

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230747

电动汽车协助火电机组参与调频辅助服务优化控制策略

程杉¹, 李泮洋¹, 刘炜炜¹, 李懋², 王灿¹

(1. 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 国家电网国际发展有限公司, 北京 100031)

摘要: 高比例可再生能源接入电网使得系统频率控制难度提升, 电力系统二次调频面临新的挑战。为此, 提出一种电动汽车(electric vehicle, EV)协助火电调频机组参与辅助服务市场的优化控制策略。在调频指令分配比例优化阶段, 考虑调频成本及电池补偿成本, 最大化调频商收益为目标, 提出滚动优化控制策略。在EV充电站响应阶段, 考虑站内各EV荷电状态及可调容量, 采用分区分级动态调节充放电功率控制方法响应调频责任。最后, 搭建含EV电站的两区域互联电力系统模型, 对该调频策略的性能及经济性进行仿真分析。结果表明, 所提策略有效降低了频率响应偏差, 同时提高了调频商的经济收益。

关键词: 电动汽车; 调频; 辅助服务市场; 响应偏差

Optimal control strategy of thermal power units with electric vehicles participating in frequency regulation auxiliary services

CHENG Shan¹, LI Fengyang¹, LIU Weiwei¹, LI Mao², WANG Can¹

(1. Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. State Grid International Development Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: System frequency control is difficult in power grids with high proportion of renewable energy, and the secondary frequency regulation of the power system faces new challenges. Therefore, an optimal control strategy of thermal power units with electric vehicles (EV) participating in the auxiliary service market is proposed. In the optimization stage of frequency regulation command distribution ratio, this paper considers the frequency modulation cost and the compensation cost of batteries. With the goal of maximizing the revenue of frequency modulation agents, a rolling optimization control strategy is proposed. In the response stage of the EV charging station, this paper considers the state of charge and adjustable capacity of each EV in the station. Then a dynamic adjustment of charging and discharging power control method with zones and priorities is adopted to respond to the frequency regulation requirement. Finally, a two-region interconnected power system model with EV power stations is constructed to simulate and analyze the performance and economy of this strategy. The results show that the strategy proposed greatly reduces frequency response bias and improves the economic benefits of frequency modulation agents.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107108).

Key words: electric vehicles; frequency regulation; ancillary services market; response bias

0 引言

我国提出“30·60”双碳目标, 加快构建以新能源为主体的新型电力系统^[1-4], 风电、光伏等新能

源发电得到迅速发展, 但由于新能源发电出力的间歇性、波动性等特性显著^[5-6], 造成电力系统频率波动大, 控制难度高, 因此调频成为一个亟需解决的问题。

电力系统频率调整需根据电网实时运行状态进行, 传统方法是通过调节发电机组出力以响应调节需求^[7], 但会使得机组偏离最佳运行点, 增加机组设备磨损, 且存在无法快速响应频率变化^[8-10]、碳

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107108); 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验研究项目资助(2020DLXY01)

排量无法准确控制等问题^[11]。因此,为更好地应对电网频率波动问题,通过增加调频备用资源类型,提高调频备用容量逐渐成为电网调频的重要手段。

电动汽车(electric vehicle, EV)在国家的大力支持下发展迅猛,截至2022年底,纯EV保有量达1045万辆^[12]。大规模EV可以看作一个巨大的可移动储能电源,加之近年来车网互动(vehicle to grid, V2G)技术逐渐成熟,通过对EV充放电功率进行控制,使能量在网荷之间双向流动,从而实现电网调峰^[13]、调频^[14-15]等功能。目前,已有大量研究显示,EV有序充放电可以降低电网负荷的峰谷差,有效平抑负荷波动,提高电网运行的安全性与经济性^[16-18],而对EV提供调频辅助服务的研究较少。文献[19]提出V2G技术概念与框架,为EV参与电网调峰调频等提供了技术基础。文献[20]考虑EV的充放电静态频率特性,将其作为分布式电源与可控负荷参与电网调频,从而降低电网频率波动。文献[21]采用无模型自适应滑模控制技术,利用EV响应的快速性对高频偏差信号进行响应。文献[22]将V2G技术与虚拟同步控制策略相结合,对EV充电功率及时调整,以实现调频调压的效果。上述文献均仅针对如何改进控制器降低频率偏差进行研究,未考虑EV的荷电状态(state of charge, SOC),忽略了用户的出行需求。

而EV作为需求侧调频资源,参与辅助服务市场会产生调频成本问题,对此,文献[23]考虑EV的SOC限制、调频成本及用户电量需求,得出EV提供调频辅助服务时的最优充放电策略。文献[24]考虑EV延迟充电及电池补偿成本,提出了一种基于调频成本分摊机制的EV参与电网调频的调度策略,结果表明EV参与调频有利可图。文献[25]将EV应用于电能量市场和调频辅助服务市场,对负荷削峰填谷的同时降低了调频成本。文献[26]考虑EV用户参与积极性,对其进行用户充电成本及电池退化成本补偿,采用EV与机组联合调频模型,实现EV与机组联合调频的收益最大化,但未对系统频率偏差进行验证分析。文献[27]考虑EV调频性能,提出参与日前能量市场和调频辅助服务市场的协同优化策略,采用单向输电模式,验证了EV可以很好地响应频率正偏差,但对于系统频率负偏差无法准确调节。

综上所述,本文提出一种EV协助火电调频机组参与辅助服务市场的优化控制策略。该策略分两阶段完成调频指令响应:在各调频机组分配比例优化阶段,以调频商收益最大为目标,以1min为滚动优化时段,优化调频指令在火电机组与EV电站

之间的分摊比例。在EV电站响应阶段,依据站内各EV的SOC,采用分区级动态调节充放电功率控制方法予以响应。最后,通过两区域电力系统仿真模型验证所提策略的有效性及其经济性。

