

考虑用户积极性的电动汽车与机组联合调频的两阶段随机优化调度模型

许梦瑶, 艾小猛, 方家琨, 乐零陵, 王钦, 文劲宇

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Two-stage Stochastic Optimal Scheduling Model for Joint Regulation of EV and Thermal Units Considering Users Enthusiasm

XU Mengyao, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, LE Lingling, WANG Qin, WEN Jinyu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The integration of large-scale intermittent power sources such as wind power, photovoltaics, and distributed energy storage into the power grid has brought great impacts on the safe and stable operation of the power system, one of which is the increasing regulation requirements. Due to the limitation of ramp constraints, the traditional regulation ancillary services provided by the thermal units has the characteristics of low regulation speed and accelerated aging, which makes it difficult to meet the regulation requirements. Electric vehicles (EV) can be controlled directly by the grid and participate in the vehicle-to-grid (V2G) interactions, which have the ability to respond to the system commands quickly to provide regulation ancillary services. In order to better match the regulation requirements of the power system, a two-stage stochastic optimal scheduling model of joint regulation with the electric vehicles and the units considering the EV users enthusiasm is proposed based on the behavior characteristics of EV users in this paper. The proposed model realizes the complementarity of the thermal units and the electric vehicles in regulation capacity and regulation speed. The dynamic scenario method is used to generate a dynamic scenario set with the regulation signal data of Guangdong Power Grid. The simulation analysis is performed in the IEEE 39-bus system, which verifies the correctness and effectiveness of the proposed scheduling model.

KEY WORDS: joint regulation; electric vehicles; vehicle-to-grid interaction; two-stage stochastic optimal scheduling

摘要: 风电、光伏等间歇性电源的大规模接入, 给电网的安全稳定运行带来了诸多影响, 如电力系统调频压力显著增大。传统的火电机组提供调频辅助服务受到爬坡约束限制,

存在调节速率低、加速机组老化等缺点, 难以满足调频需求。电动汽车(electric vehicle, EV)可受电网直接控制参与车网互动(vehicle-to-grid, V2G), 具有迅速响应系统指令, 提供调频辅助服务的能力。为更好地匹配电力系统的调频要求, 在考虑电动汽车用户行为特性的基础上, 提出考虑用户积极性的电动汽车与机组联合调频的两阶段随机优化调度模型, 实现火电机组调频容量大、调频速度慢及电动汽车调频容量小、调频速度快的优势互补。采用动态场景法以广东电网的调频信号数据作为输入生成动态场景集在 IEEE 39 节点系统进行仿真分析, 验证了所提调度模型的正确性与有效性。

关键词: 联合调频; 电动汽车; 电动汽车与电网互动(V2G); 两阶段随机优化调度

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0922

0 引言

能源危机与环境污染的双重压力下, 以风电、光伏为代表的可再生能源得到快速发展, 其发电的随机性与间歇性给电网运行带来了诸多挑战, 调频是其中一个重要问题^[1-5]。一方面, 可再生能源通过电力电子变换器接入电网, 替代传统的机组发电, 从而减小在线机组的总转动惯量, 在相同有功功率的扰动下, 可再生能源占比更高时, 系统维持频率质量的表现更差^[6]; 另一方面, 可再生能源发电的波动性也给电网的有功平衡带来了新的扰动, 因此电力系统的调频容量需求也随着可再生能源发电渗透率的提升而增大^[7]。

调频主要是为了调节短时间内的能量不平衡, 从而保证电网稳定, 传统的调频方式是通过调整发电机组的功率输出来跟踪需求变化^[8]。而火电机组调频受其机械旋转部件磨损的影响, 爬坡速率较低, 无法较好地响应调频指令信号, 可能出现调节

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B111109002)。

Project Supported by Key-area Research and Development Program of Guangdong Province (Grant No. 2019B111109002).

延迟、反向等现象^[9]。随着电力系统对频率调节能力的需求增加，仅靠传统的发电机组调频，一方面火电机组频繁变换功率运行，会加重机组设备疲劳和磨损；另一方面环保压力限制了机组调节能力，机组频繁变功率运行很难控制排放物排放量^[10-12]。此外，机组的调频能力比较依赖于自身的实际运行工况，若机组长期处于低负荷运行状态，其调频能力也会变得更差^[13]。

因此，引入需求侧资源参与提供电网调频辅助服务为这一问题提供了新的解决路径^[14]。据国际能源署(International Energy Agency, IEA)的一份报告，电动汽车(EV)的市场渗透率在 2030 年将达到 34%^[15]，有望成为灵活负载的主要来源之一，且其具备可控负荷和储能单元的双重属性。已有研究表明，通过对电动汽车充放电的有序引导或管理，在不影响用户出行需要的前提下使其在空闲时段参与到电力系统的频率调节中，具有一定的可行性^[16-19]。相较于机组调频，电动汽车调频具有调节速度快的优势^[20]。文献[21]提出一种基于成本分摊机制的电动汽车提供调频辅助服务调度策略，验证了其潜在的盈利能力。文献[22]提出一种基于非合作博弈和合作博弈的博弈理论方法，以激励电动汽车为电网提供调频辅助服务。此外，由于电动汽车用户用车时间和充电时间不同，可调度时间也有所不同，文献[23]基于随机 copula 方法对电动汽车车队的负载需求及行驶模式进行建模。

电动汽车等灵活性资源参与辅助服务市场已受到广泛研究，但是单辆电动汽车的电池容量太小，小规模电动汽车群无法独立完成系统调频需求，因此对源荷两侧联合调频的研究十分必要。文献[24]考虑了电动汽车和电池储能电站快速响应的优势，提出了针对涉及自动发电控制(automatic generation control, AGC)的电动汽车、储能电站及传统机组调频资源的协同控制策略。文献[25]建立了含火电机组、混合储能系统及电动汽车的虚拟电厂参与 AGC 调频决策模型，优化储能配置及虚拟电厂各部分的出力调度。文献[26]提出一种充分利用电动汽车快速响应特性的电动汽车参与电网二次调频控制策略。但是，已有成果在考虑电动汽车与机组联合调频研究时，较少考虑电动汽车用户参与 V2G 的自主性与积极性，且多从控制层面考虑电动汽车的调频优势，未涉及考虑电动汽车响应速度快及大瞬时功率特性的源荷联合调频优化研究。

