

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.06.003

基于云边协同的快充站集群参与调频辅助服务柔性运营策略

胡卓毅¹, 王钢¹, 汪隆君¹, 曾德辉², 刘沈全¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广州嘉缘电力科技有限公司, 广东 广州 510610)

摘 要:针对当前快速充电电动汽车集群(fast charging electrical vehicle aggregation, FEVA)聚合商营收来源有限的问题,构建基于云边协同的快速充电站(fast charging station, FCS)集群参与调频辅助服务柔性运营策略,引导车主参与调频,在保证车主充电体验的同时提升聚合商收益。该策略以云平台和边缘终端为核心,以电动汽车(electric vehicle, EV)的最大充电功率-电池荷电状态关系为约束,求解备选充电方案集合供车主选择;基于云平台分解调频信号到 FCS,协同参与调频;借助场景状态机描述 FCS 场景及转换关系,围绕运营场景建立精细化数学模型,应用边缘终端就地管理 FCS,即分配 FCS 内 EV 功率、鼓励车主提前结束充电并离开;结合深度学习模型算法预测次日调频容量,用于调频辅助服务容量申报。算例验证了所提策略能准确预测调频容量、满足车主多样化的充电需求、大幅提升聚合商收益,且云边协同架构更适用于调频辅助服务场景。

关键词:电动汽车(EV);快速充电站(FCS);调频辅助服务;车主意愿;云边协同;状态机;柔性运营策略

中图分类号:TM732;U469.72

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)06-0025-12

0 引言

相较于功率仅有 7~10 kW 的交流慢充,现阶段直流快充功率普遍大于 60 kW,新一代产品单枪功率可超 100 kW^[1],极大地缩短了电动汽车(electric vehicle, EV)充电时长,缓解了 EV 车主的里程焦虑,备受车主青睐^[2-3]。相应地,由直流充电桩构成的 EV 快速充电站(fast charging station, FCS)数量也快速增长。聚合多个 FCS 并为快速充电电动汽车集群(fast charging electrical vehicle aggregation, FEVA)提供充电管理的聚合商若仍采用仅赚取充电服务费的运营策略,将难以面对愈发激烈的市场竞争。因此有必要进一步完善 FEVA 运营策略以丰富其营收来源^[4]:(1)发挥 EV 更宽的柔性功率调节能力^[5],挖掘 FEVA 参与调频辅助服务的潜力,同时获取调频收益^[6];(2)适配车主多样化的充电需求,制定备选充电方案集合,提升车主充电体验^[7];(3)减轻高峰时段充电设施数量不足造成的影响^[8]。

聚合商分配 FEVA 内各 EV 充电功率的前提是全面掌握 EV 充电行为,其关键技术是量化直流充电桩及 EV 电池管理系统(battery management system, BMS)对充电过程的影响,即对 EV 充电过程的时序功率精细化建模。与充电全过程内充电功率恒定的交流慢充不同,直流快充具有以下特点:(1)输出电压、电流灵活可调^[9],使得 EV 充电

功率可连续调整^[5,10];(2)BMS 会依据电池荷电状态(state of charge, SOC)的具体数值,不断调整所允许的最大充电功率 P_{\max} ,从而维护 EV 电池健康^[7]。采用假设 P_{\max} 恒定的 EV 充放电功率可行域模型^[11]会大幅降低求解的时序功率的准确性,故部分学者基于实测数据,使用分段线性函数近似描述 EV 最大充电功率-电池荷电状态(P_{\max} -SOC)曲线,构建的 EV 优化调控模型为混合整数线性规划形式^[7]。新的充电特性与建模方式使大量用于交流慢充的 EV 调控算法不再适用^[12-14]。

利用直流快充灵活功率调整能力的运营策略赋予了 FEVA 聚合商多种创收途径,如响应分时电价^[15-17]、参与调频辅助服务^[18-20]等。但这类算法既没有考虑车主实际参与的主观意愿,也缺少返利鼓励车主响应调控,而是理想地默认车主完全服从运营商的安排。工程应用中充电算法应充分考虑车主充电需求^[21]。由于 EV 充电场景及车主充电偏好各异,充电需求呈现多元化特点^[22];电动巴士运营商倾向于较低的充电支付费用和较高的 SOC 目标值^[23-24];电动卡车车主综合考虑充电支付费用与充电持续时间^[25-26];家用 EV 车主倾向快速补电^[27]。故 FEVA 运营需要更多的柔性,以期实现:(1)向车主提供若干种充电服务方案,各方案充电支付费用、充电持续时间以及 SOC 目标值权重不同;(2)在满足车主偏好的情况下,引导车主参与辅助服务以增加商业收益。然而,日常运营过程中 EV 不间断到达,EV 车主偏好不尽相同,充电桩功率分配被频繁调用,其中一次调频需要就地测量计算,这对

