

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231087

结合车主期望的充换电站辅助调频策略

骆钊¹, 聂灵峰¹, 田肖¹, 李家浩², 雷元庆¹, 马瑞³

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南电网有限责任公司计量中心, 云南 昆明 650500;
3. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011)

摘要: 随着可再生能源的高渗透与新型电力系统构架的不断完善, 电动汽车既可作为可控负荷, 也可作为分布式电源, 具有优良的调频特性。为此, 提出了一种结合车主期望的充换电站辅助调频策略。首先, 基于入/离网时间、入网/期望荷电状态量、电动汽车充放电限制等车主期望建立电动汽车充/放电能力评估模型。其次, 结合电动汽车充/放电能力与有功-频率特性曲线建立电动汽车双层控制的调频模型。最后, 考虑电网侧和车主侧的需求, 提出充换电站参与电网调频策略。仿真结果表明, 所提控制策略在满足车主期望及电动汽车自身限制的情况下可有效调节电网频率、提高电网安全稳定运行水平及灵活性。

关键词: 电动汽车; 用户需求; V2G; 辅助调频; 充换电站

Auxiliary frequency regulation strategy for charging and swapping stations combined with the expectations of vehicle owners

LUO Zhao¹, NIE Lingfeng¹, TIAN Xiao¹, LI Jiahao², LEI Yuanqing¹, MA Rui³

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Measurement Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650500, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China)

Abstract: With the high penetration of renewable energy and the continuous improvement of new power system architectures, electric vehicles can serve as both controllable loads and distributed power sources, with excellent frequency regulation characteristics. Therefore, this paper proposes an auxiliary frequency regulation strategy for charging and exchanging power stations that is combined with the expectations of vehicle owners. First, an evaluation model for the charging/discharging capacity of electric vehicles is established based on the expectations of vehicle owners, such as the entry/exit time, expected state of charge, and charging/discharging limitations. Secondly, a frequency modulation model for dual layer control of electric vehicles is established by combining the charging/discharging capacity of electric vehicles with the active power-frequency characteristic curve. Finally, considering the needs of both the power grid and vehicle owner sides, a strategy is proposed that makes charging and swapping power stations participate in the power grid frequency regulation. Simulation results show that the proposed control strategy can effectively adjust the frequency of the power grid, and improve its safe and stable operation and flexibility while meeting the expectations of vehicle owners and the limitations of the electric vehicle itself.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277104).

Key words: electric vehicle; user demand; vehicle to grid (V2G); auxiliary frequency regulation; battery charging and swapping station

0 引言

近年来, 随着大量分布式能源的接入, 电网拓

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277104); 云南省重点研发计划项目资助(202303AC100003); 云南省应用基础研究计划项目资助(202301AT070455); 宁夏回族自治区重点研发计划项目资助(2021BEE03016)

扑结构也随之发生改变, 其在电力系统的负荷结构逐渐占据主导地位^[1-3]。同时电网趋于现代化和智能化, 自动控制系统的运用提高了电网的供电效率、可靠性和持续性^[4]。电网中各组件通过自主监测以实现电网整体运行的控制和优化, 这有助于其解决自身的不稳定问题, 更有利于其积极地参与电网运行^[5-8]。

分布式储能因其具有形式多样、运用灵活、位

置分布广、可调容量足等特征更能适应新型配电网的运行要求^[9-10]。电动汽车入网(vehicle to grid, V2G)技术可加固电网, 推迟或消除对系统升级的需求, 并且提高系统的完整性、可靠性和效率^[11-13]。利用电动汽车(electric vehicle, EV)辅助电力系统频率稳定已成为许多学者关注的重点^[14]。文献[15]将 V2G 与虚拟同步机相结合, 实现了多能互补充电站内充电负荷的“削峰填谷”, 但电动汽车的控制未考虑电动汽车车主的期望。文献[16]提出一种基于运行模拟的共享储能和 EV 集群容量规划方法, 但其对于电动汽车储能能力的评估仅考虑了荷电状态量。文献[17-19]基于恒定下垂系数, 通过频率偏差调节电动汽车充、放电功率, 但无法很好地体现电动汽车的动态调节能力。文献[20]提出了一种分段下垂策略, 将频率偏差划分为几个区间, 不同区间采用不同的下垂系数以控制电动汽车充电功率的变化。上述电动汽车调频策略仅考虑了系统的特性变化, 未能充分反映电动汽车的实时操作要求及车主期望。

单一的电动汽车可调容量小、随机性大, 不可直接参与电网调频, 将电动汽车集群管理可为电力系统提供较大容量的优质调频资源^[21-22]。文献[23]采用负荷虚拟同步机技术使电动汽车充电桩等负荷主动参与电网调频, 但电动汽车未进行集群, 可调容量较小。文献[24]利用频率下垂特性使电动汽车参与调频, 但其控制策略只参与了电网的一次调频。文献[25]考虑调节信号不确定性的最优日前充电和频率储备进行调度, 在确保系统稳定性和安全性的前提下兼顾了经济性。文献[26]通过粒子群优化算法对电动汽车进行控制, 实现了更准确的频率调节信号响应以及更高的调频收益, 但未提供关于控制策略有效性的理论分析。文献[27]仅设计了双向 DC/DC 变换器实现电网直流电压的惯性支持, 未实现双向充放电工况下的调频调压过程。文献[28]考虑了多样化需求下的调频不确定性, 但其对电动汽车的状态评估仅为参数判断, 不符合实际电动汽车运行状态。然而, 已有电动汽车调频策略难以兼顾车主期望与电网调频需求, 同时其采用模型大多为函数模型, 无法表征电动汽车的实际运行情况。

鉴于此, 本文提出一种结合车主期望的充换电站辅助调频策略。首先, 基于车主期望判断电动汽车充/放电能力, 在满足车主期望的同时, 区别每一台电动汽车的调频能力。其次, 根据有功-频率特性曲线建立电动汽车双向充、放电模型, 实现其参与电网的一、二次调频。最后, 结合电网侧和车主侧的需求使充换电站参与辅助调频。仿真结果表明, 控制策略在满足车主期望及电动汽车自身限制的情

况下可有效地调节电网频率、提高电网灵活性。

1 基于车主期望的电动汽车充/放电能力评估模型

电动汽车既可作为可控负荷, 也可作为分布式电源。在出现扰动时, 结合车主期望与电网频率偏差, 改变电动汽车功率流向以响应调频指令。电动汽车在参与辅助调频服务时, 考虑电动汽车的运行边界与车主的期望和要求可有效表征电动汽车的实际运行情况。

1.1 非运行边界下电动汽车充放电能力

电动汽车的充电能力为车辆在指定时间内可从系统吸收能量的能力。在促进频率调节的同时, 不会违背电动汽车的运行限制条件或影响汽车车主的使用。图 1 为非运行边界电动汽车充放电曲线。

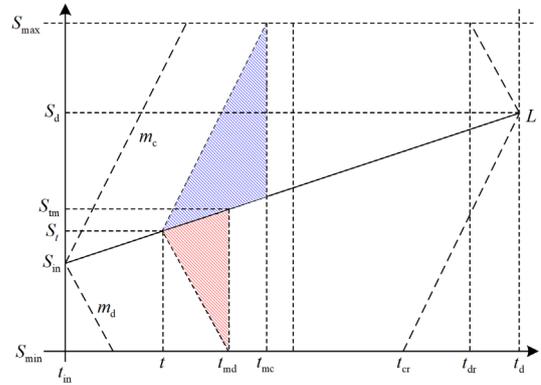


图 1 非运行边界下电动汽车充放电曲线

Fig. 1 Charging and discharging curve of non operating boundary electric vehicles