综上所述，本文在充分考虑电动汽车用户行为特性的基础上，提出考虑用户积极性的电动汽车与

机组联合调频的两阶段随机规划调度模型，在考虑实时调频信号的前提下优化机组与电动汽车的日前调频备用容量，以实现机组与电动汽车调频容量与调频速度的优势互补。首先，采用动态场景法生成调频信号场景，在此基础上构建两阶段随机规划模型。同时，在模型中考虑了电动汽车的电池退化成本及参与调频的价格补偿，激励用户自主参与提供调频辅助服务。

1 考虑用户积极性的电动汽车调频模型

电动汽车作为有自主行为特性的用户端设备，电网无法直接控制各个电动汽车，而由车主主动参与接受调度。因此，本节从用户出行充电需求及电池退化成本补偿 2 个方面介绍了考虑电动汽车提供调频辅助服务积极性的调度模型。

1.1 电动汽车充电模型

电动汽车的充放电功率范围应满足如下约束：

$$0 \leq P_{jt}^c \leq P_{j,\max}^c, t_j^{\text{in}} \leq t \leq t_j^{\text{out}} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{jt}^d \leq P_{j,\max}^d, t_j^{\text{in}} \leq t \leq t_j^{\text{out}} \quad (2)$$

式中： t 为时段编号，每 1h 为 1 个时段，全天共 24 个时段； j 为电动汽车的编号； P_{jt}^c 、 P_{jt}^d 分别为电动汽车 j 在 t 时段的充、放功率； $P_{j,\max}^c$ 、 $P_{j,\max}^d$ 分别为电动汽车 j 的最大充、放电功率； t_j^{in} 、 t_j^{out} 分别为电动汽车 j 接入、离开充电桩的时间。

此外，电动汽车的充放电功率应满足互斥约束：

$$P_{jt}^c P_{jt}^d = 0 \quad (3)$$

上式表示电动汽车 j 无法在某一时段内同时充放电。

电动汽车净充电量约束^[27]为

$$\left(\sum_{t=t_{j,0}^{\text{Ctrl}}}^{t_{j,1}^{\text{Ctrl}}} P_{j,t}^c - \sum_{t=t_{j,0}^{\text{Ctrl}}}^{t_{j,1}^{\text{Ctrl}}} P_{j,t}^d \right) \Delta t = E_{j,1}^{\text{Ctrl}} - E_{j,0}^{\text{Ctrl}} \quad (4)$$

式中： $t_{j,0}^{\text{Ctrl}}$ 、 $t_{j,1}^{\text{Ctrl}}$ 分别为电动汽车 j 可控时间的起始、终止时刻； Δt 为时间间隔； $E_{j,0}^{\text{Ctrl}}$ 、 $E_{j,1}^{\text{Ctrl}}$ 分别为电动汽车在可控时间起、止时刻的电池电量。

1.2 电动汽车电池退化成本模型

为激励电动汽车用户自主参与响应电网调频辅助服务，除相应的调频容量收益以外，还应对电动汽车参与辅助服务的电池退化成本进行补偿。

采用电池老化分段线性成本函数^[28]可近似估计电动汽车电池的循环老化成本，合理地假设电池退化仅发生在充放电循环的放电阶段。将电池的放电深度(从 0 到 100%)平均划分为 D 个区段，并将电池更换成本按比例分配给每个区段，在多时间间隔调度中给每个区段合理分配放电功率分量以对

放电深度进行建模,则电池退化成本定义为

$$C = \sum_d^D \sum_t^T C_{\text{Disd}} p_{jt,d}^{\text{dis}} \quad (5)$$

式中 C_{Disd} 是每区段的边际退化成本。

将电动汽车 j 在 t 时段的功率分解为充电功率 p_{jt}^{ch} 和放电功率 p_{jt}^{dis} :

$$P_{jt} = p_{jt}^{\text{ch}} - p_{jt}^{\text{dis}} \quad (6)$$

$$0 \leq p_{jt}^{\text{ch}} \leq U_{jt}^{\text{ch}} P_{j,\text{max}} \quad (7)$$

$$0 \leq p_{jt}^{\text{dis}} \leq U_{jt}^{\text{dis}} P_{j,\text{max}} \quad (8)$$

式中: U_{jt}^{ch} 、 U_{jt}^{dis} 分别为电动汽车充、放电状态二进制变量,其中 U_{jt}^{ch} 为 1 表示电动汽车 j 在 t 时段处于充电状态,否则为 0, U_{jt}^{dis} 为 1 表示电动汽车 j 在 t 时段处于放电状态,否则为 0,且电动汽车 j 不能同时充放电:

$$U_{jt}^{\text{ch}} + U_{jt}^{\text{dis}} \leq 1 \quad (9)$$

电动汽车 j 在 t 时段的放电功率为各区段放电功率分量之和:

$$p_{jt}^{\text{dis}} = \sum_d^D p_{jt,d}^{\text{dis}} \quad (10)$$

$$p_{jt,d}^{\text{dis}} \geq 0 \quad (11)$$

2 机组与EV联合调频的两阶段随机优化调度模型

机组与电动汽车联合调频优化问题中,实时的调频信号,即调频需求量具有不确定性,而对于含有不确定性变量的随机优化问题,应该考虑优化问题在满足不确定变量需求之后是否仍有可行解。因此,采用 here-and-now 和 wait-and-see(HN-WS)的两阶段随机优化方法^[29]。该两阶段随机优化在实时调频需求量确定前做出日前调频备用容量优化决策,且决策过程融入了对不确定性调频需求量实现后的考虑。

美国 PJM 电力市场中,调频备用的日前出清时间尺度为 1h,并在日内每 5min 进行一次滚动优化^[30]。因此,基于美国 PJM 市场的相关规则,本文所提两阶段随机优化方法中,一阶段的决策结果适用于二阶段的所有场景,时间尺度为 1h;二阶段则在一阶段决策的基础上做出各个实时场景下的决策,时间尺度为 5min。本节介绍了所提出的考虑用户积极性的电动汽车与机组联合调频的两阶段随机优化调度模型。该模型主要由 3 部分组成:目标函数;机组与电动汽车两阶段联合调频约束;机组与电动汽车其他相关约束。其中,电动汽车其他相关约束在前文中已详细描述,本节不再赘述。