1 EV参与辅助服务

1.1 EV协助火电机组参与调频框架

EV协助火电机组参与辅助服务框架如图1所示。电网调度中心通过数据采集与监测系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)对电网状态进行实时监测,获取电网频率、电压、联络线功率等运行数据,计算区域控制误差(area control error, ACE)后产生调频信号,ACE信号经计算后得出区域控制需求(area regulation requirement, ARR)并发送给调频商。调频商依据上报的调频容量,采用功率优化控制策略进行合理分配,将ARR发送给各调频机组控制系统,以控制其执行响应指令,彼此协同配合,以实现系统频率稳定。同时,各控制系统执行后将各自的状态信息(如充放电功率、荷电状态、可调容量等)反馈给调频商,为下一阶段的调频功率分配做准备。

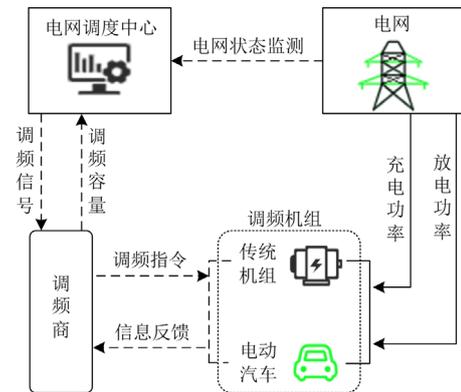


图1 EV参与辅助服务框架图

Fig. 1 Diagram of EV participating in ancillary services

1.2 EV与调频机组响应模型

本文搭建两区域互联电力系统仿真模型,在每一区域内配置一台具备调频能力的火电机组,一个EV聚合控制系统,在每一区域中以负荷扰动与新能源出力扰动为扰动输入,此处以风电为例,模拟电网频率波动。具体调频模型如图2所示。

图2中,以区域1为例, B_1 为区域内频率偏差系数; R 为机组调频调差参数; M_1 为机组转动惯量; D_1 为区域1内负荷阻尼系数; $\Delta P_{L1}(s)$ 为区域1负荷扰动; $\Delta P_{Pw1}(s)$ 为区域1风机出力波动; $\Delta f_1(s)$ 、 $\Delta f_2(s)$ 分别为区域1、区域2的频率偏差; $\Delta P_{g1}(s)$ 、

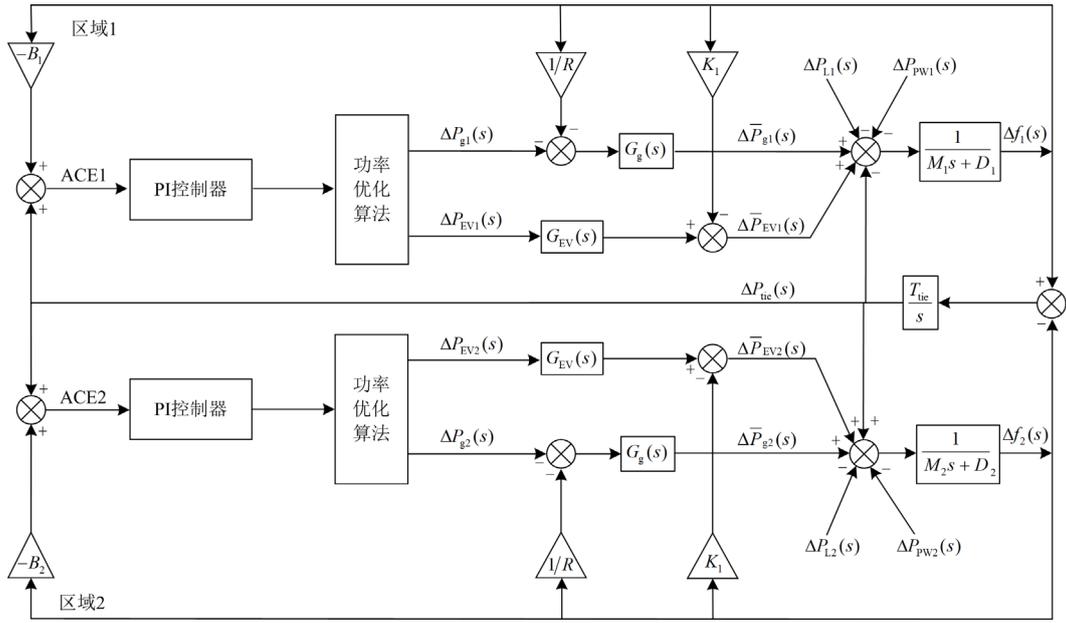


图 2 含 EV 的两区域互联电力系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of two-area interconnected power system with EV

$\Delta P_{EV1}(s)$ 分别为分配给火电机组、EV 电站的功率调整量； $\Delta P_{tie}(s)$ 为联络线功率波动量； $\Delta \bar{P}_{g1}(s)$ 、 $\Delta \bar{P}_{EV1}(s)$ 分别为参与二次调频出力调整量； $G_g(s)$ 、 $G_{EV}(s)$ 分别为火电机组、EV 电站模型。模型表达式为

$$\Delta f_1(s) = [\Delta P_{g1}(s) + \Delta P_{EV1}(s) - \Delta P_{L1}(s) - \Delta P_{PW1}(s) - \Delta P_{tie}(s)] / (M_1 s + D_1) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta \bar{P}_{g1}(s) = [-\frac{\Delta f_1(s)}{R} - \Delta P_{g1}(s)] G_g(s) \\ \Delta \bar{P}_{EV1}(s) = \Delta P_{EV1}(s) G_{EV}(s) \\ \Delta P_{tie}(s) = [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \frac{T_{tie}}{s} \end{cases} \quad (2)$$

式中， T_{tie} 为联络线功率系数。其中，火电机组、EV 电站模型为

$$\begin{cases} G_g(s) = \frac{1}{(1 + T_g s)(1 + T_{CH} s)} \\ G_{EV}(s) = \frac{K_{EV}}{1 + T_{EV} s} \end{cases} \quad (3)$$