图 1 中: L 为电动汽车平均速率充电曲线; t_{in} 为电动汽车入网时间; S_{in} 为电动汽车入网荷电状态量; S_d 为车主期望荷电状态量; t_d 为以平均充电功率充电到达 S_d 的时间; S_{max} 为电动汽车最大荷电状态量; S_{min} 为电动汽车最小荷电状态量; S_t 为 t 时刻电动汽车荷电状态量; m_c 、 m_d 分别为最大充电速率、最大放电速率, 其计算为最大充、放功率与电池容量之比。

平均充电速率 m_a^t 计算如式(1)所示。

$$m_a^t = \frac{S_d - S_t}{t_d - t} \quad (1)$$

1) 非运行边界下电动汽车放电能力

非运行边界电动汽车放电能力为某一时刻 t , 电动汽车以最大放电速率 m_d 放电至最小荷电状态量 S_{min} 时, 放电曲线与平均充电曲线 L 所围三角形

面积, 既图 1 中曲线 L 下半部分阴影面积。 t_{md} 表示从 t 时刻开始以最大放电速率放电至 S_{min} 所需时间; t_{cr} 表示以最大充电速率充电, 荷电状态量由 S_{min} 到 S_d 所需时间。

$$t_{md} = t + \frac{S_t - S_{min}}{m_d} \quad (2)$$

$$t_{cr} = t_d - \frac{S_d - S_{min}}{m_c} \quad (3)$$

非运行边界电动汽车放电能力 B_{UDr} 如式(4)所示。

$$B_{UDr} = \frac{1}{2}(t_{md} - t)(S_{tm} - S_{min}) \quad (4)$$

式中, S_{tm} 为 t_{md} 时刻电动汽车荷电状态量。

式(4)中, S_{tm} 和 S_{min} 可分别表示为

$$S_{tm} = S_t + m'_a(t_{md} - t) \quad (5)$$

$$S_{min} = S_t - m_d(t_{md} - t) \quad (6)$$

式(4)可变换为

$$B_{UDr} = \frac{1}{2}(t_{md} - t)^2(m'_a + m_d) \quad (7)$$

2) 非运行边界下电动汽车充电能力

t_{mc} 表示从 t 时刻开始以最大充电速率充电至 S_{max} 所需时间; t_{dr} 表示以最大放电速率放电, 荷电状态量由 S_{max} 到 S_d 所需时间。

$$t_{mc} = t + \frac{S_{max} - S_t}{m_c} \quad (8)$$

$$t_{dr} = t_d - \frac{S_{max} - S_d}{m_d} \quad (9)$$

非运行边界电动汽车充电能力 B_{UCr} 如式(10)所示。

$$B_{UCr} = \frac{1}{2}(t_{mc} - t)^2(m_c - m'_a) \quad (10)$$

1.2 运行边界下电动汽车充放电能力

1) 运行边界下电动汽车放电能力

运行边界下电动汽车放电曲线如图 2 所示。运行边界下电动汽车放电能力为某一 t 时刻, 电动汽车以最大放电速率 m_d 放电至运行边界。EV 到达边界极限的时间 t_n , 荷电状态量为 S_n , 此时 EV 不再参与调频, 且应以最大充电速率充电以满足车主期望荷电状态量。

$$S_n = S_t - m_d(t_n - t) \quad (11)$$

$$S_d = S_n + m_c(t_d - t_n) \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可得 t_n 为

$$t_n = \frac{m_d \cdot t + m_c \cdot t_d}{m_c + m_d} - \frac{S_d - S_t}{m_c + m_d} \quad (13)$$

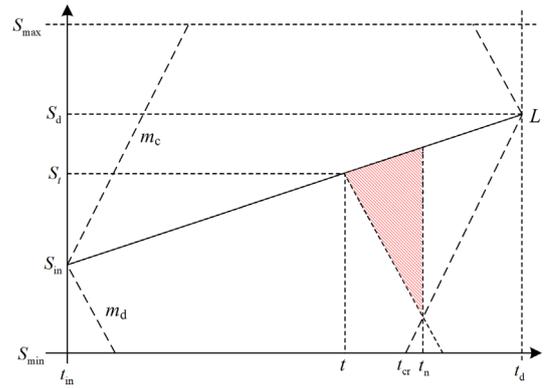


图 2 运行边界下电动汽车放电曲线

Fig. 2 Electric vehicle discharge curve under operating boundary

运行边界下电动汽车放电能力 B_{BDr} 如式(14)所示。

$$B_{BDr} = \frac{1}{2}(t_n - t)^2(m'_a + m_d) \quad (14)$$

2) 运行边界下电动汽车充电能力

运行边界下电动汽车充电曲线如图 3 所示。EV 到达边界极限的时间为 t'_n , 荷电状态量为 S'_n , 此时 EV 不再参与调频, 且应以最大放电速率放电至车主期望荷电状态量。

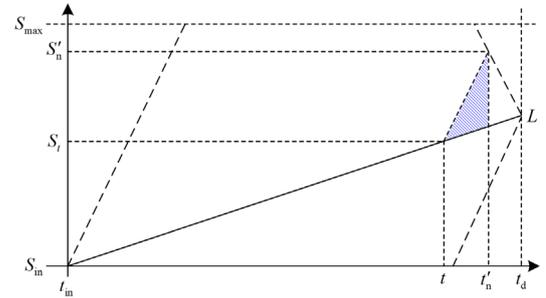


图 3 运行边界下电动汽车充电曲线

Fig. 3 Electric vehicle charging curve under operating boundary

$$t'_n = \frac{m_c \cdot t + m_d \cdot t_d}{m_c + m_d} - \frac{S_d - S_t}{m_c + m_d} \quad (15)$$

运行边界下电动汽车充电能力 B_{BCr} 如式(16)所示。

$$B_{BCr} = \frac{1}{2}(t'_n - t)^2(m_c - m'_a) \quad (16)$$

1.3 电动汽车最大充放电能力

为量化不同 EV 充放电能力, 计算最大充放电能力作为标准。

1) 非运行边界下电动汽车最大放电能力

非运行边界下电动汽车最大放电曲线如附录 A 图 A1 所示。

$$t_{c,\min}^u = t_{in} + \frac{S_{\max} - S_{in}}{m_c} \quad (17)$$

$$t_b = t_{c,\min}^u + \frac{S_{\max} - S_{\min}}{m_d} \quad (18)$$

$$m_{a1} = \frac{S_d - S_{\max}}{t_d - t_{c,\min}^u} \quad (19)$$

式中: $t_{c,\min}^u$ 为非运行边界下最短充电时间; t_b 为以最大放电速率放电至最小荷电状态量时刻; m_{a1} 为非运行边界下平均放电速率。非运行边界下电动汽车最大放电能力 $B_{UD\max}$ 可表示为