2.1 目标函数

优化目标由一阶段和二阶段的成本共同组成,一阶段的成本为日前的有功和调频容量成本,具体包括火电机组的启停机成本、燃料成本、上下调频容量成本及电动汽车调频的容量成本;二阶段的成本为各调频场景下的平衡矫正的期望成本,以概率形式体现,具体包括火电机组的调频部署能量成本、电动汽车电池退化成本及电动汽车充电成本。为减少变量个数,缩短计算时间,将具有相同型号、相同可控起止时段、相同充电需求的电动汽车归为一类,视为一辆电动汽车。目标函数的数学形式具体如式(12)~(16)所示。

$$F = \min \sum_{t=1}^{N_T} \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} (C_{\text{SU}it} + F_{git} + (P_{it}^{\text{ru}} + P_{it}^{\text{rd}}) \cdot S_i (C_{it}^{\text{cap}} + R_i C_{it}^{\text{mil}})) + \sum_{m=1}^{N_M} C_{\text{dm}m}^{\text{cc}} \right\} + \sum_{s=1}^{N_S} P_{\text{ros}} \sum_{\tau=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_G} (C_{it}^{\text{uc}} P_{it\tau}^{\text{ru}} - C_{it}^{\text{dc}} P_{it\tau}^{\text{rd}}) + \sum_{m=1}^{N_M} (C_{\text{dm}m}^{\text{deg} \tau s} + C_{m\tau s}^e) \right] \quad (12)$$

$$C_{\text{SU}it} = C_i^{\text{SU}} I_{it} (1 - I_{it-1}) \quad (13)$$

$$C_{\text{dm}m}^{\text{cc}} = (P_{m\tau}^{\text{ru}} + P_{m\tau}^{\text{rd}}) S_m (C_{m\tau}^{\text{cap}} + R_m C_{m\tau}^{\text{mil}}) \quad (14)$$

$$C_{\text{dm}m}^{\text{deg} \tau s} = \sum_l^L (C_{\text{DC}m,l}^{\text{dis}} P_{m,\tau,l}^{\text{dis}}) \quad (15)$$

$$C_{m\tau s}^e = C_{m\tau}^e P_{m\tau s} \quad (16)$$

式中: i 为机组编号,共 N_G 台机组; m 为电动汽车群编号,共 N_M 类电动汽车群; s 为调频场景编号,共 S 种情景; t 为一天内的时段编号,每 1h 为一个时段,全天共 $24(N_T)$ 个时段; τ 为 1h 内的次级时段编号,每 5min 为一个时段,1h 内共 $12(T)$ 个时段; l 为电动汽车电池放电深度分段编号,共平均分为 L 段; $C_{\text{SU}it}$ 为机组 i 在 t 时段的开机成本; F_{git} 为机组 i 在 t 时段的煤耗成本; P_{it}^{ru} 、 P_{it}^{rd} 分别为机组 i 在 t 时段提供的上、下调频容量; S_i 为机组 i 的调频分数; R_i 为机组 i 的调频里程比; C_{it}^{cap} 、 C_{it}^{mil} 分别为机组 i 在 t 时段的调频容量价格、调频里程价格; $C_{\text{dm}m}^{\text{cc}}$ 为电动汽车群 m 在 t 时段的调频成本; p_{ros} 为调频场景 s 出现的概率; C_{it}^{uc} 、 C_{it}^{dc} 分别为机组 i 提供上、下调频的能量价格; I_{it} 为机组 i 的启停机二进制状态变量, I_{it} 为 1 表示机组 i 在 t 时段处于开机状态,否则为 0; $P_{it\tau}^{\text{ru}}$ 、 $P_{it\tau}^{\text{rd}}$ 分别为机组 i 在场景 s 下在 τ 时段实际提供的上、下调频容量; $C_{\text{dm}m}^{\text{deg} \tau s}$ 为电动汽车群 m 在场景 s 下在 τ 时段的电池退化成本; $C_{m\tau s}^e$ 为电动汽车群 m 在场景 s 下在 τ 时段的充

电成本； C_i^{SU} 为机组*i*的开机价格； P_{mt}^{ru} 、 P_{mt}^{rd} 分别为电动汽车群*m*在*t*时段提供的上、下调频容量； S_m 为电动汽车群*m*的调频分数； R_m 为电动汽车群*m*的调频里程比； C_{mt}^{cap} 、 C_{mt}^{mil} 分别为电动汽车群*m*在*t*时段的调频容量价格、调频里程价格； $C_{\text{DC}m,l}$ 为电动汽车群*m*在*l*段电池放电深度的边际退化成本； $P_{m,\tau,l}^{\text{dis}}$ 为电动汽车群*m*在第*l*段电池放电深度在*τ*时段分配到的放电功率； C_{mt}^e 为电动汽车群*m*在*t*时段的充电价格； P_{mts} 为电动汽车群*m*在场景*s*下在*τ*时段的功率。

此外，式(13)中， $C_{\text{SU}it}$ 为非线性项，考虑引入二进制整数变量 u_{it} 和 v_{it} 将其线性化， u_{it} 为1时表示机组*i*在*t*时段正处于开机过程，否则为0； v_{it} 为1时表示机组*i*在*t*时段正处于停机过程，否则为0。此时，存在以下线性关系^[18]：

$$\begin{cases} C_{\text{SU}it} = C_i^{\text{SU}} u_{it} \\ u_{it} - v_{it} = I_{it} - I_{it-1} \\ u_{it} + v_{it} \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

2.2 机组与电动汽车两阶段联合调频约束

1) 一阶段约束。

机组上爬坡约束。

$t > 1$ 时，有：

$$P_{it} \leq P_{it-1} + K_{\text{UR}i} + M(1 - I_{it}) + M(1 - I_{it-1}) \quad (18)$$

$t = 1$ 时，有：

$$P_{it} \leq P_{i0\text{min}} + K_{\text{UR}i} + M(1 - I_{it}) \quad (19)$$

式中 $K_{\text{UR}i}$ 为机组*i*在1h内的最大上爬坡量。

机组下爬坡约束。

$t > 1$ 时，有：

$$P_{it} \geq P_{it-1} - K_{\text{DR}i} - M(1 - I_{it}) - M(1 - I_{it-1}) \quad (20)$$