式中： T_g 、 T_{CH} 分别为火电机组调速器、汽轮机时间常数； T_{EV} 为 EV 功率转换时间常数； K_{EV} 为 EV 对应增益。

当系统受到单位负荷、风电扰动时，区域 1 内 ACE 调频信号 $\xi_{ACE1}(s)$ 计算如式(4)所示。

$$\xi_{ACE1}(s) = -B_1 \Delta f_1(s) \quad (4)$$

区域 2 内模型同理可得，此处不再赘述。

2 含 EV 的调频指令响应控制策略

电网调度中心得出 ACE 调频信号后，经 PI 控制器转换得出 ARR 并发送给调频商，调频商根据分配的 ARR，制定合理经济的调频策略分别对 EV 电站与发电机组进行功率调整，从而实现系统调频。为此，本文提出一种考虑用户充电需求的动态仿真滚动优化策略，以每分钟为一个调频时段，根据调节指令优化分配比例以实现系统频率稳定。火电机组与 EV 电站分配 ARR 的具体表达式为

$$\begin{cases} \Delta P_{EV\omega}^{up}(t) = \alpha^{up} P_{ARR}^{up}(t) \\ \Delta P_g^{up}(t) = (1 - \alpha^{up}) P_{ARR}^{up}(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{EV\omega}^{down}(t) = \alpha^{down} P_{ARR}^{down}(t) \\ \Delta P_g^{down}(t) = (1 - \alpha^{down}) P_{ARR}^{down}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\Delta P_{EV\omega}^{up}(t)$ 、 $\Delta P_{EV\omega}^{down}(t)$ 分别表示 ω 区间内车辆承担的上、下调频责任，具体分区情况见 2.2 节所述； α^{up} 、 α^{down} 分别为 EV 电站承担的上、下调频责任比例； $P_{ARR}^{up}(t)$ 、 $P_{ARR}^{down}(t)$ 分别为 t 时刻系统所需的上、下 ARR； $\Delta P_g^{up}(t)$ 、 $\Delta P_g^{down}(t)$ 分别为火电机组承担的上、下调频责任。

2.1 各调频机组分配比例优化阶段

本文采用滚动优化计算方法，优化 1 min 调频指令分配比例，进而分配出力大小，每过一个时段

后进行下一时段的优化计算, 并不断重复, 以实现调频的持续优化。调频商提供调频辅助服务, 会产生调频容量收益 F_{rc} 及调频里程收益 F_{rm} , 计算式分别为

$$F_{rc}(t) = [\Delta C_g(t) + \Delta C_{EV}(t)]r_{rc}(t) \quad (7)$$

$$F_{rm}(t) = [|\Delta P_{EV\omega}^{up}(t)|r_{rm}^{up}(t) + |\Delta P_{EV\omega}^{down}(t)|r_{rm}^{down}(t)]\delta_{EV} + [|\Delta P_g^{up}(t)|r_{rm}^{up}(t) + |\Delta P_g^{down}(t)|r_{rm}^{down}(t)]\delta_g \quad (8)$$

式中: $\Delta C_g(t)$ 、 $\Delta C_{EV}(t)$ 分别为 t 时段火电机组、EV 电站可提供的调频容量; $r_{rc}(t)$ 为 t 时段的容量价格; $r_{rm}^{up}(t)$ 和 $r_{rm}^{down}(t)$ 分别为向上、向下调频里程价格; δ_g 、 δ_{EV} 分别为火电机组、EV 电站的调频性能。

在优化控制中, 考虑发电机组功率偏移成本、EV 电池补偿成本等, 建立成本函数评价调频经济性, 以调频成本为优化目标保证在单个周期内调频分配的经济性最佳。

传统发电机组的调频成本主要是由于参与调频使得机组脱离最佳运行状态, 导致发电效率降低, 因此本文采用机组功率偏移的二次函数^[28]表示机组调频成本, 如式(9)所示。

$$F_g(t) = b_g[\Delta P_g^{up}(t) + \Delta P_g^{down}(t)]^2 \quad (9)$$

式中: $F_g(t)$ 为 t 时刻火电机组的调频成本; b_g 为火电机组频率偏移而造成增加调频成本的权重系数, 取 3 元/MW²。

EV 参与 V2G, 在调度时段内可能会经历多次充放电而造成电池使用寿命不断衰减, 计算 EV 在一个调度时段内的电池补偿成本^[29] F_{bat} 为

$$F_{bat}(t) = b_{EV}E \sum_{i=1}^n [S_{EV,i}^{real}(t) - S_{EV,i}^{real}(t-1)] \quad (10)$$

式中: b_{EV} 为 EV 电池寿命衰减的惩罚价格系数, 取 15 元/MW; E 为 EV 电池额定容量; $S_{EV,i}^{real}(t)$ 为 t 时刻第 i 辆 EV 的 SOC。

故以 t 时刻总体收益最大为目标, 调频目标函数如式(11)所示。

$$\max[F_{rc}(t) + F_{rm}(t) - F_g(t) - F_{bat}(t)] \quad (11)$$

2.2 各调频机组响应阶段

调频商利用 EV 参与调频时需要保证离网前达到期望 SOC, 通过采集每辆 EV 在网时间及初始 SOC, 将其分为 3 个区间。SOC 低于最低限值的为第一区间, 为紧急充电状态, 不参与电网调频, 以最大充电功率进行充电; SOC 高于最低限值且低于期望值之间的为第二区间, 通过调节此区间内 EV 充电桩输出功率, 使各车辆在最低充电功率与最大

充电功率之间变化, 以实现电网调频; SOC 高于期望值且低于最高值之间的为第三区间, 在响应指令时功率可充可放, 但会保证 EV 在参与调频放电时 SOC 仍高于期望值。3 个区间示意图如图 3 所示。



图 3 EV 荷电状态分区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of EV state of charge zoning

根据每辆 EV 所在区间 ω , 设置每辆 EV 最低充电功率 $P_{EV\omega,i}^{min,c}$, 计算式如式(12)所示。

$$P_{EV\omega,i}^{min,c} = \begin{cases} P_{EV}^{max,c}, & \omega = 1 \\ \frac{(S_{EV}^c - S_{EV\omega,i}^a)E}{100T_i\eta_{EV}^c}, & \omega = 2 \\ -P_{EV}^{max,c}, & \omega = 3 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{EV}^{max,c}$ 为 EV 最大充电功率; S_{EV}^c 为期望 SOC; $S_{EV\omega,i}^a$ 为第 i 辆 EV 的初始 SOC; T_i 为第 i 辆 EV 的在网时间; η_{EV}^c 为 EV 充电效率。