收稿日期:2024-05-21;修回日期:2024-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207103);广东省自然科学基金资助项目(2023A1515011035)

FCS 侧实时计算性能有较高的要求。

当前聚合商大多采用基于云平台集中接入的软件运营服务^[28-29]：充电桩通过公网与聚合商云平台通信，并集中在云平台上执行运营策略和充电计费等功能，缴纳费用包括充电电费和服务费。充电桩功率分配所需的算力资源可能导致云平台日常经营服务阻塞甚至崩溃。为此，需要云边协同的架构支撑日常运营：通过云平台聚合若干 FCS 资源参与调频辅助服务，将充电桩功率分配算法部署到安装于 FCS 并网点的边缘终端，就地分析计算，并执行云平台下发的控制指令，以协同管理 FCS。

综上，现有 FEVA 参与调频辅助服务策略在 EV 充放电功率可行域描述、车主体验及调频调度架构上均存在缺陷：EV 充放电功率可行域模型难以精细化描述 P_{\max} 时变的快充行为；缺少返利的运营模式难以引导车主在牺牲充电时间的情况下参与调频；由云平台统一分配所辖 EV 调频功率的集中接入架构难以处理海量计算、通信任务。

为此，文中提出基于云边协同的 FEVA 参与调频辅助服务柔性运营策略。聚合商基于云平台及边缘终端：(1) 为车主提供备选充电方案集合，引导车主参与调频辅助服务；(2) 分解调频信号到各 FCS，协同参与调频；(3) 围绕场景状态机描述 FCS 的不同运营场景并分别精细化建模；(4) 提出日调频容量评估模型，结合深度学习模型算法预测 FEVA 次日可供调用的二次调频容量。

1 基于云边协同的柔性运营策略架构

为满足 EV 车主多样化充电需求、引导其参与调频，并协同多个 FCS 统一参与调频辅助服务，文中提出基于云边协同的聚合商柔性运营策略，其架构如图 1 所示。聚合商通过边缘终端-云平台-车主手机应用(application, app)交互信息，与电网友好互动，实现调频信号分解与执行、在线支付与服务结算等功能。其中，一次调频由边缘终端就地测量快速响应，二次调频信号由调度中心下发。边缘终端被聚合商部署在 FCS 并网点，就地采集 FCS 频率、电压、电流等电气信息，执行云平台功率指令并分配至每个快充桩。

FEVA 柔性运营策略具体流程如下：

(1) 新 EV 接入充电桩后，聚合商通过边缘终端从充电桩获取 EV 信息，依据 EV 型号检索 P_{\max} -SOC 曲线。

(2) 根据 EV 信息及车主设置，借助边缘终端为车主制定备选充电方案集合，发送至手机 app；车

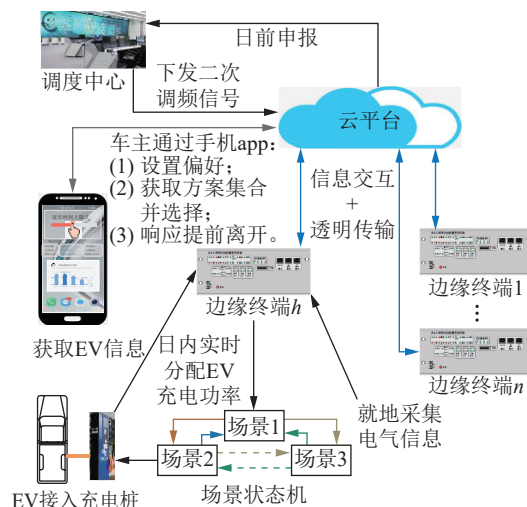


图 1 基于云边协同的柔性运营策略架构

Fig.1 A flexible operation strategy architecture based on cloud-edge collaborative

主根据自身偏好从中选择并确认合适的充电方案。边缘终端借助云平台构建的透明传输通道，间接实现与车主手机 app 通信。

(3) 云平台实时地将二次调频信号分解为各 FCS 的二次调频信号并下发，依据是由边缘终端实时评估并上传的 FCS 调频容量。鉴于各 FCS 可独立响应功率调节指令，为减轻云平台资源压力，边缘终端执行指令时进一步分解到各快充桩实现 FCS 就地管理。具体地，构建 FCS 场景状态机，依据车主偏好滚动分配 EV 功率，并给对应充电桩下发功率指令；依据 FCS 空闲充电桩数量，基于价格信号引导车主尽快完成充电并提前离开。