$t = 1$ 时，有：

$$P_{it} \geq P_{i0\text{max}} - K_{\text{DR}i} - M(1 - I_{it}) \quad (21)$$

式中 $K_{\text{DR}i}$ 为机组*i*在1h内的最大下爬坡量。

机组一阶段的调频容量约束。

$$P_{it}^{\text{ru}} \leq \min\{K_{\text{UR}i}I_{it}, P_i^{\text{max}}I_{it} - P_{it}\}, \forall i, t \quad (22)$$

$$P_{it}^{\text{rd}} \leq \min\{K_{\text{DR}i}I_{it}, P_{it} - P_i^{\text{min}}I_{it}\}, \forall i, t \quad (23)$$

电动汽车群功率约束。

$$-P_m^{\text{max}}U_{mt} \leq P_{mt} \leq P_m^{\text{max}}U_{mt} \quad (24)$$

式中： P_{mt} 为电动汽车群*m*在*t*时段的功率； P_m^{max} 为电动汽车群*m*的最大功率； U_{mt} 为1时表示电动汽车群*m*在*t*时段接在充电桩上，否则为0。

电动汽车群调频容量约束。

$$P_{mt}^{\text{ru}} \leq U_{mt}P_m^{\text{max}} + P_{mt} \quad (25)$$

$$P_{mt}^{\text{rd}} \leq U_{mt}P_m^{\text{max}} - P_{mt} \quad (26)$$

时段的有功平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{it} = \sum_{d=1}^{N_D} L_{dt} + \sum_{m=1}^{N_M} P_{mt} \quad (27)$$

式中： d 为节点编号，共 N_D 个节点； L_{dt} 为*d*节点在*t*时段的负荷预测值。

线路潮流约束。

$$\left| \sum_{d=1}^{N_D} s_{fld} P_{dt}^{\text{inj}} \right| \leq f_l^{\text{max}} \quad (28)$$

$$P_{dt}^{\text{inj}} = P_{it} - P_{Mt} - L_{dt}, i \in G_d, M \in M_d \quad (29)$$

式中： s_{fld} 为线路*l*对节点*d*的灵敏度因子； P_{dt}^{inj} 为节点*d*在*t*时段的净有功注入； M_d 为位于节点*d*的电动汽车群集合。

2) 二阶段约束。

场景机组上爬坡约束。

$\tau > 1$ 时：

$$P_{its} \leq P_{it-1s} + r_i^{\text{up}} + M(1 - I_{it}) + M(1 - I_{it-1}) \quad (30)$$

$\tau = 1$ 时：

$$P_{its} \leq P_{it-1} + r_i^{\text{up}} + M(1 - I_{it}) \quad (31)$$

式中 r_i^{up} 为机组*i*在5min内的最大上爬坡量，因此有：

$$r_i^{\text{up}} = K_{\text{UR}i} / 12 \quad (32)$$

场景机组下爬坡约束。

$\tau > 1$ 时：

$$P_{its} \geq P_{it-1s} - r_i^{\text{dn}} - M(1 - I_{it}) - M(1 - I_{it-1}) \quad (33)$$

$\tau = 1$ 时：

$$P_{its} \geq P_{it-1} - r_i^{\text{dn}} - M(1 - I_{it}) \quad (34)$$

式中 r_i^{dn} 为机组*i*在5min内的最大下爬坡量，因此有：

$$r_i^{\text{dn}} = K_{\text{DR}i} / 12 \quad (35)$$

场景调频量约束。

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{its}^{\text{ru}} + \sum_{m=1}^{N_M} P_{mts}^{\text{ru}} = P_{ts}^{\text{ru}} \quad (36)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{its}^{\text{rd}} + \sum_{m=1}^{N_M} P_{mts}^{\text{rd}} = P_{ts}^{\text{rd}} \quad (37)$$

式中： P_{mts}^{ru} 、 P_{mts}^{rd} 分别为电动汽车群*m*在场景*s*下在*τ*时段实际提供的上、下调频容量； P_{ts}^{ru} 、 P_{ts}^{rd} 分别为场景*s*下*τ*时段的调频需求量。

2.3 其他约束

机组开机费用松弛约束。

$$C_{\text{SU}it} \geq C_i^{\text{SU}} u_{it} \quad (38)$$

机组上下限约束。

$$P_i^{\text{min}} I_{it} \leq P_{it} \leq P_i^{\text{max}} I_{it} \quad (39)$$

式中： P_{it} 为机组*i*在*t*时段的出力； P_i^{max} 、 P_i^{min} 分别为机组*i*的出力上、下限。

机组出力分段约束。

$$P_{it} = \sum_{n=1}^N P_{in}, \forall i, t \quad (40)$$

$$0 \leq P_{in} \leq P_{in}^{\max}, \forall i, t, n \quad (41)$$

式中： N 为火电机组燃料成本函数线性化之后的分段数； P_{in} 为机组 i 在 t 时段在分段 n 上的出力； P_{in}^{\max} 为机组 i 在分段 n 上的最大出力。

机组启停时间约束。

$$\begin{cases} I_{it} - I_{it-1} \leq I_{it}, \\ \forall \tau \in [t+1, \min\{N_T, t + t_{upi}^{\min} - 1\}] \\ I_{it-1} - I_{it} \leq 1 - I_{it}, \\ \forall \tau \in [t+1, \min\{N_T, t + t_{dwi}^{\min} - 1\}] \end{cases} \quad (42)$$

式中 t_{upi}^{\min} 、 t_{dwi}^{\min} 分别为机组 i 的最小启停机时间。

3 模型的重构与求解

3.1 电动汽车模型线性化

1.1 节中的电动汽车充电模型中，约束式(3)为非线性约束，存在模型难以求解的问题；约束式(4)计算的为电动汽车在停靠充电桩的起止时间范围内的净充电量，仅适用于电动汽车只有一个可控时段的情况。因此将电动汽车的充放电功率用一个决策变量 P_{jt} 表示， $P_{jt} < 0$ 表示电动汽车向电网放电， $P_{jt} > 0$ 表示电动汽车处于充电状态，省略约束式(3)，从而将模型线性化，并引入二进制参数 U_{jt} 。