EV 电站 t 时刻提供的功率调整量可根据第二、三区间内车辆的实时功率及 SOC 值评估得出, EV 电站调频能力评估如式(13)—式(16)所示。

$$\Delta C_{EV2}^{up}(t) = \sum_{i=1}^{n_2} \min\{[P_{EV}^{max,c} - P_{EV2,i}^{real}(t-1)], \frac{[S_{EV}^c - S_{EV2,i}^{real}(t-1)]E}{100\eta_{EV}^c\Delta t} - P_{EV2,i}^{real}(t-1)\} \quad (13)$$

$$\Delta C_{EV2}^{down}(t) = \sum_{i=1}^{n_2} [P_{EV,i}^{min,c} - P_{EV2,i}^{real}(t-1)] \quad (14)$$

$$\Delta C_{EV3}^{up}(t) = \sum_{i=1}^{n_3} \min\{[P_{EV}^{max,c} - P_{EV3,i}^{real}(t-1)], \frac{[S_{EV}^{max} - S_{EV3,i}^{real}(t-1)]E}{100\eta_{EV}^c\Delta t} - P_{EV3,i}^{real}(t-1)\} \quad (15)$$

$$\Delta C_{EV3}^{down}(t) = \sum_{i=1}^{n_3} \max\{[P_{EV,i}^{max,d} - P_{EV3,i}^{real}(t-1)], \frac{[S_{EV}^c - S_{EV3,i}^{real}(t-1)]E\eta_{EV}^d}{100\Delta t} - P_{EV3,i}^{real}(t-1)\} \quad (16)$$

式中: $\Delta C_{EV\omega}^{up}(t)$ 、 $\Delta C_{EV\omega}^{down}(t)$ 分别为 t 时刻 EV 电站可增加、减少的调度容量; n_2 、 n_3 分别为第二、三区间内 EV 数量; $P_{EV\omega,i}^{real}(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻 ω 区间内第 i 辆 EV 的实时功率; $P_{EV,i}^{max,d}$ 为 EV 最大放电功率;

$S_{EV\omega,i}^{real}(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻第 i 辆 EV 的荷电状态, 其中 ω 取值为 2、3; S_{EV}^{max} 为 EV 最大荷电状态; Δt 为两个调频信号时间间隔; η_{EV}^d 为 EV 放电效率。

根据车辆所在区间, 设置 EV 响应指令的优先级, 如图 4 所示。当指令为下调指令, 响应优先级依次为: 降低第三区间充电功率、降低第二区间充电功率、提高第三区间放电功率, 直至指令完全响应; 当指令为上调指令时, 响应优先级则相反, 依次为: 降低第三区间放电功率、提高第二区间的充电功率、提高第三区间充电功率, 直至指令完全响应。响应指令时, 调频商根据各区间的可调度容量与优先级进行功率分配, 当某区间分配的上调频量为 $\Delta P_{EV\omega,q}^{up}(t)$ 或下调频量为 $\Delta P_{EV\omega,q}^{down}(t)$ 时, 根据各 EV 的功率可调制量按比例进行调节, 分配计算如式 (17) 和式 (18) 所示。

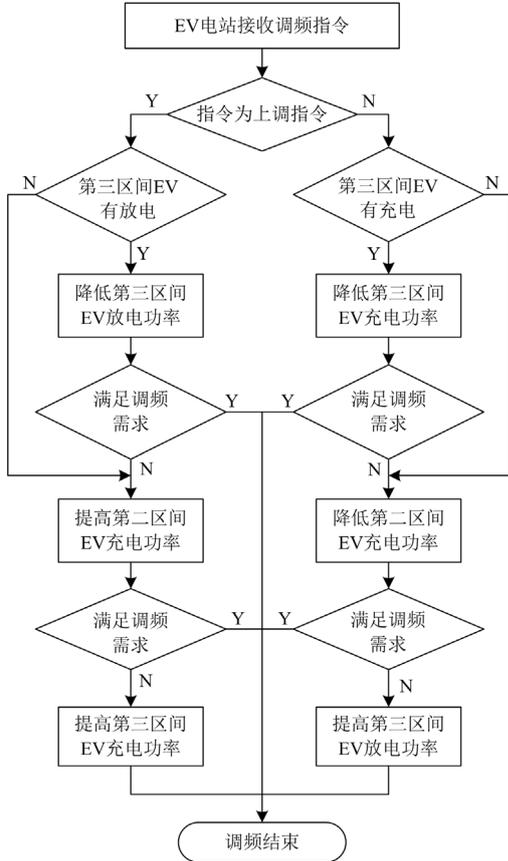


图 4 EV 响应优先级

Fig. 4 Response priority of EV

$$\begin{cases} \Delta P_{EV\omega,i}^{up}(t) = \frac{x_{EV\omega,i}^{up}(t)}{\Delta C_{EV\omega}^{up}(t)} \Delta P_{EV\omega,q}^{up}(t) \\ \Delta P_{EV\omega}^{up}(t) = \sum_{i \in \omega} \Delta P_{EV\omega,i}^{up}(t) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{EV\omega,i}^{down}(t) = \frac{x_{EV\omega,i}^{down}(t)}{\Delta C_{EV\omega}^{down}(t)} \Delta P_{EV\omega,q}^{down}(t) \\ \Delta P_{EV\omega}^{down}(t) = \sum_{i \in \omega} \Delta P_{EV\omega,i}^{down}(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\Delta P_{EV\omega,i}^{up}(t)$ 、 $\Delta P_{EV\omega,i}^{down}(t)$ 分别表示 t 时刻第 i 辆 EV 分配的上、下调量; $x_{EV\omega,i}^{up}(t)$ 、 $x_{EV\omega,i}^{down}(t)$ 分别表示 t 时刻第 i 辆 EV 可提供的上、下调量。