$$B_{UD\max} = \frac{1}{2}(t_b - t_{c,\min}^u)^2(m_d + m_{a1}) \quad (20)$$

2) 非运行边界下电动汽车最大充电能力

非运行边界下电动汽车最大充电曲线如附录 A 图 A2 所示。

$$t_{d,\min}^u = t_{in} + \frac{S_{in} - S_{\min}}{m_d} \quad (21)$$

$$t'_b = t_{d,\min}^u + \frac{S_{\min} - S_{\max}}{m_c} \quad (22)$$

$$m_{a2} = \frac{S_d - S_{\min}}{t_d - t_{d,\min}^u} \quad (23)$$

式中: $t_{d,\min}^u$ 为非运行边界下最短放电时间; t'_b 为以最大放电速率放电至最小荷电状态量时刻; m_{a2} 为非运行边界下平均充电速率。非运行边界下电动汽车最大充电能力 $B_{UC\max}$ 可表示为

$$B_{UC\max} = \frac{1}{2}(t'_b - t_{d,\min}^u)^2(m_c - m_{a2}) \quad (24)$$

3) 运行边界下电动汽车最大放电能力

最大放电能力曲线如附录 A 图 A3 所示。

$$t_{c,\min}^b = \frac{m_d \cdot t_{cr} + m_c \cdot t_{in}}{m_c + m_d} - \frac{S_{in} - S_{\min}}{m_c + m_d} \quad (25)$$

$$S_{t_{c,\min}^b} = S_{\min} - m_d(t_{cr} - t_{c,\min}^b) \quad (26)$$

$$m_{a3} = \frac{S_d - S_{t_{c,\min}^b}}{t_d - t_{c,\min}^b} \quad (27)$$

式中: $t_{c,\min}^b$ 为运行边界下最短充电时间; $S_{t_{c,\min}^b}$ 为 $t_{c,\min}^b$ 时刻电动汽车荷电状态量; m_{a3} 为曲线 L_3 平均放电速率。

运行边界下电动汽车最大放电能力 $B_{BD\max}$ 表示为

$$B_{BD\max} = \frac{1}{2}(t_{cr} - t_{c,\min}^b)^2(m_{a3} + m_d) \quad (28)$$

4) 运行边界下电动汽车最大充电能力

运行边界下电动汽车最大充电曲线如附录 A 图 A4 所示。

$$t_{d,\min}^b = \frac{m_d \cdot t_{in} + m_c \cdot t_{dr}}{m_c + m_d} - \frac{S_{\max} - S_{\min}}{m_c + m_d} \quad (29)$$

$$S_{t_{d,\min}^b} = S_{\max} - m_c(t_{dr} - t_{d,\min}^b) \quad (30)$$

$$m_{a4} = \frac{S_d - S_{t_{d,\min}^b}}{t_d - t_{d,\min}^b} \quad (31)$$

运行边界下电动汽车最大充电能力 $B_{BC\max}$ 表示为

$$B_{BC\max} = \frac{1}{2}(t_{dr} - t_{d,\min}^b)^2(m_c - m_{a4}) \quad (32)$$

式中: $t_{d,\min}^b$ 为运行边界下最短放电时间; $S_{t_{d,\min}^b}$ 为 $t_{d,\min}^b$ 时刻电动汽车荷电状态量; m_{a4} 为曲线 L_4 平均充电速率。

5) 电动汽车充放电能力评估

通过上述分析, 得到电动汽车 t 时刻充/放电及电动汽车最大充/放电能力计算公式, 将不同电动汽车能力如式(33)所示进行量化。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{B}_{UDr} = \frac{B_{UDr}}{B_{UD\max}}, \text{非边界放电能力系数} \\ \bar{B}_{UCr} = \frac{B_{UCr}}{B_{UC\max}}, \text{非边界充电能力系数} \\ \bar{B}_{BDr} = \frac{B_{BDr}}{B_{BD\max}}, \text{边界放电能力系数} \\ \bar{B}_{BCr} = \frac{B_{BCr}}{B_{BC\max}}, \text{边界充电能力系数} \end{array} \right. \quad (33)$$

2 电动汽车调频模型

2.1 电动汽车双向充/放电控制模型

附录 A 图 A5 为电动汽车双向充/放电控制结构图。电动汽车充放电接口的直流侧采用含滤波电容电感的双向半桥 DC/DC 结构。

本文采用附录 A 图 A6 所示的 R-RC 动力电池模型。其中 E_b 为电池电动势, V_b 为动力电池端电压, R_b 为电池内阻。增加一个极化电阻 R_f 和一个极化电容 C_f 用于反映电池充放电时的暂态反应。

2.2 电动汽车双向充/放电控制策略

1) 一次调频环节

图 4 为电动汽车充/放电功率-频率特性曲线。图中: f 为电网频率, f_n 为电网额定频率; f_{death} 为调频死区; P 为电动汽车充/放电功率, $P > 0$ 时表示充电, $P < 0$ 时表示放电; P_{set} 为设定功率; P_{max} 和

P_{\min} 分别表示电动汽车充/放电功率上、下限。

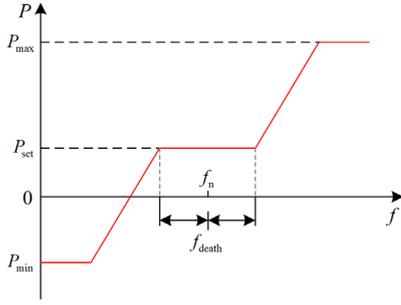


图4 电动汽车充/放电功率-频率特性曲线

Fig. 4 Electric vehicle charging/discharging power-frequency characteristic curve

一次调频下垂系数 K_{EV} 表示为

$$K_{EV} = -\frac{P - P_{set}}{f_n - f} = -\frac{\Delta P_1}{\Delta f} \quad (34)$$

基于前文所述电动汽车充放/电能力,设计一次调频系数 K_{EV} 为

$$K_{EV} = K_1 \cdot k_s \cdot k'_{EV} \quad (35)$$

式中: K_1 为基础一次调频系数; k_s 为电动汽车基础系数; k'_{EV} 为电动汽车能力系数。

$$k_s = \frac{m_c + m_d}{\Delta f - f_{death}} \quad (36)$$

$$k'_{EV} = \begin{cases} k'_{EV, ch}, & \Delta f > f_{death} \\ k'_{EV, dis}, & \Delta f < f_{death} \end{cases} \quad (37)$$

$$k'_{EV, dis} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{B_{UDr}}}{1 + B_{UDr}}, & t < t_{dr} \\ \frac{2\sqrt{B_{BDr}}}{1 + B_{BDr}}, & t > t_{dr} \end{cases} \quad (38)$$

$$k'_{EV, ch} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{B_{UCr}}}{1 + B_{UCr}}, & t < t_{cr} \\ \frac{2\sqrt{B_{BCr}}}{1 + B_{BCr}}, & t > t_{cr} \end{cases} \quad (39)$$

式中: $k'_{EV, ch}$ 为电动汽车充电能力系数; $k'_{EV, dis}$ 为电动汽车放电能力系数。当频率躲过调频区间 $[f_n - f_{death}, f_n + f_{death}]$ 时,电动汽车输出一级调频功率 ΔP_1 。

$$\Delta P_1 = -\Delta f \cdot K_{EV} = -\Delta f \cdot K_1 \cdot k_s \cdot k'_{EV} \quad (40)$$