对电动汽车的充放电功率范围作合理假设，即最大充电功率等于最大放电功率，则电动汽车的功率范围约束变为

$$-P_{j,\max} U_{jt} \leq P_{jt} \leq P_{j,\max} U_{jt} \quad (43)$$

$$\begin{cases} U_{jt} = 1, t \in [t_j^{\text{in}}, t_j^{\text{out}}] \\ U_{jt} = 0, t \notin [t_j^{\text{in}}, t_j^{\text{out}}] \end{cases} \quad (44)$$

式中： P_{jt} 为电动汽车 j 在 t 时段的功率； $P_{j,\max}$ 为电动汽车的最大功率； $U_{jt} = 1$ 表示电动汽车接入充电桩； $U_{jt} = 0$ 表示电动汽车未接入充电桩。

对于一天内有任意个可控时段的电动汽车，其每时段的电池电量值变化约束为

$$E_{jt} = E_{jt-1} + P_{jt} U_{jt} \Delta t \quad (45)$$

$$E_{jt} = E_j^{\text{init}}, t = t_j^{\text{in}} \quad (46)$$

$$E_j^{\text{min}} \leq E_{jt} \leq E_j^{\text{max}} \quad (47)$$

式中： E_{jt} 为电动汽车 j 在 t 时段的电池电量值； E_j^{init} 为电动汽车接入充电桩时的初始电量值； E_j^{max} 、 E_j^{min} 分别为电动汽车 j 的电池电量上、下限。

每辆电动汽车在离开充电桩时需要满足电动汽车用户设定的能量需求，因而有：

$$E_{jt} \geq E_j^{\text{req}}, t = t_j^{\text{out}} \quad (48)$$

式中 E_j^{req} 为电动汽车用户设定的电量需求值。

此外，大规模电动汽车具有变量庞大、求解困难等特点，因此，考虑采用“约束归类”将 N 辆电动汽车进行归类^[27]，从而减少变量数目，降低模型求解时间。

3.2 两阶段约束处理

2.2 节中的一、二阶段之间存在以下关联约束。

火电机组场景值与调度值及调频量的关系：

$$P_{its} = P_{it} + P_{its}^{\text{ru}} - P_{its}^{\text{rd}} \quad (49)$$

式(49)表示，机组在场景 s 下的出力为机组日前出力与场景调频量之和。

电动汽车群场景值与调度值及调频量的关系：

$$P_{mts} = P_{mt} - P_{mts}^{\text{ru}} + P_{mts}^{\text{rd}} \quad (50)$$

为使系统在各场景下都有足够的调频容量，且机组调频量在其爬坡范围以内，机组的调频调度应满足以下约束：

$$0 \leq P_{its}^{\text{ru}} \leq \min\{P_{it}^{\text{ru}}, r_i^{\text{up}}\} \quad (51)$$

$$0 \leq P_{its}^{\text{rd}} \leq \min\{P_{it}^{\text{rd}}, r_i^{\text{dn}}\} \quad (52)$$

同理，由于电动汽车无爬坡限制，其调频调度仅需满足以下约束：

$$0 \leq P_{mts}^{\text{ru}} \leq P_{mt}^{\text{ru}} \quad (53)$$

$$0 \leq P_{mts}^{\text{rd}} \leq P_{mt}^{\text{rd}} \quad (54)$$

通过上述处理，可将原两阶段随机优化调度模型视为一个一阶段混合整数线性规划问题(mixed integer linear programming, MILP)，从而采用 Cplex 进行求解。

4 算例分析

4.1 参数的设定

本文基于 IEEE 10 机 39 节点系统、Elia 电网^[31]的历史负荷数据以及广东电网的历史调频信号数据，对考虑用户积极性的电动汽车与机组联合调频的两阶段随机规划调度模型的有效性进行分析。为使负荷数据符合系统规模，将负荷数据缩小为原来的 0.25 倍。参与 V2G 的电动汽车车辆规模及电池容量、额定功率等相关参数详见文献^[32]。

将广东电网的历史调频信号数据除以最大频率偏差±0.2Hz 归一化处理后作为输入，采用文献^[33]中的方法生成 500 组随机场景，并通过场景削减方法削减至 20 组随机场景。调频信号实际预测值与得到的 20 组调频场景各时段的最大、最小调频信

号曲线如图 1 所示。

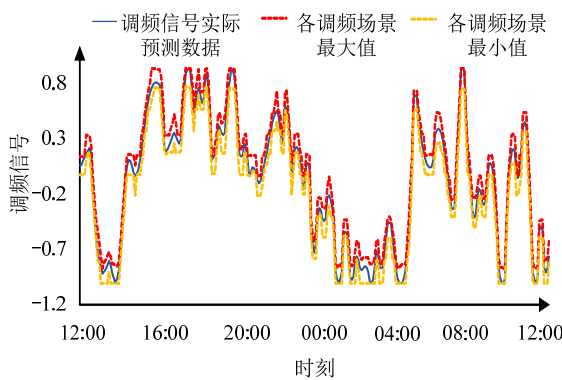


图 1 调频信号场景

Fig. 1 Scenarios of regulation signal

从图 1 可以看出，调频实际预测值在调频场景各时段最大、最小调频信号内，即削减后的 20 组场景能覆盖调频信号的实际预测值，且能较好地模拟调频信号在临近时段的相关性。

在不影响用户用车行为的前提下，电动汽车次日的充放电行为只受自身用电需求的影响，其充电起始时刻服从 Poisson 分布^[32]，而电动汽车次日的可控时段则通过标准正态分布随机生成，如表 1 所示。

表 1 电动汽车次日可控时段分布参数

Table 1 Distribution parameters of EVs' controllable periods in the next day

上午上班停		下午上班停		晚上回家停	
起始	终止	起始	终止	起始	终止
(8,0.25)	(11,0.25)	(14,0.25)	(17,0.25)	(18,0.25)	(7,0.25)

注：(a,b)中 a、b 分别为均值和方差。

表 2 3 种情况的两阶段调度结果

Table 2 Dispatch results of two-stage model for 3 cases

算例	总成本/\$	火电机组成本/\$					电动汽车成本/\$				参与调频的 EV 数/辆
		火电燃料成本	开机成本	火电上调频容量成本	火电下调频容量成本	火电调频调度成本	EV 上调频容量成本	EV 下调频容量成本	EV 充电成本	EV 电池退化成本	
Case 1	949470	903019	3040	19796	21628	1510	NA	NA	477	NA	NA
Case 2	968504	897758	3040	NA	NA	NA	31857	34090	477	1320	13755
Case 3	947293	899337	3040	17094	17335	896	3940	4859	477	315	5000