(4) 大量 EV 参与一次调频，频率本地测量和充电功率调整实时计算会给云平台带来巨大的计算压力，为此将一次调频功能就地部署于边缘终端。

(5) 当日运营结束后，边缘终端需要恢复当天未参与调频的功率曲线，云平台基于汇总的 FCS 数据预测 FEVA 次日可提供的二次调频容量，向电网调度中心申报。

采用柔性运营策略后，FEVA 营收来源不仅有向车主收取的充电服务费，还有从电力辅助服务市场获取的一次调频收益、二次调频里程收益以及二次调频容量收益。

2 EV 备选充电方案集合

在上述柔性运营策略架构中，每当新的 EV 接入充电桩时，聚合商便利用相应的边缘终端，根据 EV 型号及目标 SOC，求解出考虑偏好的备选充电方案集合供车主选择。EV 车主考虑的要素为充电支付费用、充电持续时间及 SOC 目标值。

2.1 考虑 P_{\max} -SOC 的单体 EV 充电约束

设 $X_{h,i}$ 为第 h 个 FCS 内第 i 辆 EV, 构建其以 Δt 为步长的离散充电约束。

$$0 \leq P_{h,i,j} \leq P_{\max}(S_{h,i,j}) \quad (1)$$

$$P_{h,i,j} = \begin{cases} \frac{(S_{h,i,j} - S_{h,i,j-1})Q_{h,i}}{\Delta t} & j > 1 \\ \frac{(S_{h,i,j} - S_{h,i,0})Q_{h,i}}{\Delta t} & j = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: j 为时段序号, 时段 j 对应 $[(j-1)\Delta t, j\Delta t]$ 时段区间; $P_{h,i,j}$ 为 $X_{h,i}$ 在时段 j 的充电功率; $P_{\max}(S_{h,i,j})$ 为 BMS 所允许的最大充电功率随 SOC 值变化的非线性函数, 函数形式视 EV 型号而定^[5], 可按文献^[7]方法线性化; $S_{h,i,j}$ 为 $X_{h,i}$ 在 j 时段末的 SOC 值; $Q_{h,i}$ 为 $X_{h,i}$ 的电池容量; $S_{h,i,0}$ 为 $X_{h,i}$ 初始 SOC 值。

2.2 备选充电方案集合生成方法

图 2 为备选充电方案集合生成方法, 车主按图 2 所示流程与聚合商互动。以 $X_{h,i}$ 为例, 车主将 $X_{h,i}$ 接入充电桩后, 在手机 app 上操作, 根据个人偏好调整调频可延长时间上限 $T_{d,h,i}$ (为 Δt 整数倍), 设置本次充电的目标荷电状态 $S_{e,h,i}$, 在生成的备选充电方案集合中做选择。备选充电方案均由充电时长及对应充电费用构成。方案集合由 FCS 侧边缘终端本地计算生成。

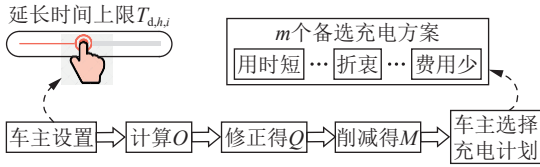


图 2 备选充电方案集合生成方法

Fig.2 Alternative charging schemes generation method

(1) 形成不参与调频辅助服务的备选充电方案集合 O 。利用分时电价构建以 $P_{h,i,j}$ 为优化变量的单体 EV 充电方案模型, 该模型以车主不参与调频时充电时长 $T_{h,i}$ 短以及充电费用 $K_{h,i}$ 低为双目标求解 $P_{h,i,j}$, 如式(3)所示, 约束条件为式(1)、式(2)、式(4)—式(7)。

$$\min_{P_{h,i,j}} \{T_{h,i}, K_{h,i}\} \quad (3)$$

$$T_{\min,h,i} \leq T_{h,i} \leq T_{\min,h,i} + T_c \quad (4)$$

$$K_{h,i} = \sum_{j=1}^{T_{h,i}/\Delta t} c_{1,j} P_{h,i,j} \Delta t \quad (5)$$

$$S_{h,i,T_{h,i}/\Delta t} \geq S_{e,h,i} \quad (6)$$

$$1 \leq j \leq T_{h,i}/\Delta t \quad (7)$$

式中: $T_{\min,h,i}$ 为 $X_{h,i}$ 所需的最短充电时长, 可按文献^[30]方法求解; T_c 为充电额外时长常数; $c_{1,j}$ 为时段 j 车主需支付的度电费用; $S_{h,i,T_{h,i}/\Delta t}$ 为 $X_{h,i}$ 充电结束时