电动汽车充电和放电功率上、下限 P_{\max} 、 P_{\min} 分别表示为

$$P_{\max} = \min(P_{cmax}, \frac{\Delta S_{\max} C_{ev}}{\eta_c \Delta t}) \quad (41)$$

$$P_{\min} = \begin{cases} \max(P_{cmax}, \frac{\Delta S_{\min} C_{ev}}{\eta_c \Delta t}) & \Delta S_{\min} > 0 \\ \min(-P_{dmax}, \frac{\Delta S_{\min} C_{ev}}{\eta_d \Delta t}) & \Delta S_{\min} < 0 \end{cases} \quad (42)$$

$$\Delta S_{\max} = 100\% - S_t \quad (43)$$

$$\Delta S_{\min} = S_{t+\Delta t, \min} - S_t \quad (44)$$

式中: P_{cmax} 、 P_{dmax} 分别为电动汽车本身允许最大充、放电功率; C_{ev} 为电动汽车电池容量; η_c 为电池充电效率; η_d 为电池放电效率; Δt 为充/放电周期; ΔS_{\max} 、 ΔS_{\min} 分别为电池最大、最小荷电状态量; $S_{t+\Delta t, \min}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻允许最小荷电状态量。 $\Delta S_{\min} > 0$ 表示当前电池未达到 $S_{t+\Delta t, \min}$ [29], 不允许电动汽车放电; $\Delta S_{\min} < 0$ 表示当前电池达到 $S_{t+\Delta t, \min}$, 允许电动汽车放电。

2) 二次调频环节

二次调频是在一次调频的基础上利用调频器实现对发电机组频率特性曲线的平移。以此为基础,设计电动汽车二次调频控制策略。与传统机组不同,电动汽车既可作为可控负荷,也可作为分布式电源,与电网进行双向的能量流动。本文提出一种两级二次调频控制策略,第一级采用开环控制,通过区域控制误差(area control error, ACE)计算获得二次调频功率 ΔP_2 ; 第二级采用积分控制,消除第一级的微小频率偏差,实现频率的无差调节。

图5为电动汽车接入电网的静态频率特性曲线。 P_{L1} 和 P_{L2} 为包含电动汽车的负荷静态特性曲线; P_{G1} 和 P_{G2} 为发电机组静态特性曲线。 K_G 表示机组调节系数, K_L 表示负荷调节系数, K_1 表示电动汽车一次调频系数。当频率波动在调频死区内时,电动汽车不参与调频,如图中 AB 段,斜率为 K_L ; 当频率变化超过调频死区时,电动汽车参与调频,如图中 BC 段,斜率为 $K_L + K_1$ 。假设电网最初运行于稳态点 A 点,某一时刻出现机组功率突降 ΔP_G , 发电机组静态特性曲线由 P_{G1} 下降至 P_{G2} , 机组运行点由 A 点变为 E 点。由于机组出力 and 负荷的不匹配,机组在增加出力的同时,频率也随之下降,机组运行点 E 沿着 P_{G2} 上移; 包含电动汽车的负荷静态特性的功率在自身的调节效应下而减少,负荷运行点 A 沿着 P_{L2} 下移, C 点为最新的稳态运行点。此时电动汽车负荷参与电网的二次调频,假设电动汽车负荷充/放电功率下降 ΔP_2 , 负荷静态特性曲线由 P_{L1} 下降至 P_{L2} , 最终稳态运行点由 C 点移动至 D 点,最终频率为 f' 。

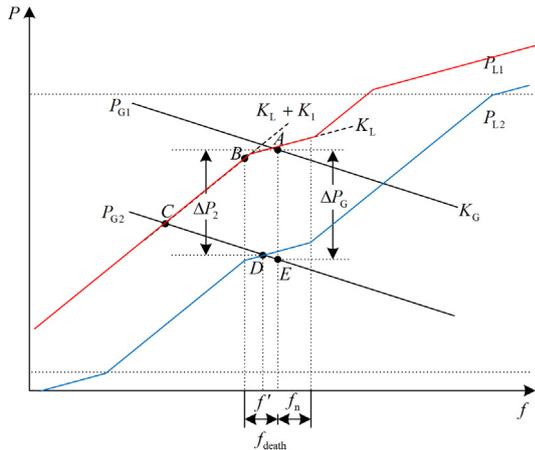


图 5 电动汽车接入电网的静态频率特性曲线

Fig. 5 Static frequency characteristic curve of electric vehicle connected to power grid

一般取 $f' = f_n$ ，由图 5 计算 ΔP_2 为

$$\Delta P_2 = K_L(f_n - f_{death} - f) + (K_G + K_L)(f_n - f) \quad (45)$$

本文忽略常规负荷频率静态特性，取 K_L 为 0，式(45)可表示为

$$\Delta P_2 = K_L(f_n - f_{death} - f) + K_G(f_n - f) \quad (46)$$

第一级采用开环控制， ΔP_2 可快速补偿电网功率缺额，但 ΔP_2 的计算中忽略了 K_L ，频率的二次调整存在偏差。引入第二级积分控制，消除第一级的

微小频率偏差，实现频率的无差调节。取实际频率偏差量，通过一个系数为 $1/T$ 的积分环节得到补偿后的二次调频功率 $\Delta P'_2$ 。

设计如附录 A 图 A7 所示二次调频环节，充/放电功率参考值 P'_{set} 为

$$P'_{set} = P_{set} - \Delta P_2 - \Delta P'_2 \quad (47)$$

最终充/放电功率参考值 P_{EV}^{set} 的取值参照充放电功率参考值 P'_{set} 与一次调频功率 ΔP_1 的和是否处于充放电功率上、下限 P_{max} 、 P_{min} 区间，具体如式(48)所示。

$$P_{EV}^{set} = \begin{cases} P'_{set} + \Delta P_1 & P'_{set} + \Delta P_1 \in [P_{min}, P_{max}] \\ P_{max} & P'_{set} + \Delta P_1 > P_{max} \\ P_{min} & P'_{set} + \Delta P_1 < P_{min} \end{cases} \quad (48)$$