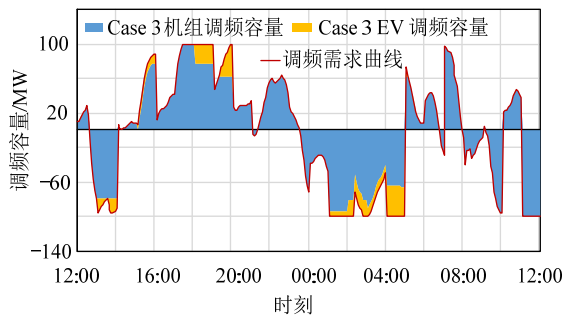


图 2 机组与 EV 的调频容量对比

Fig. 2 Comparison results for upward/downward regulation capacity between units and EVs

量远小于机组所提供的调频容量，一天中的大部时段所需的调频容量仅由机组提供，少部分时段由分

4.2 两阶段调度结果分析

在 Matlab 平台上调用 Cplex 优化软件对上述两阶段随机规划调度模型进行求解。

设定以下 3 种情况分析考虑电动汽车参与调频对二阶段随机规划调度模型结果的影响。

Case 1: 仅由机组完成调频。

Case 2: 仅由 EV 完成调频。

Case 3: 机组与 EV 联合调频。

表 2 给出了 Case 1、Case 2 及 Case 3 的总成本及火电机组和电动汽车的各项费用成本。对比结果表明，Case 3 的总成本比 Case 1 低 2177\$，比 Case 2 低 21211\$。从算例的各项成本来看，Case 1 与 Case 3 的机组开机成本和 EV 充电成本相同，主要的差异在于燃料成本及调频容量成本上。虽然 EV 的调频价格高于机组导致 Case 3 的调频成本高于 Case 1，但是由于 EV 分担了机组承担的调频量而降低了 4296\$ 的机组煤耗成本及调频调度成本，因此 Case 3 的总成本低于 Case 1。此外，由于单辆 EV 的容量远小于机组，若由 EV 单独调频并达到 Case 3 中的调频量，所需的 EV 数为联合调频中所需 EV 数的 2.751 倍，且调频成本比联合调频高 21823\$。Case 3 基于生成的调频信号场景集得出的机组与电动汽车各时段提供的上、下调频容量结果及调频需求如图 2 所示。

从图 2 可以看出，Case 3 中的调频需求量由机组和 EV 共同提供，且两者的调频容量总和等于调频需求值。此外，Case 3 中，EV 所提供的调频容

量和 EV 共同提供，如 19:00、20:00、02:00、04:00 等时段。

选取可控时间为 13:00—16:00、18:00—次日 06:00 的电动汽车群，其在 Case 1 和 Case 3 中的电池电量变化曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出，在电动汽车接入充电桩的时段内，Case 1 中电动汽车的电池电量相较于 Case 3 更早地达到满足其出行需求的电量值。这是由于 Case 3 中的电动汽车参与提供调频辅助服务而在一些时段削减了充电功率。电动汽车未接入充电桩的时段内的电池耗电曲线未在本文考虑范围内，这些时段的电量值仅表示电动汽车在离开充电桩时充

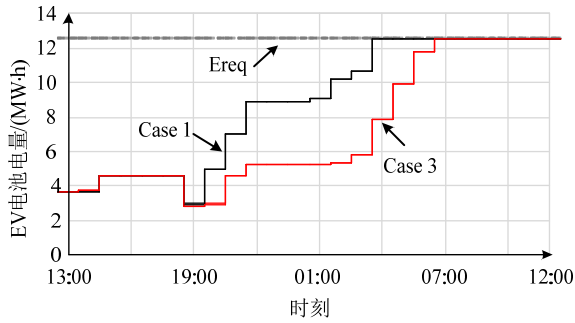


图3 Case 1与Case 3的EV电池电量曲线
Fig. 3 Electric vehicle battery charge curves of Case 1 and Case 3

电达到的电量。此外, Case 1和Case 3中的电动汽车均在其离开充电桩前充电至用户设定的需求电量值,说明EV参与调频可满足用户出行需求。

为明确Case 3中出现电动汽车与机组联合调频的原因,选取了20:00进行分析。Case 3中20:00内各5min时段机组与电动汽车提供的调频容量如图4所示。

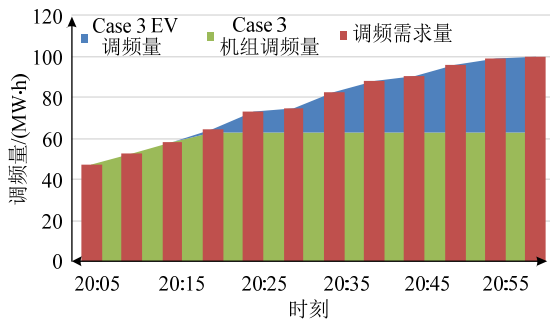


图4 20:00内机组与电动汽车的调频量对比
Fig. 4 Comparison results for regulation capacity of the units and EVs at 20:00

从图4可以看出,20:00内12个时段的调频需求量逐渐增大,在20:00—20:20,机组提供的调频量随着调频需求的增大也逐渐增大,且在20:20,电动汽车开始参与调频;在20:25—21:00,机组提供的调频量不再随着调频需求的增大而增大,而是由电动汽车来完成机组调频不足的部分。这是由于虽然机组每小时能提供的调频容量很大,但由于其存在爬坡约束,限制机组在小时内各5min时段所能提供的调频容量,机组提供的调频容量在达到其上限后,无法继续增大。

算例设置机组4、5、7、10的单位出力煤耗成本低于其他机组。表3给出了20:00内Case 1和Case 3中各机组的调频量及机组出力情况。可以看出,从总成本最优的角度出发,Case 3中的4、5、7、10机组优先达到了其出力最大值,无法提供上调频,而其他机组从20:20起提供的上调频量均达到了机组5min内的最大爬坡量,因此机组的总调频

量不再增大,调频不足的部分由电动汽车完成。Case 1中由于只有机组提供调频量,而为了使机组在20:20后这些调频需求量比较大的时段具有足够的爬坡量以满足调频需求,将机组4、5、7、10的部分出力转移至其他煤耗成本较高的机组上。综合Case 1和Case 3可以得出,合理利用电动汽车辅助机组提供调频服务可以提高调度计划的经济性。

