [11] GAO Shuang, DAI Ruxin, CAO Wenjing, et al. Combined provision of economic dispatch and frequency regulation by aggregated evs considering electricity market interaction [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 1723-1735.
- [12] KAUR K, KUMAR N, SINGH M. Coordinated power control of electric vehicles for grid frequency support: milp-based hierarchical control design [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3364-3373.
- [13] CHEN Junru, LIU Muyang, MILANO F. Aggregated model of analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [14] YUAN Guili, SU Weifang. Research on virtual power plant participation in AGC frequency regulation service taking into account electric vehicle uncertainty [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548.
- [15] ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. A review on the flexible regulation of multifarious distributed energy storage in the distribution side of new power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1776-1799.
- [16] LIANG Zhihong, LIU Jizhen, HONG Feng, et al. Research and engineering application of power-level high-power flywheel energy storage system coupled with thermal power unit frequency regulation technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8518-8530.
- [17] FANG Fang, LIU Yubin, WANG Bingyu, et al. Optimal load allocation strategy for joint flywheel-thermal power secondary frequency regulation based on NSGA-II [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 79-88.
- [18] ZHU Zongyao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Operation strategy of composite energy storage participating in electric energy and auxiliary service market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 80-90.

- virtual power plants for transient frequency and voltage stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4366 – 4375.
- [14] 卢志刚, 师铸博, 何良策, 等. 基于碳捕集与封存-电转气-电解熔融盐协同的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3088 – 3103.
- LU Zhigang, SHI Benbo, HE Liangce, et al. Optimal scheduling of virtual power plant based on carbon capture and storage-electricity-to-gas-electrolysis molten salt synergy [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3088 – 3103.
- [15] WANG Han, JIA Youwei, SHI Mengge, et al. A mutually beneficial operation framework for virtual power plants and electric vehicle charging stations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4634 – 4648.
- [16] ZHANG Tao, HU Zechun. Optimal scheduling strategy of virtual power plant with power-to-gas in dual energy markets [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2921 – 2929.
- [17] CHEN Wen, QIU Jing, ZHAO Junhua, et al. Bargaining game-based profit allocation of virtual power plant in frequency regulation market considering battery cycle life [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2913 – 2928.
- [18] 许高秀, 王旭, 邓晖, 等. 考虑调频需求及风光出力不确定性的储能系统参与能量-调频市场运行策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2317 – 2330.
- XU Gaoxiu, WANG Xu, DENG Hui, et al. Operation strategy of energy storage system in energy-frequency regulation market considering the uncertainty of frequency regulation demand and wind power [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2317 – 2330.
- [19] 王志维, 王秀丽, 雍维桢, 等. 含备用储能的 5G 基站虚拟电厂参与电力市场的交易策略研究[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 968 – 982.
- WANG Zhiwei, WANG Xiulian, YONG Weizhen, et al. Research on trading strategy of 5G base station virtual power plant with standby energy storage participating in power market [J]. Power System Technology, 2018, 48(3): 968 – 982.
- [20] ALIREZAZADEH A, RASHIDINEJAD M, ABDOLLAHI A, et al. A new flexible model for generation scheduling in a smart grid[J]. Energy, 2020(191): 116438.1 – 116438.10.
- [21] YU Liang, QIN Shuqi, ZHANG Meng, et al. A review of deep reinforcement learning for smart building energy management [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12046 – 12063.
- [22] 殷爽睿, 艾芊, 王大鹏, 等. 考虑空调负荷虚拟储能的产消者鲁棒日前申报策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 24 – 34.
- YIN Shuangrui, AI Qian, WANG Dapeng, et al. Robust day-ahead declaration strategy for producers and consumers considering virtual energy storage for air-conditioning load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 24 – 34.
- [23] LIU Hui, QI Junjian, WANG Jianhui, et al. EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3763 – 3772.
- [24] 杨铮, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向综合能源楼宇的电动汽车辅助服务方案[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2831 – 2843.
- YANG Zheng, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Electric vehicle assistance service scheme for integrated energy buildings [J]. Grid System Technology, 2017, 41(9): 2831 – 2843.
- [25] 余苏敏, 杜洋, 史一炜, 等. 考虑 V2B 智慧充电桩群的低碳楼宇优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 95 – 101.
- YU Sumin, DU Yang, SHI Yiwei, et al. Low carbon building optimal scheduling considering V2B smart charging pile group [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 95 – 101.
- [26] 范宏, 于伟南, 柳璐, 等. 双碳目标下考虑电氢互补的智慧园区多楼宇协调调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 42 – 51.
- FAN Hong, YU Weinan, LIU Lu, et al. Multi-building coordinated scheduling in smart park considering electric-hydrogen complementing under dual-carbon target [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 42 – 51.
- [27] 范宏, 王兰坤, 邢梦晴, 等. 考虑频率稳定约束的电-氢互补多楼宇协调优化调度[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(12): 1559 – 1570.
- FAN Hong, WANG Lankun, XING Mengqing, et al. Coordinated optimal scheduling of complementary electric-hydrogen buildings considering frequency stability constraints [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 57(12): 1559 – 1570.
- [28] TSAOUSOGLOU G, EFTHYMIOPOULOS N, MAKRI S P, et al. Multistage energy management of coordinated smart buildings: a multiagent markov decision process approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2788 – 2797.
- [29] SHI Mengge, WANG Han, LÜ Cheng, et al. An optimal regime of energy management for smart building clusters with electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(5): 7619 – 7629.
- [30] 湛归, 殷爽睿, 艾芊, 等. 智能楼宇型虚拟电厂参与电力系统调频辅助服务策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 13 – 20, 57.
- ZHAN Gui, YIN Shuangrui, AI Qian, et al. Strategy of intelligent building virtual power plant participating in frequency regulation auxiliary service of power system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 13 – 20, 57.
- [31] 陈达鹏, 荆朝霞. 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 1 – 9.
- CHEN Dapeng, JING Zhaoxia. Analysis of the frequency regulation compensation mechanism in the U. S. frequency regulation auxiliary service market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 1 – 9.

收稿日期: 2024-11-08; 网络首发日期: 2025-03-24

作者简介:

范宏(1978), 女, 副教授, 博士, 研究方向为综合能源系统优化运行, Hong_Fan@outlook.com;

罗昊(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化运行, 1216523462@qq.com;

陈舒阳(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为数据中心优化, csy2022@mail.shiep.edu.cn。