SOC 值。在式(4)限定的可行域内遍历 $T_{h,i}$, 分别求解对应的 $K_{h,i}$, 形成方案集合 O 。式(1)、式(2)保证 $X_{h,i}$ 充电过程满足 P_{\max} -SOC 约束。式(5)求得分时电价下车主所需支付的充电费用。式(6)保证在充电结束时荷电状态达到 $S_{e,h,i}$ 。式(7)限定模型考虑的时间范围。

(2) 修正得到参与调频辅助服务的备选充电方案集合 Q 。聚合商可根据车主设置的 $T_{d,h,i}$ 适当延长 $T_{h,i}$, 并给予车主调频补偿, 调频补偿上限 $K_{d,h,i}$ 为 $T_{d,h,i}k_0$, k_0 为调频补偿系数。同时, 为提高方案可行性, 引入充电时间裕度 T_r , 充电费用裕度 K_r 。 $T_{d,h,i}$ 、 $K_{d,h,i}$ 、 T_r 、 K_r 共同按式(8)修正集合 O , 形成集合 Q 。

$$\begin{cases} T'_{h,i} = T_{h,i} + T_{d,h,i} + T_r \\ K'_{h,i} = K_{h,i} - K_{d,h,i} + K_r \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T'_{h,i}$ 、 $K'_{h,i}$ 分别为集合 Q 中 $x_{h,i}$ 充电时长及费用。

(3) 为满足部分车主快速补电需求, 保留 Q 中充电用时最短方案; 同时为避免车主选择困难, 采用基于 K -means 聚类的削减方法^[31]从 Q 的剩余方案中提取 $m-1$ 个代表方案。二者并集构成备选充电方案集合 M , 记车主最终所选方案的充电费用及充电时长分别为 $K_{c,h,i}$ 与 $T_{c,h,i}$ 。

3 FEVA 的柔性功率分配

3.1 FCS 运营场景描述及场景转换关系

以第 h 个快充站 FCS _{h} 为例, FCS 侧边缘终端结合车位占用、本地测量及云平台下发的二次调频信号 $\Delta P_{h,AGC}$, 滚动地向快充桩发布功率指令。因此 FCS 存在多种运营场景且场景间存在切换。场景 1: 不参与调频且充电桩充足。场景 2: 不参与调频且充电桩不足, 新到达 FCS _{h} 的 EV 因可用充电桩不足而无法充电。场景 3: 参与调频, 综合 FCS _{h} 内车主所选充电方案, 边缘终端将 FCS _{h} 调频所需的功率调节总额 ΔP_h 分配到 FCS _{h} 内充电的各 EV 上。

上述场景由事件触发切换, 关系如图 3 所示。边缘终端本地测得系统频率超出死区早期, 参与一次调频时为场景 3; 接收到 $\Delta P_{h,AGC} \neq 0$, 参与二次调频时也为场景 3; 退出调频后, 若 FCS 内充电桩充足则回到场景 1, 若充电桩不足则回到场景 2。分配到 $X_{h,i}$ 的功率 $P_{h,i}$ 需要考虑功率基准值 $P_{h,i,base}$ 及功率调节指令 $\Delta P_{h,i}$ 。

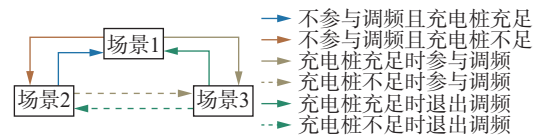


图 3 场景转换关系

Fig.3 Scene transformation relationship

3.2 场景 1 建模

边缘终端以 Δt 为间隔滚动求解以 FCS_h 获得充电服务费最多为目标的分时功率分配模型,约束条件为式(1)、式(2)、式(10)一式(12)。更新场景 1 下 $X_{h,i}$ 的充电功率基准值 $P_{h,i,base}$, 满足车主所选方案。

$$\max_{P_{h,i,j}} F_{h,1} = \sum_{j=1}^{J_h} \left(c_{2,j} \sum_{i=1}^{I_h} P_{h,i,j} \Delta t \right) \quad (9)$$

$$\begin{cases} K_{b,h,i} = K_{c,h,i} + K_{d,h,i} \\ T_{b,h,i} = T_{c,h,i} - T_{d,h,i} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} S_{h,i,T_{b,h,i}/\Delta t} \geq S_{e,h,i} \\ T_{b,h,i}/\Delta t \\ \sum_{j=1}^{J_h} P_{h,i,j} C_{1,j} \Delta t \leq K_{b,h,i} \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{h,i,base} = P_{h,i,1} \quad (12)$$