表3 2种情况的机组调频及出力情况
Table 3 Units regulation capacity and output for Case 1 and Case 3

机组编号	Case 1		Case 3	
	是否参与调频	是否达到机组出力上限	是否参与调频	是否达到机组出力上限
1	√		√	
2	√		√	
3	√		√	
4	√			√
5	√			√
6	√		√	
7	√			√
8	√		√	
9	√		√	
10	√			√

为分析Case 3中电动汽车参与调频对电动汽车用户自身的影响,选取可控时段为14:00—16:00的电动汽车群分析其在14:00—16:00内的调频量、充电功率及电池电量变化如图5所示。

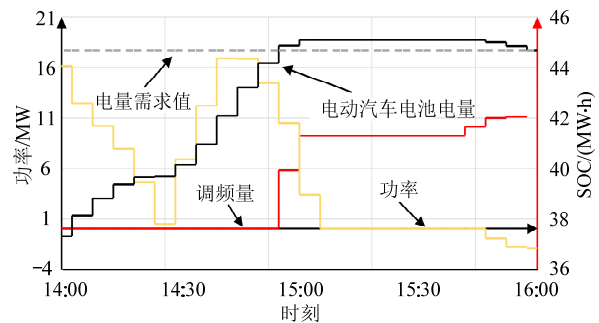


图5 电动汽车群调频量、功率、电池电量曲线
Fig. 5 Regulation capacity, charging power, battery charge curves of EVs

从图5可以看出,该电动汽车群在其可控时段内向电网提供上调频服务,即削减充电功率或向电网放电。在14:00—15:00时段,电动汽车不参与调频,仅接受电网调度进行充电,并在15:00达到了其用户设定的出行需求电量值。在15:05,电动汽车群开始提供上调频服务,其充电功率有所削减并在15:10削减至0。在15:50—16:00时段,随着上调频需求量的增大,电动汽车群向电网放电,由于电动汽车群仅能在满足用户设定的出行所需最低电量值的前提下向电网放电,因此,该电动汽车群在离开充电桩时刻前,即16:00,最多可放电至

45.55MW·h, 且在离开充电桩后不受电网调度, 无法提供调频服务。

综合上述分析可以得出, 虽然机组每小时能提供的调频容量很大, 但由于爬坡约束的存在, 限制了机组在小时内每 5min 提供的实际调频量, 适合提供小容量长时间的连续调频服务; 电动汽车虽没有这类约束, 但其电池总容量较小, 且受用户对电动汽车的使用自主性影响, 适合提供大容量短时间的间断调频服务。此外, 引入电动汽车参与辅助机组调频并给予相应补偿, 不仅降低了机组侧的成本, 还激励了电动汽车用户自主参与提供辅助服务, 有效提高了调度计划的经济性。

4.3 EV 用户积极性灵敏度分析

为分析 EV 调频补偿价格对 EV 用户参与辅助服务积极性的影响, 以 Case 3 为例, 在目标函数中增加一项电动汽车延迟充电的用户满意度惩罚, 设置不同的调频补偿价格, 统计调度总成本、EV 总调频容量补偿价格递增的变化曲线, 结果如图 6 所示。

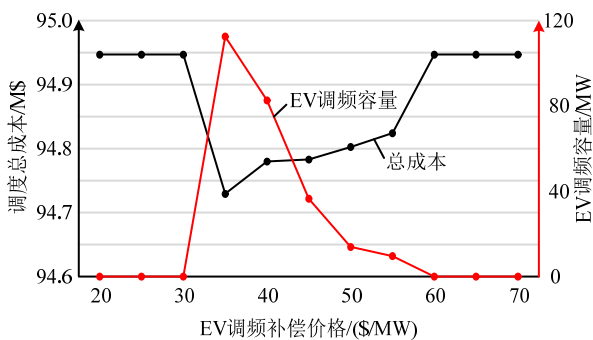


图 6 电动汽车调频补偿价格灵敏度分析
Fig. 6 Sensitivity analysis of EV regulation compensation price

从图 6 可以看出, 当补偿价格小于等于 30\$/MW 时, 由于电动汽车调频收益低于用户的充电满意度惩罚成本, 电动汽车不参与提供辅助服务。当补偿价格大于等于 35\$/MW 时, EV 用户开始参与响应, 且在 35\$/MW 提供的调频容量最大, 此时总成本最低。随着补偿价格的增大, 为满足系统调频经济性要求, EV 提供的调频容量不断减小, 总成本也不断增大, 直至补偿价格增大到 60\$/MW, 由于 EV 调频成本过高, 不再采用 EV 参与响应。因此, 在考虑需求侧参与辅助服务时, 应根据算例的变量规模、总成本随补偿价格的变化规律来确定合适的补偿价格取值。

5 结论

针对用户侧参与提供调频辅助服务, 本文以调频信号动态场景集为输入, 提出了一种考虑用户积

极性的电动汽车与机组联合调频的两阶段随机优化调度模型, 以实现机组与 EV 调频容量与调频速度的优势互补。IEEE 39 节点系统的仿真结果表明:

1) 机组与电动汽车联合提供调频辅助服务, 可以实现机组调频容量大、调频速度慢及电动汽车调频容量小、调频速度快的优势互补, 更好地满足系统的调频需求。

2) 电动汽车在接入充电桩时受电网的直接控制, 增加了系统可调资源的容量, 可以减少机组侧的成本。

3) 对电动汽车的调频成本补偿, 可激励电动汽车用户自主参与响应, 提高系统调频调度的经济性, 此外, 应根据实际情况确定合适的电动汽车调频补偿价格取值, 实现机组与电动汽车联合调频效益最大化。