EV 均通过具有 V2G 的智能充电桩连入电网, 充放电功率与 SOC 应满足约束式 (19) 和式 (20)。

$$\begin{cases} P_{EV\omega,i}^{real}(t) = P_{EV\omega,i}^{real}(t-1) + \Delta P_{EV\omega,i}^{up}(t) u_i^{up}(t) + \Delta P_{EV\omega,i}^{down}(t) u_i^{down}(t) \\ 0 \leq u_i^{up}(t) + u_i^{down}(t) \leq 1 \\ P_{EV\omega,i}^{min,c}(t) \leq P_{EV\omega,i}^{real}(t) \leq P_{EV\omega,i}^{max,c}(t) \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} S_{EV\omega,i}^{real}(t) = S_{EV\omega,i}^{real}(t-1) + \frac{100\Delta t}{E} P_{EV\omega,i}^{real}(t) \eta_{EV}(t) \\ S_{EV\omega}^{min} \leq S_{EV\omega,i}^{real}(t) \leq S_{EV\omega}^{max} \\ S_{EV\omega,i}^{real}(t_{off}) \geq S_{EV}^c \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{EV\omega,i}^{max,c}(t)$ 为 EV 充电功率的上限值; $u_i^{up}(t)$ 、 $u_i^{down}(t)$ 分别为上、下调节标志; $\eta_{EV}(t)$ 为 EV 充放电效率, 当 $P_{EV\omega,i}^{real}(t) > 0$ 时, 取 η_{EV}^c , 当 $P_{EV\omega,i}^{real}(t) < 0$ 时, 取 $1/\eta_{EV}^c$; $S_{EV\omega}^{min}$ 设置为 EV 最低 SOC, 取 20%; $S_{EV\omega,i}^{real}(t_{off})$ 为 EV 离网时刻 SOC; $S_{EV\omega}^{max}$ 为 ω 区间内 EV 最大 SOC。

火电机组在调频过程中应满足机组出力约束、爬坡约束, 具体公式为

$$\begin{cases} P_g^{real}(t) = P_g^{real}(t-1) + \Delta P_g^{up}(t) v^{up}(t) + \Delta P_g^{down}(t) v^{down}(t) \\ |\Delta P_g^{up}(t) v^{up}(t) + \Delta P_g^{down}(t) v^{down}(t)| \leq \Delta P_g^{rate} \\ 0 \leq v^{up}(t) + v^{down}(t) \leq 1 \\ P_g^{min} \leq P_g^{real}(t) \leq P_g^{max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_g^{real}(t)$ 为 t 时刻火电机组的实时出力; ΔP_g^{rate} 为机组的最大爬坡速率; $v^{up}(t)$ 、 $v^{down}(t)$ 分别为机组上、下调节标志; P_g^{max} 、 P_g^{min} 分别为机组出力上下限值。

综上所述, 得出 EV 协助火电机组提供辅助调频服务调度策略, 流程图如图 5 所示。

3 算例分析

3.1 算例数据

为验证本文所提策略的有效性, 利用 Matlab

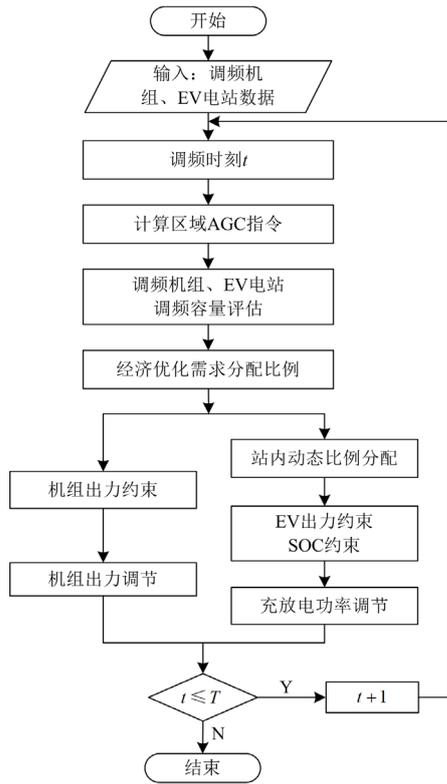


图5 调频策略流程图

Fig. 5 Flow chart of frequency modulation strategy

R2016b/simulink 软件搭建两区域互联电力系统模型进行仿真分析, 如图2所示。设定系统基准容量为10 MW, 表1给出了两区域中发电机组动态响应传递函数参数。

表1 发电机组动态响应传递函数参数

Table 1 Parameters of dynamic response transfer functions of generator

参数	数值	参数	数值
R	0.05	$M_1、M_2$	1、6
$B_1、B_2$	1、6	$D_1、D_2$	2、2
T_G	0.8	T_{ic}	0.5
T_{CH}	10		

仿真中假设每个区域各有5个EV充电站, 每个EV电站可以控制100辆EV, 且所有EV均为同类别, EV基础数据通过文献[30]方法获得, 在19时至24时入站车辆增加较多, 该时段可提供较大的调频容量, 故本文将仿真时段设置为19时至24时, 其余时刻不参与调频, 总调频时间 T 为5 h, 且按最低充电功率充电至离网。本文设定调频指令时间间隔为1 min^[31], 且EV在响应指令信号后的功率进行持续充放电。表2为EV电站模型参数, 表3为EV配置参数。本文所提策略平均单次求解时间控

制在6.23 s内, 在考虑信息传输速度、充电桩互动响应时间等因素影响时, 可满足1 min调频控制需求。

表2 EV电站模型参数

Table 2 Parameters of EV charging station model

参数	数值
EV 电池增益 K_{EV}	1
EV 频率特性系数 K_f	1.12
T_{EV}	1

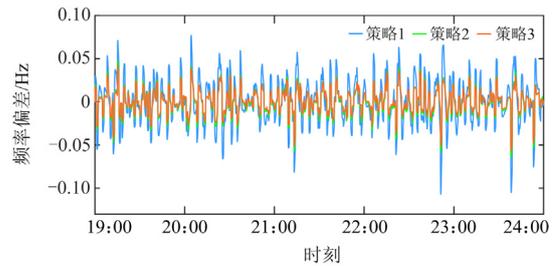
表3 EV配置参数

Table 3 Configuration parameters of EV

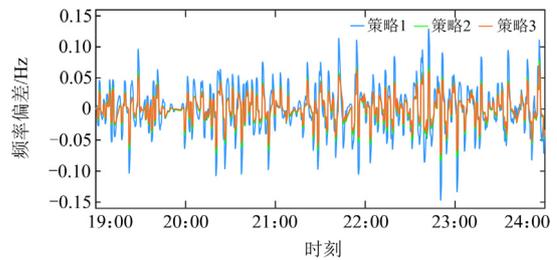
参数	数值
电池额定容量 E/kWh	40
最大充电功率 $P_{EV}^{max,c}/kW$	7
最大放电功率 $P_{EV}^{max,d}/kW$	-7
最大 SOC	0.98
期望 SOC	0.8
充电效率 η_{EV}^c	0.9