将 P_{EV}^{set} 作为电动汽车控制信号，进行功率跟踪，如附录 A 图 A8。电动汽车调频功率 P_{EV} 可表示为

$$P_{EV} = U_{EV} I_{EV} \quad (49)$$

控制流程如附录 A 图 A9 所示。

3 充换电站调频模型

搭建如图 6 所示充换电站调频模型，以区域控制误差 ACE 快速稳定至 0 和输入尽可能小为控制目标。

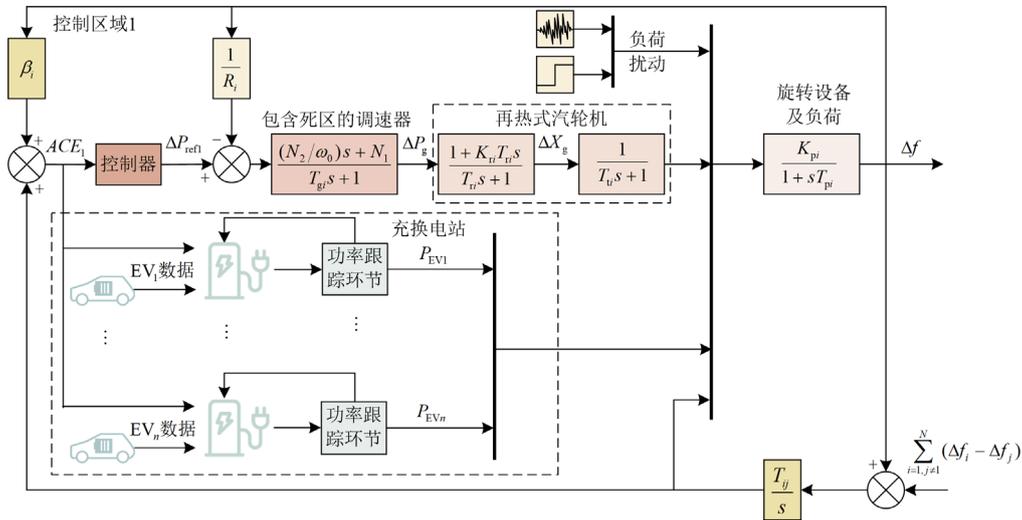


图 6 充换电站调频模型

Fig. 6 Frequency regulation model for charging and discharging power stations

当电网出现负荷扰动时，区域控制误差信号与 EV 自身数据输入充换电站。EV 模型通过式(31)~式(35)评估自身充放电能力，得到一次调频参数，与改进的二次调频环节共同计算得到 P_{EV} ，实现电网的功率平衡。

4 仿真分析

电动汽车参数设置见附录 B 表 B1，电动汽车模型参数见附录 B 表 B2。区域模型基本参数设置见表 1，有功功率设定为 200 MW，两个区域参数

设置一致。

表 1 区域模型基本参数

Table 1 Basic parameters of area model

参数	数值	参数	数值
T_{gf}/s	0.08	K_{pi}	120
T_{ri}/s	10	R_i	2.4
T_{ti}/s	0.35	K_{ri}	0.55
T_{pi}/s	20	—	—

4.1 电动汽车充/放电能力仿真

对不同电动汽车 EV1—EV4 在 10 h 内的充/放电能力进行仿真验证, 电动汽车的充/放电能力曲线如图 7、图 8 所示。放电能力随着荷电状态量的增加逐渐增强, 至运行边界时, 放电能力逐渐下降; EV 运行至自身期望离网时间 t_d 时, 放电能力下降至 0; EV2 较其他电动汽车具有更强的放电能力, 因为其上网时间长、初始荷电状态量更大, 可提供更多调频容量。与之相反, 充电能力随着荷电状态量的增加逐渐降低, 接近运行边界时, 下降速度提高。

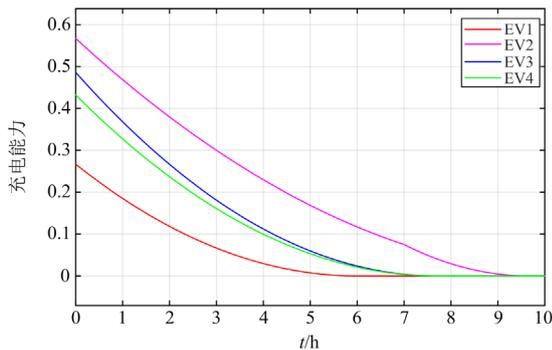


图 7 充电能力曲线

Fig. 7 Charging capacity curve

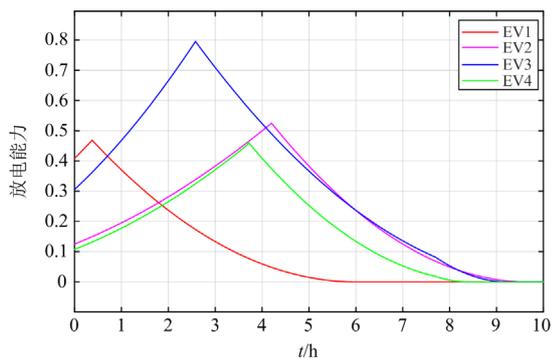


图 8 放电能力曲线

Fig. 8 Charge capacity curve

4.2 电动汽车充/放电功率仿真

为验证本文所提电动汽车模型的可行性, 设定电网在 5 s 和 25 s 时分别出现 -0.01 p.u.和 $+0.01$ p.u.

的负荷扰动, 电动汽车功率 P_{EV} 变化曲线如图 9 所示。

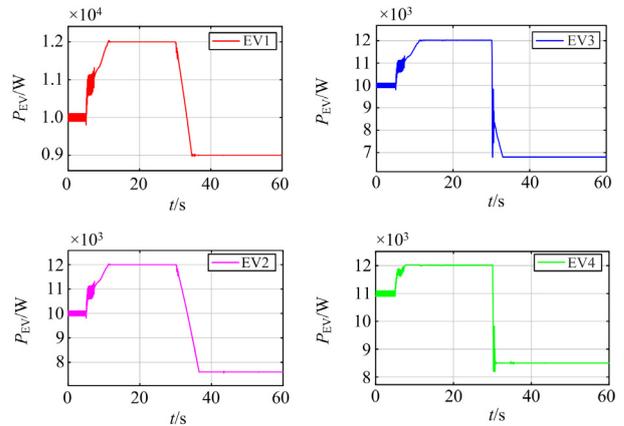


图 9 电动汽车功率变化曲线

Fig. 9 Power change curve of electric vehicle

在 5 s 时, 电网出现负荷突降, 电动汽车跟随控制策略充电, 消耗额外功率; 在 25 s 时, 电网出现低频问题, 负荷功率富余, 电动汽车转换为放电模式, 降低自身功率消耗。仿真分析在 60 s 内, 电动汽车先随自身 P_{set} 运行; 当电网出现频率偏差并越过调频死区时, 电动汽车根据控制策略及自身参数, 计算得到 P_{EV} 并进行功率跟踪。当电动汽车功率持续增加或减小时, 运行至自身功率限制 P_{max} 、 P_{min} 时停止变化并保持最大充、放电功率运行, 在保证电动汽车自身安全运行的基础上, 精准地实现增、减负荷, 支持电网功率平衡。

4.3 充换电站辅助调频仿真

为验证本文充换电站调频模型的有效性, 仿真分析场景一(白天某时刻)和场景二(夜晚某时刻)充换电站参与电网调频情况。电网功率设置为 300 MW。

4.3.1 阶跃扰动工况

1) 低频问题

系统 5 s 时负荷增加 0.01 p.u., 如图 10 所示, 电网出现频率跌落, 无充换电站下最大频率偏差为 0.066 Hz, 此时仅传统机组参与调频, 频率偏差较大。场景一充换电站参与辅助调频, 频率最大跌落为 0.032 Hz, 场景二频率最大跌落为 0.038 Hz。电网出现负荷激增时, 充换电站内电动汽车跟随指令进行放电, 场景二放电能力强的汽车数量较少, 较场景一其可提供的放电功率稍小。仅依靠传统机组进行调频, 频率恢复后存在振荡, 充换电站的加入不仅可使频率快速恢复稳定, 还可减少系统的频率振荡。