参考文献

- [1] 葛晓琳, 金言, 夏澍, 等. 面向调峰调频需求的风水火电协调优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3917-3925.
GE Xiaolin, JIN Yan, XIA Shu, et al. A coordinated optimization scheduling of wind-hydro-thermal power system based on requirement of peak load and frequency regulation[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3917-3925(in Chinese).
- [2] 劳焕景, 张黎, 宋鹏程, 等. 一种考虑最优状态动态恢复的风电持续调频策略[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4504-4512.
LAO Huanjing, ZHANG Li, SONG Pengcheng, et al. Wind power sustained frequency regulation strategy with dynamic optimized state recovery behavior[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4504-4512(in Chinese).
- [3] 刘洋, 邵广惠, 张弘鹏, 等. 新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 683-689.
LIU Yang, SHAO Guanghui, ZHANG Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 683-689(in Chinese).
- [4] 马晓伟, 徐海超, 刘鑫, 等. 适用于西北送端大电网新能源场站快速频率响应功能的入网试验方法[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1384-1391.
MA Xiaowei, XU Haichao, LIU Xin, et al. A test method for fast frequency response function of renewable energy stations in northwest power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1384-1391(in Chinese).
- [5] U.S. Department of Energy. Grid energy storage[R]. Washington DC: U.S. Department of Energy, 2013.
- [6] MILLER N W, SHAO M, VENKATARAMAN S, et al. Frequency response of California and WECC under high wind and solar conditions[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego: IEEE, 2012: 1-8.
- [7] 胡泽春, 罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 2-15.
HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 2-15(in Chinese).
- [8] 廖金龙, 陈波, 丁宁, 等. 考虑一次调频能力的火电机组负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 168-174.

- LIAO Jinlong, CHEN Bo, DING Ning, et al. Load optimal distribution of thermal units considering primary frequency control ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 168-174(in Chinese).
- [9] 董伟杰, 白晓民, 朱宁辉, 等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1265-1271.
DONG Weijie, BAI Xiaomin, ZHU Ninghui, et al. Discussion on the power quality under grid-connection of intermittent power sources[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1265-1271(in Chinese).
- [10] SADEGHI-MOBARAKEH A, MOHSENIAN-RAD H. Optimal bidding in performance-based regulation markets: an MPEC analysis with system dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1282-1292.
- [11] KO K S, HAN S, SUNG D K. A new mileage payment for EV aggregators with varying delays in frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2616-2624.
- [12] 王玉山, 雷为民, 李胜. 京津唐电网一次调频投入现状及存在问题分析[J]. 华北电力技术, 2006(3): 1-3, 10.
WANG Yushan, LEI Weimin, LI Sheng. Present situation and existing problems on putting primary frequency control function into Beijing-Tianjin-Tangshan grid[J]. North China Electric Power, 2006(3): 1-3, 10(in Chinese).
- [13] 廖金龙. 大功率火电机组一次调频能力建模与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [14] XU Zhao, OSTERGAARD J, TOGEBY M. Demand as frequency controlled reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1062-1071.
- [15] International Energy Agency. Global electric vehicle outlook 2021[R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [16] YAO Enxin, WONG V W S, SCHOBBER R. Robust frequency regulation capacity scheduling algorithm for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 984-997.
- [17] YAO Enxin, WONG V W S, SCHOBBER R. Optimization of aggregate capacity of PEVs for frequency regulation service in day-ahead market[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3519-3529.
- [18] HOOGVLIET T W, LITJENS G B M A, VAN SARK W G J H M. Provision of regulating-and reserve power by electric vehicle owners in the Dutch market[J]. Applied Energy, 2017, 190: 1008-1019.
- [19] 徐杰彦, 刘皓明, 袁晓玲. 电动汽车参与电网调频集中调度策略可行性研究[C]//2015年中国电机工程学会年会论文集. 武汉: 中国电机工程学会, 2015: 1-7.
- [20] 师瑞峰, 李少鹏. 电动汽车V2G问题研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 28-37.
SHI Ruifeng, LI Shaopeng. Review on studies of V2G problem in electric vehicles[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 28-37(in Chinese).
- [21] KE Xinda, WU Di, LU Ning. A real-time greedy-index dispatching policy for using PEVs to provide frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 864-877.
- [22] CHEN Xiangyu, LEUNG K C. Non-cooperative and cooperative optimization of scheduling with vehicle-to-grid regulation services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 114-130.
- [23] VATANDOUST B, AHMADIAN A, GOLKAR M A. Stochastic copula-based multivariate modeling of plug-in hybrid electric vehicles load demand in residential distribution network[C]//2016 Smart Grids Conference (SGC). Kerman: IEEE, 2016: 1-7.
- [24] ZHONG Jin, HE Lina, LI Canbing, et al. Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation[J]. Applied Energy, 2014, 123: 253-262.
- [25] 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.
YUAN Guili, SU Weifang. Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548(in Chinese).
- [26] 李家壮, 艾欣, 胡俊杰. 电动汽车参与电网二次调频建模与控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 495-503.
LI Jiazhuang, AI Xin, HU Junjie. Supplementary frequency regulation modeling and control strategy with electric vehicles[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 495-503(in Chinese).
- [27] 项顶, 胡泽春, 宋永华, 等. 通过电动汽车与电网互动减少弃风的商业模式与日前优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6293-6303.
XIANG Ding, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Business model and day-ahead dispatch strategy to reduce wind power curtailment through vehicle-to-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6293-6303(in Chinese).
- [28] VATANDOUST B, AHMADIAN A, GOLKAR M A, et al. Risk-averse optimal bidding of electric vehicles and energy storage aggregator in day-ahead frequency regulation market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2036-2047.
- [29] BIRGE J R, LOUVEAUX F. Introduction to stochastic programming[M]. New York: Springer, 1997.
- [30] PJM. PJM manual 12: Balancing operations[EB/OL]. [2020-12-20] (2018-04-20). <https://www.pjm.com/-/media/documents/manuals/ml2.ashx>.
- [31] Elia grid load[EB/OL]. [2020-12-20] (2016-09-01). <http://www.elia.be/en/grid-data/>.
- [32] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与V2G的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 15-25.
XIANG Ding, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 15-25(in Chinese).
- [33] ZHANG Menglin, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. A systematic approach for the joint dispatch of energy and reserve incorporating demand response[J]. Applied Energy, 2018, 230: 1279-1291.



许梦瑶

在线出版日期: 2021-08-09.

收稿日期: 2021-05-20.

作者简介:

许梦瑶(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与多时间尺度协同调度, E-mail: myxu@hust.edu.cn;

艾小猛(1986), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为鲁棒优化理论在综合能源系统中的应用、可再生能源并网优化运行等, E-mail: xiaomengai@hust.edu.cn;

方家琨(1985), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为储能电力系统中的应用、可再生能源并网和能源网络优化运行等, E-mail: jfa@hust.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)