3.2 调频效果分析

本文利用上述调频站, 设定如下3种调频策略。策略1: 无EV电站参与的电网调频; 策略2: 火电机组与EV电站按固定比例分配ACE; 策略3: 本文策略。采用某省在一个典型运行日内5 h的风电及负荷数据进行仿真计算, 区域1、区域2的系统频率偏差及联络线功率偏差分别如图6和图7所示。区域1与区域2在不同策略下系统响应相关数据变化趋势相似, 此处仅给出区域1及联络线功率偏差数据, 如表4所示, 其中rms为均差值。



(a) 区域1



(b) 区域2

图6 两区域频率偏差曲线

Fig. 6 Curve of frequency deviation in two areas

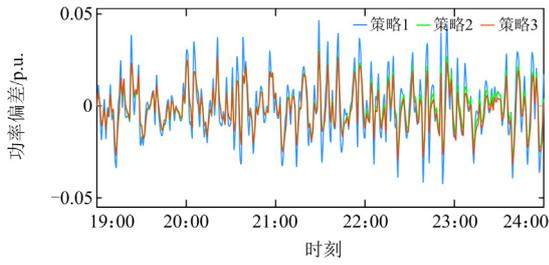


图 7 联络线功率偏差曲线

Fig. 7 Curve of tie line power

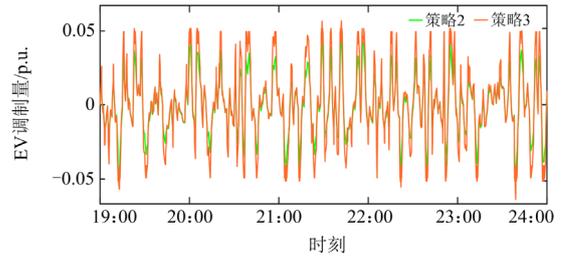


图 9 EV 出力变化

Fig. 9 Power output change of EV

表 4 不同策略下区域 1 系统响应值

Table 4 Areal system response values under different policies

		策略 1	策略 2	策略 3
频率偏差/Hz	max	0.077	0.047	0.042
	min	-0.107	-0.064	-0.057
	rms	0.027	0.016	0.012
机组出力(rms)/p.u.		0.091	0.069	0.056
EV 出力(rms)/p.u.		—	0.018	0.024
联络线功率偏差(rms)/p.u.		0.015	0.011	0.010

由图 6 可以看出, 策略 2、3 的系统频率偏差相较于策略 1 有明显降低, 即 EV 在加入调频后, 可以有效抑制频率波动, 而当采用策略 3 时, 通过改变各机组调频分担比例, 使得频率变化更为迅速, 调频效果优于策略 2。图 7 中, 对比 3 种策略下联络线功率偏差可以发现, 策略 3 相较于策略 1、2 更能有效降低功率偏差, 联络线功率偏差最大抑制量可达 0.03 p.u.。由表 4 可以看出, 采用策略 3 的频率偏差是 3 种策略中最小的, 联络线功率偏差也有所降低。因此, EV 电站参与调频更能缩短频率偏差, 且采用本文策略调频效果更优。

图 8、图 9 分别给出了机组、EV 调频出力变化情况。对比 3 种策略不难发现, 策略 3 分配给机组的 ARR 相较于策略 1 有所降低, 根据优化策略将部分 ARR 分配给 EV 承担, 不断调节 EV 充电功率, 以实现系统频率调节。相较于策略 2, 策略 3 中 EV 出力较多, 原因在于 EV 承担了更多的频率调节需求, 进而有效降低区域频率偏差。

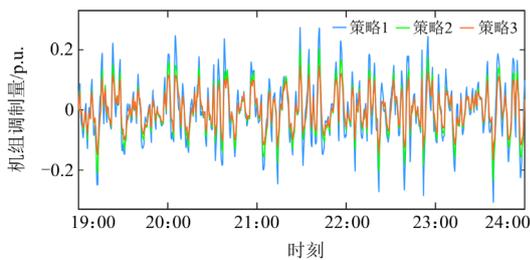


图 8 机组出力变化

Fig. 8 Power output change of generator units

3.3 EV 充放电情况分析

根据 EV 参与调频市场的初始 SOC, 将 EV 进行分区管理, 处于第二区间内的 EV 均保持充电状态, 促使 SOC 实现持续增加; 处于第三区间内的 EV 在不低于期望荷电状态的前提下可充可放电, 为系统提供向上、向下调节功率。从区域 1 的 5 个 EV 电站中选取一个 EV 电站, 在本文所提策略下各车辆 SOC 变化情况如图 10 所示, 红色端代表进站 SOC, 绿色端代表离站 SOC。可以看出, 充电数量为 100 的 EV 电站中有两辆 EV 离站时 SOC 低于期望 SOC, 原因在于, 这两辆 EV 在站充电时间较短, 即使以最大充电功率充电仍无法达到期望值, 不参与调频服务, 而其余车辆在调频时段内在站即可提供调频服务, 且保证其在离站前均高于期望 SOC。选取该 EV 电站 6 辆车以观察其参与调频时的 SOC 变化情况, 如图 11 所示。从图 11(a)可以看出, EV 站获得 ARR 后, 根据各车的 SOC 及功率大小, 按优先级与比例对各车进行调节, 但策略 2 分配给 EV 站的 ARR 是按固定比例下放的, SOC 增长速度较慢。而图 11(b)所示的策略 3 下, 动态调节 ARR 在机组与 EV 站之间的分配比例, 使得各 EV 每时刻分得的功率调制量发生改变, 可以更快地达到期望 SOC, 从而提供更多的调频容量, 以获得更多的 ARR。