机组出力如图 11 所示。充换电站参与辅助调频可有效减少机组出力, 充换电站的快速响应使系统

更快实现功率平衡, 达到新的稳态。场景一下机组出力减少 35%, 场景二下机组出力减少 30%, 有效地缓解了传统机组的长时间功率增发。

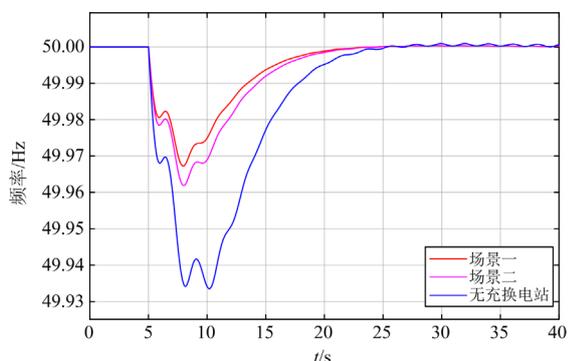


图 10 低频问题下电网频率变化曲线

Fig. 10 Frequency variation curve of microgrid under low-frequency issues

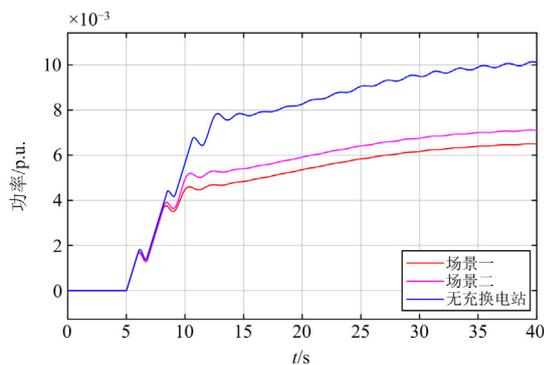


图 11 低频问题下机组功率变化曲线

Fig. 11 Curves of unit power change under low-frequency issues

2) 高频问题

高频问题下的电网频率变化曲线和机组功率变化曲线如图 12、图 13 所示。

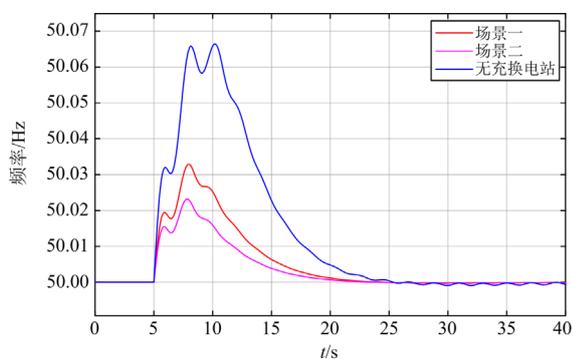


图 12 高频问题下电网频率变化曲线

Fig. 12 Frequency variation curve of microgrid under high-frequency issues

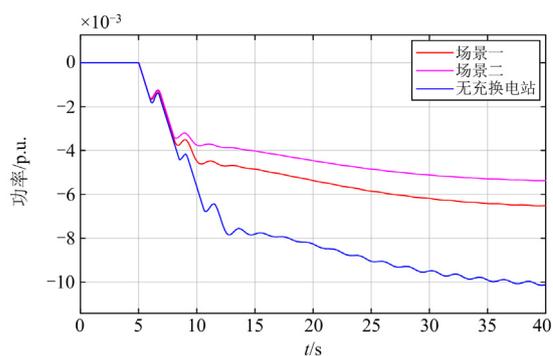


图 13 高频问题下机组功率变化曲线

Fig. 13 Curve of unit power change under high-frequency issues

系统在 5 s 时负荷出现 -0.01 p.u. 的变化, 电动汽车响应充换电站指令转换为充电模式。相较于无充换电站, 场景一频率偏差减少 0.34 Hz, 场景二频率偏差减少 0.43 Hz; 场景一机组减载减少 0.038 p.u., 场景二机组减载减少 0.048 p.u.。场景二为充换电站夜间场景, 汽车入网时间更长, 充电能力更强, 该场景下充换电站可提供更多的充电功率。相较于传统负荷只可进行减载, 无法模拟发电机增发功率, 充换电站通过将电动汽车切换到充电模式增加负荷功率消耗, 从而有效缓解电网出现的高频问题。

4.3.2 随机扰动工况

为验证本文充换电站中充/放电模式转换的有效性, 设置 60 s 的随机负荷扰动如图 14 所示。随着负荷扰动出现, 充换电站的出力跟随策略变化。当电网负荷下降时, 机组出力下降, 充换电站增加其负荷消耗以快速平衡功率。42 s 时, 由于电动汽车均达到所设置的功率上限, 充换电站功率消耗不再继续增加, 在保护电动汽车安全的同时, 满足车主的期望。

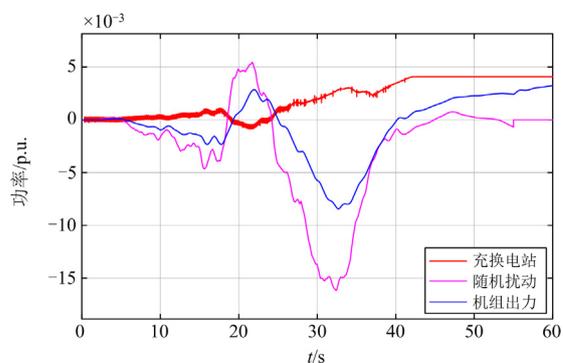


图 14 随机扰动下功率变化曲线

Fig. 14 Power variation curve under random disturbance

随机扰动下系统频率变化曲线如图 15 所示。在本文所提控制策略下，系统的频率偏差明显降低，相较于传统调频负荷，充换电站可有效提供负荷的正负偏差，对电网频率起到了支撑作用，相当于减小了系统的等效调频死区，从而获得了更好的调频效果。随机扰动更符合实际电力系统中负荷波动情况，在随机扰动下，充换电站可在充电与放电两种状态下切换，不仅有效抑制了低频问题中的频率跌落，还可提供一定的高频安全裕度。

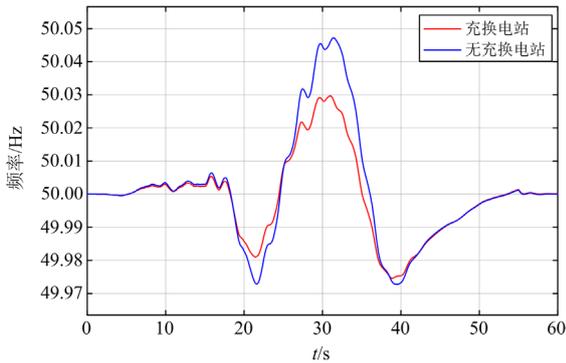


图 15 随机扰动下电网频率变化曲线
Fig. 15 Frequency variation curve of microgrid under random disturbance

5 结论

本文针对电动汽车参与调频过程中未充分考虑车主期望的问题，提出一种结合车主期望的充换电站辅助调频策略。主要工作及结论总结如下。

1) 本文所提电动汽车充/放电能力评估模型，在保证车主期望的同时，可计算出不同 EV 的有效可调功率，并进一步设计了考虑电动汽车能力的电动汽车调频功率。

2) 基于有功-频率特性曲线建立电动汽车参与电网的调频模型，不同工况下电动汽车模型均可可为电网提供可靠的负荷支撑。

3) 针对所提的充换电站辅助调频策略，进行了典型工况仿真分析。仿真结果表明，所提策略在减轻机组调频负担的同时，可有效提高电网调频质量。

随着新型电力系统和“双碳”目标的不断推进，电网频率稳定性问题日益突出，电动汽车在电网中可作为可控负荷或分布式电源，在功率平衡中发挥着更重要的作用。如何将充换电站与政府配套政策、激励机制与运营机制结合仍有待进一步研究。

附录 A

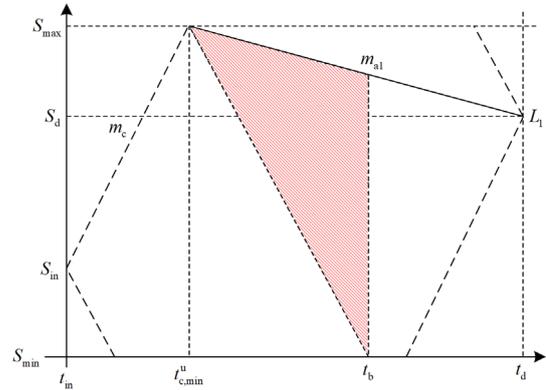


图 A1 非运行边界下电动汽车最大放电曲线
Fig. A1 Maximum discharging curve of electric vehicle under non operating boundaries

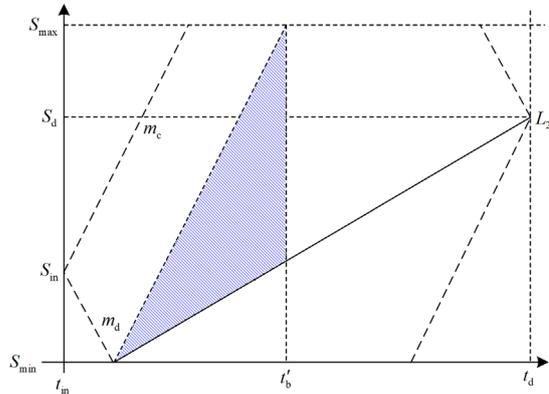


图 A2 非运行边界下电动汽车最大充电曲线
Fig. A2 Maximum charging curve of electric vehicle under non operating boundaries

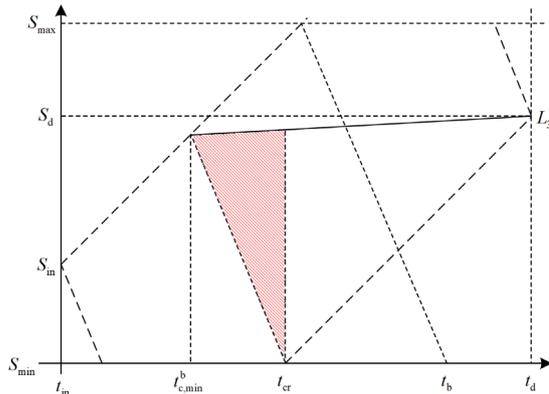


图 A3 运行边界下电动汽车最大放电曲线
Fig. A3 Maximum discharge curve of electric vehicle under operating boundaries

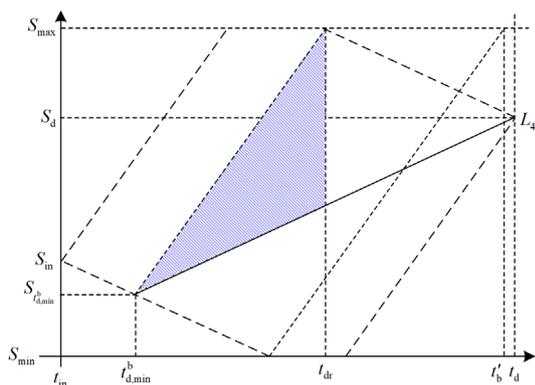


图 A4 运行边界下电动汽车最大充电曲线
Fig. A4 Maximum charging curve of electric vehicle under operating boundaries

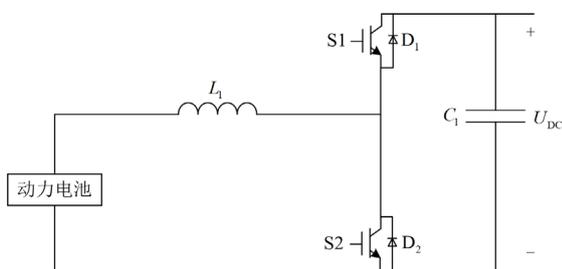


图 A5 电动汽车双向充/放电控制结构图
Fig. A5 Bi-directional charging/discharging control structure diagram of electric vehicle

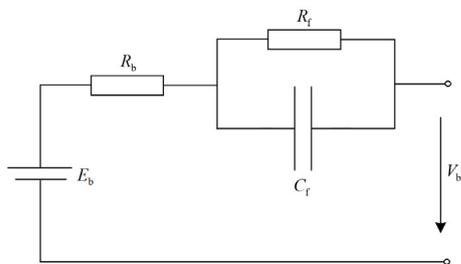


图 A6 R-RC 动力电池模型
Fig. A6 R-RC power battery model

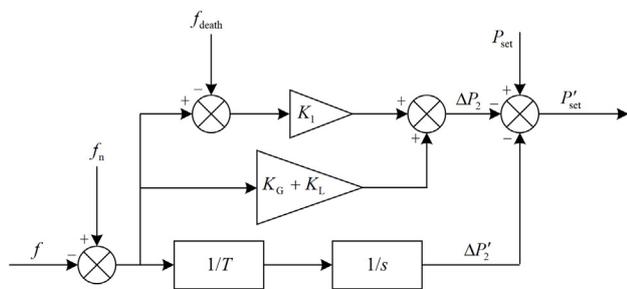


图 A7 二次调频环节
Fig. A7 Secondary frequency modulation

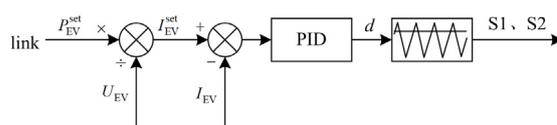


图 A8 电动汽车调频功率环节
Fig. A8 Frequency modulation power link of electric vehicle

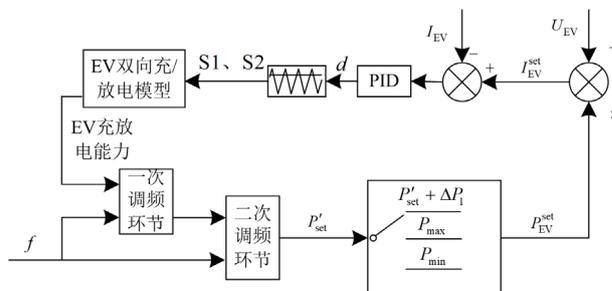


图 A9 电动汽车双向充/放电控制流程图
Fig. A9 Flow chart of bidirectional charging/discharging control for electric vehicles

附录 B

表 B1 电动汽车参数设置

Table B1 Electric vehicle parameter settings

参数	EV1	EV2	EV3	EV4
$S_d/\%$	0.7	0.7	0.9	0.85
$S_{min}/\%$	0.15	0.15	0.1	0.15
$S_{max}/\%$	0.9	0.9	0.95	0.95
$S_m/\%$	0.5	0.35	0.4	0.35
m_d	0.2	0.2	0.2	0.35
m_c	0.2	0.2	0.2	0.25
t_d/h	5	9	9	8
t_{in}/h	2	2	2	4
P_{max}/W	12 000	12 000	13 000	13 000
P_{min}/W	9000	7600	7000	8500
P_{set}/W	10 000	10 000	10 000	11 000
f_{death}/Hz	0.001	0	0.001	0
场景一数量/辆	300	150	50	50
场景二数量/辆	100	100	300	50