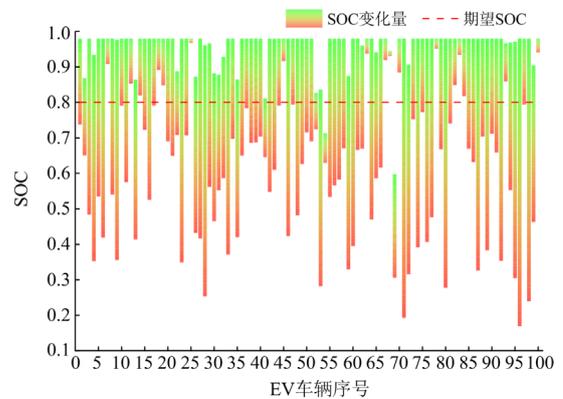


图 10 策略 3 下某个 EV 电站车辆 SOC 变化情况

Fig. 10 SOC variation of an EV power station under strategy 3

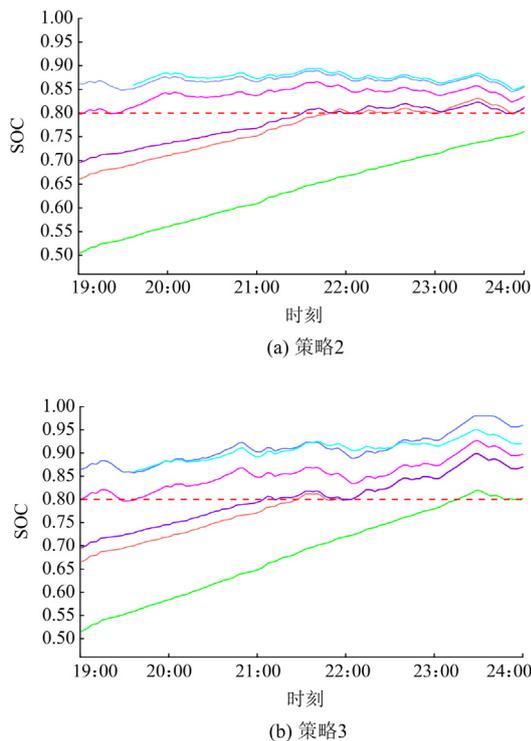


图 11 不同策略下 SOC 变化情况

Fig. 11 SOC variation under different strategies

例如初始 SOC 为 0.51 的 EV, 策略 2 中在调频时段结束时, SOC 才达到 0.76, 而采用策略 3 后, 该 EV 于 23:16 达到期望 SOC, 在剩余调频时间段内提供了下调频里程, 故策略 3 可以提高 EV 的调频参与量。

3.4 调频收益分析

采用不同策略所获收益如表 5 所示, 策略 1 总收益最低, 策略 3 总收益最高。仿真中调频容量与调频里程价格均按调频服务市场边际出清价格计算。由仿真结果可以看出, 当调频商只采用机组进行调频时, 收益仅为 988.39 元, 但当 EV 电站参与调频市场, 可以增加调频容量收益, 同时也可以降低机组因参与调频而产生的功率偏移成本。EV 电站调频成本相对较低, 原因在于 EV 电站中各 EV 处于充电状态的占很大比例, 通过调节充电功率以

表 5 调频商收益

Table 5 Revenue of frequency modulation agents

	元		
	策略 1	策略 2	策略 3
调频容量收益	900	940	980
调频里程收益	268.61	265.92	263.73
机组调频成本	180.22	115.34	71.51
EV 调频补偿	0	15.67	23.18
总收益	988.39	1074.91	1149.04

更好地完成所分配的 ARR, 只有较少车辆在调频过程中会存在少量的放电行为, 从而会产生调频补偿。从表 5 中数据来看, 策略 2 与策略 3 的总收益相较于策略 1 分别增加了 8.75%、16.25%, 体现了 EV 电站参与调频市场的经济性。

4 结论

大规模 EV 作为储能资源接入电网, 运用不同策略激励 EV 参与辅助服务市场, 为电网提供响应速度快、调节精度高的调频资源, 从而有效应对高比例新能源接入电网造成调频能力不足的问题。本文研究了 EV 与火电调频机组参与辅助服务市场的调度策略、经济利益问题, 主要结论如下。

1) 本文采用考虑调频收益的滚动优化控制策略, 实现了调频指令在 EV 与机组之间的合理分配, 降低了系统频率偏差及联络线功率偏差, 提高了调频商总收益。

2) 调频站根据每台 V2G 充电桩采集的数据, 完成对 EV 最低充电功率设定及 SOC 分区, 最终相较于固定比例参与调频, 所提策略下各 EV 在调频结束时 SOC 有所提高, 同时对 EV 放电用户进行补偿, 以激励用户更加积极地参与辅助服务。

在今后研究中, 将进一步考虑构建 EV 用户与调频商收益分摊模型, 进而提高 EV 用户参与辅助服务的积极性, 实现 EV 用户与调频商合作共赢。

参考文献

- [1] 新华网. 加快建设新型电力系统助力实现“双碳”目标 [EB/OL]. [2023-05-25]. <http://www.xinhuanet.com/energy/20210723/928671e2ec384ec8be496e8d26d94eed/c.html>.
- [2] 杜冬梅, 曹冬惠, 何青. “双碳”目标下我国电力行业低碳转型的思路探讨[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 1-9. DU Dongmei, CAO Donghui, HE Qing. Discussion on low-carbon transformation of China's power industry under the “double-carbon” goal[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 1-9.
- [3] 陈艺华, 张炜, 张成刚, 等. 新型电力系统中促进新能源消纳的电力现货市场交易机制研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(2): 97-104. CHEN Yihua, ZHANG Wei, ZHANG Chenggang, et al. Electricity spot market trading mechanism for promoting renewable energy integration in new power system[J]. Smart Power, 2022, 50(2): 97-104.
- [4] 王金丽, 李丰胜, 解芳, 等. “双碳”战略背景下新型配电网技术标准体系[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 22-31. WANG Jinli, LI Fengsheng, XIE Fang, et al. Research on