表 B2 电动汽车模型参数

Table B2 Electric vehicle model parameters

参数	数值	参数	数值
V_b/V	381	C_f/mF	10
R_b/Ω	0.1	L_1/mH	10
R_f/Ω	0.1	$R_{D1}, R_{D2}/\Omega$	0.001
$C_f/\mu F$	40	K_1	30 000
T	0.0005	f_n/Hz	50

参考文献

- [1] 叶婧, 杨莉, 张磊, 等. 计及暂态频率稳定约束的同步惯量经济价值评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 50-62.
YE Jing, YANG Li, ZHANG Lei, et al. Economic value evaluation of synchronous inertia considering frequency transient stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 50-62.
- [2] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [3] 李世春, 宋秋爽, 薛臻瑶, 等. 含风电虚拟惯性响应的新能源电力系统惯量估计[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 84-93.
LI Shichun, SONG Qiushuang, XUE Zhenyao, et al. Inertia estimation of new energy power system with virtual inertia response of wind power[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 84-93.
- [4] FARROKHABADI M, CANIZARES C, SIMPSON-PORCO J W, et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 13-29.
- [5] KUNDUR P, PASERBA J, VITTAL V, et al. Closure of "definition and classification of power system stability"[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 446.
- [6] 陈沛, 张新松, 郭晓丽, 等. 考虑 AGC 指令随机特性的火-储混合电站二次调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 168-177.
CHEN Pei, ZHANG Xinsong, GUO Xiaoli, et al. Research on secondary frequency regulation of thermal-storage hybrid power station considering random characteristics of AGC command[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 168-177.
- [7] 何廷一, 孙领, 李胜男, 等. 考虑风速差异的风电场卸载方案与一次调频策略[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 139-148.
HE Tinyi, SUN Ling, LI Shengnan, et al. Research on deloading scheme and primary frequency regulation strategy of wind farm considering wind speed difference[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 139-148.
- [8] 朱永胜, 苗阳, 谢晓峰, 等. 新能源微电网多层级车网协同优化策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 61-68.
ZHU Yongsheng, MIAO Yang, XIE Xiaofeng, et al. Multi-level vehicle-grid collaborative optimization strategy for new energy microgrid[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 61-68.
- [9] LI X J, MA R, GAN W, et al. Optimal dispatch for battery energy storage station in distribution network considering voltage distribution improvement and peak load shifting[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(1): 131-139.
- [10] LI Y Z, CAI Y H, ZHAO T Y, et al. Multi-objective optimal operation of centralized battery swap charging system with photovoltaic[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(1): 149-162.
- [11] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.
MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 30-35.
- [12] 陈天锦, 牛高远, 甘江华, 等. 基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 充放电系统研究及样机实现[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 131-141.
CHEN Tianjin, NIU Gaoyuan, GAN Jianghua, et al. Research and prototype implementation of electric vehicle V2G charging and discharging system based on virtual synchronization strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 131-141.
- [13] 蔡黎, 葛棚丹, 代妮娜, 等. 电动汽车入网负荷预测及其与电网互动研究进展综述[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 96-103.
CAI Li, GE Pengdan, DAI Nina, et al. Review of research progress on load prediction and grid interaction of electric vehicles[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 96-103.
- [14] 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.
- [15] 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 V2G technology for electric vehicles based on virtual synchronization strategy in multi energy complementary systems[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (13): 143-150.

- [16] 杨帆, 王维庆, 何山, 等. 基于多场景运行模拟的风-储-车容量随机规划[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1161-1171. YANG Fan, WANG Weiqing, HE Shan, et al. Stochastic planning of wind-storage-vehicle capacity based on multi-scenario operation simulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1161-1171.
- [17] MENG J, MU Y, JIA H, et al. Dynamic frequency response from electric vehicles considering travelling behavior in the Great Britain power system[J]. Applied Energy, 2016, 162: 966-979.
- [18] SINGH S, JAGOTA S, SINGH M. Energy management and voltage stabilization in an islanded microgrid through an electric vehicle charging station[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 41: 679-694.
- [19] ZECCHINO A, D'ARCO S, ENDEGNANEW AG, et al. Enhanced primary frequency control from EVs: a fleet management strategy to mitigate effects of response discreteness[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(3): 436-444.
- [20] ZHU X, XIA M, CHIANG H D. Coordinated sectional droop charging control for EV aggregator enhancing frequency stability of microgrid with high penetration of renewable energy sources[J]. Applied Energy, 2018, 210: 936-943.
- [21] 张一媚, 董朝宇, 董晓红, 等. 含电动汽车集群调频的信息能源系统谱特征和稳定性评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 12-20. ZHANG Yimei, DONG Chaoyu, DONG Xiaohong, et al. Spectral feature and stability assessment for cyber-energy system with frequency regulation of electric vehicle cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 12-20.
- [22] 陈文哲, 孙海顺, 徐瑞林, 等. 电动汽车参与调频服务的云边融合分层调控技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 914-927. CHEN Wenzhe, SUN Haishun, XU Ruilin, et al. Research on cloud edge fusion layered regulation technology for electric vehicle participation in FM service[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 914-927.
- [23] 芮月晨, 肖国春, 何玉瑞, 等. 基于虚拟电阻的电动汽车负荷虚拟同步机调频性能优化策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 210-217. RUI Yuechen, XIAO Guochun, HE Yurui, et al. Optimization strategy for frequency modulation performance of electric vehicle load virtual synchronizer based on virtual resistance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 210-217.
- [24] 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.
- [25] CUI Y, HU Z C, LUO H C. Optimal day-ahead charging and frequency reserve scheduling of electric vehicles considering the regulation signal uncertainty[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5824-5835.
- [26] YAO E X, 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.
- [27] 朱小鹏, 卫志农, 颜全椿, 等. 基于虚拟惯性自适应算法的电动汽车控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 134-141. ZHU Xiaopeng, WEI Zhinong, YAN Quanchun, et al. Electric vehicle control strategy based on virtual inertia adaptive algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 134-141.
- [28] 王明深, 潘益, 缪惠宇, 等. 考虑用户多样化需求的电动汽车集群调频控制策略[J/OL]. 现代电力: 1-9[2023-07-10]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0355>. WANG Mingshen, PAN Yi, MIAO Huiyu, et al. Electric vehicle cluster frequency control strategy considering diverse user needs[J/OL]. Modern Electric Power: 1-9 [2023-07-10]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0355>.
- [29] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140. HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on the use of electric vehicle schedulable capacity to assist power grid frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.

收稿日期: 2023-08-23; 修回日期: 2023-10-12

作者简介:

骆 钊(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为区块链、电力市场与电力监管、能源互联网与电力规划、人工智能在电力系统中的应用等; E-mail: waiting.198611@live.com

聂灵峰(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制、主动配电网的应用等。E-mail: 1312901192@qq.com

(编辑 魏小丽)