- technical standard system of new distribution system under double-carbon strategy[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 22-31.
- [5] 付卓铭, 胡俊杰, 马文帅, 等. 规模化电动汽车参与电力系统二次调频研究综述[J]. *电力建设*, 2023, 44(2): 1-14.
- FU Zhuoming, HU Junjie, MA Wenshuai, et al. Review of research on participation of numerous electric vehicles in power system secondary frequency-regulation service[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(2): 1-14.
- [6] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(13): 33-42.
- LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(13): 33-42.
- [7] 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(增刊1): 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.
- [8] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 461-475.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 461-475.
- [9] DOHERTY R, MULLANE A, NOLAN G, et al. An assessment of the impact of wind generation on system frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(1): 452-460.
- [10] 韩锐, 吴军, 廖清芬, 等. 基于 NSGA-III 算法的光-水-火电机组 AGC 协调优化策略[J]. *智慧电力*, 2022, 50(1): 45-52.
- HAN Rui, WU Jun, LIAO Qingfen, et al. AGC coordination and optimization strategy of photovoltaic-hydropower-thermal power units based on NSGA-III algorithm[J]. *Smart Power*, 2022, 50(1): 45-52.
- [11] 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.
- [12] 张弘. 我国机动车保有量达 4.17 亿辆 驾驶人超 5 亿人[N]. *人民公安报*, 2023-01-12(002).
- [13] 何榭宇. 基于 V2G 技术的电动汽车充放电策略研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- HE Xieyu. Research on charging and discharging strategy of electric vehicle based on V2G technology[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [14] ZHONG J, HE L N, LI C B. Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation[J]. *Applied Energy*, 2014, 123: 253-262.
- [15] 范培潇, 杨军, 柯松, 等. 基于改进 EDRL 的含 V2G 孤岛微电网频率综合控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(20): 23-32.
- FAN Peixiao, YANG Jun, KE Song, et al. Integrated frequency control strategy for islanded microgrid with vehicle-to-grid based on improved evolutionary deep reinforcement learning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(20): 23-32.
- [16] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(11): 1-8.
- CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of electric vehicle charging station considering prices optimization and discharge behavior control[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(11): 1-8.
- [17] 陈艺灵, 吕志鹏, 周珊. 基于云边端协同的电动汽车多目标优化调度[J]. *供用电*, 2022, 39(4): 17-24.
- CHEN Yiling, LÜ Zhipeng, ZHOU Shan. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles based on cloud edge end cooperation[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(4): 17-24.
- [18] 程杉, 傅桐, 赵子凯, 等. 考虑电动汽车随机转移特性的充储电站群两阶段优化调度[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4257-4266.
- CHENG Shan, FU Tong, ZHAO Zikai, et al. Two-stage optimal scheduling of charging and storage station clusters considering the random transfer characteristics of electric vehicles[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4257-4266.
- [19] GUILLE C, GROSS G. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4379-4390.
- [20] 张谦, 周林, 周维维, 等. 计及电动汽车充放电静态频率特性的负荷频率控制[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(16): 74-80.
- ZHANG Qian, ZHOU Lin, ZHOU Luowei, et al. Load frequency control considering charging and discharging static frequency characteristics of electric vehicles[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 74-80.
- [21] 米阳, 伦雪莹, 孟凡斌, 等. 基于无模型算法和电动汽车辅助调节的新能源电力系统频率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 13-20.
MI Yang, LUN Xueying, MENG Fanbin, et al. Frequency coordinated control of a new energy power system based on a model-free algorithm and EV auxiliary regulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 13-20.
- [22] 林晓明, 唐建林, 张帆, 等. 基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 技术在多能互补系统中的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 143-150.
LIN Xiaoming, TANG Jianlin, ZHANG Fan, et al. Research and application of electric vehicle V2G technology based on a virtual synchronization strategy in a multi-energy complementary system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 143-150.
- [23] XU B L, SHI Y Y, KIRSCHEN D S, et al. Optimal battery participation in frequency regulation markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6715-6725.
- [24] 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.
- [25] 魏震波, 田轲, 罗筱均, 等. 电动汽车聚合商参与下的主辅联合市场均衡分析[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 50-57.
WEI Zhenbo, TIAN Ke, LUO Xiaojun, et al. Analysis on equilibrium of the main and auxiliary joint markets considering the aggregators of electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 50-57.
- [26] 许梦瑶, 艾小猛, 方家琨, 等. 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[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2033-2041.
XU Mengyao, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Two-stage stochastic optimal scheduling model for joint regulation of EV and thermal units considering users enthusiasm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2033-2041.
- [27] 高爽, 戴如鑫. 电动汽车集群参与调频辅助服务市场的充电调控策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 60-67.
GAO Shuang, DAI Ruxin. Charging control strategy for electric vehicle cluster participating in frequency regulation ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 60-67.
- [28] 刘佳婕, 贾燕冰, 陈浩, 等. 考虑实时调频需求的辅助服务市场机制及调度策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1269-1278.
LIU Jiajie, JIA Yanbing, CHEN Hao, et al. Market mechanism and scheduling strategy of ancillary services considering real-time frequency regulation requirements[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1269-1278.
- [29] 李孟阳, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑需求响应及调频性能变化的虚拟电厂日前投标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 13-25.
LI Mengyang, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Day-ahead bidding strategy for virtual power plant considering demand response and frequency regulation performance variation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 13-25.
- [30] 程杉, 王贤宁, 冯毅煤. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 39-46.
CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [31] 王昊天, 孙英云, 汪丽伟, 等. 基于联盟链的电动汽车虚拟聚合调频[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 122-131.
WANG Haotian, SUN Yingyun, WANG Liwei, et al. Frequency regulation by virtual aggregation of electric vehicles based on consortium blockchain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 122-131.

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-09-06

作者简介:

程 杉(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行优化与控制、智能电网能量管理与优化、智能计算及其应用; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

李泮洋(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车参与新能源电力系统频率控制。E-mail: 2271479460@qq.com

(编辑 周金梅)