式中: $F_{h,1}$ 为 FCS_h 获取的充电服务费; $c_{2,j}$ 为时段 j 的度电服务费; J_h 为 FCS_h 模型包含的时段数,由充电计划时长最大的 EV 确定; I_h 为 FCS_h 内现有充电 EV 总数; $T_{b,h,i}$ 、 $K_{b,h,i}$ 分别为不参与调频的充电时长和充电费用。

3.3 场景 2 建模

由 P_{max} -SOC 曲线可知, EV 充电后期功率较低且占用快充桩,阻塞其他 EV 进入充电,导致 FCS 商业收益降低。为此,构建提前离开模型,为接近满充的 EV 求解最优离开时间,依据求解结果,通过手机 app 展示提前离开补偿价格信号,鼓励车主提前结束充电并离开。流程如下:

(1) 剩余充电桩数量低于充电桩数量缺额告警值 N_x 时进入场景 2,触发后续流程。

(2) 以 S_a 为 SOC 阈值选出接近满充可提前结束充电的 EV 集合 $\{S_{h,i,0} > S_a\}$ 。建立式(13)所示提前离开模型以求解 $X_{h,i}$ 最优离开时间 $T_{a,h,i}$,使其所在充电桩收益 $C_{h,i}$ 最大。

$$\begin{cases} \max_{q_{h,i}} C_{h,i} = C_{h,i,1} + C_{h,i,2} - C_{h,i,3} \\ T_{a,h,i} = q_{h,i} \Delta t \\ C_{h,i,1} = \sum_{j=1}^{q_{h,i}} P_{h,i,j} C_{2,j} \Delta t \\ C_{h,i,2} = \varepsilon(k - q_{h,i}) \sum_{j=k}^N P_{h,i',j} C_{2,j} \Delta t \\ C_{h,i,3} = k_1 \left(S_{e,h,i} - S_{h,i,0} - \sum_{j=1}^{q_{h,i}} P_{h,i,j} \Delta t / Q_{h,i} \right) \\ N = \frac{\Delta t_a}{\Delta t} \\ 0 \leq q_{h,i} \leq N \end{cases} \quad (13)$$

式中: $C_{h,i,1}$ 为 $X_{h,i}$ 由当前时刻至离开期间产生的充

电服务费; $C_{h,i,2}$ 为新 EV 接入后产生的充电服务费; $C_{h,i,3}$ 为鼓励 $X_{h,i}$ 提前离开的充电量补偿费用; N 为模型覆盖时长 Δt_a 对应时段数; $q_{h,i}$ 为 $X_{h,i}$ 驶离时段序号, $q_{h,i} \in \mathbf{N}$; k 为新 EV 到达时段,可根据历史数据估计得到;阶跃函数 ε 表示当新 EV 在时段 k 到达 FCS 充电时,若 $X_{h,i}$ 仍占用快充桩,则新 EV 直接离开,不产生充电服务费; $P_{h,i',j}$ 为新 EV $X_{h,i'}$ 在时段 j 的功率; k_1 为提前离开的补偿系数。可通过遍历 $q_{h,i}$ 较小的可行域求解提前离开模型,并计算 $T_{a,h,i}$ 、 $C_{h,i,3}$ 及 $C_{h,i}$ 。

FCS_h 在场景 2 能获取的总收益 $F_{h,1}$ 为:

$$F_{h,1} = \sum_{i=1}^{I_h} C_{h,i} \quad (14)$$

(3) 基于求解结果,聚合商通过手机 app 展示价格信息,告知车主不同离开时刻所能获取的补偿,鼓励其提前结束充电并离开。车主基于自身充电需求决定提前驶离或继续充电,该操作与备选方案选择共同构成一次完整的充电行为。

若 FCS_h 日内共 $N_{h,a}$ 位车主响应提前离开,聚合商在 FCS_h 需要支付的提前离开补偿 $F_{h,2}$ 为:

$$F_{h,2} = \sum_{i=1}^{N_{h,a}} F_{a,h,i} \quad (15)$$

式中: $F_{a,h,i}$ 为实际给予车主提前离开的补偿,按式(16)计算,具体体现在充电账单费用减免。

$$F_{a,h,i} = \begin{cases} C_{h,i,3} & q_{h,i} \Delta t \leq T_{a,h,i} \\ |S_{e,h,i} - S_{l,h,i}| Q_{h,i} k_1 & q_{h,i} \Delta t > T_{a,h,i} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $S_{l,h,i}$ 为 $X_{h,i}$ 离开时的实际 SOC 值。

3.4 场景 3 建模

为参与调频辅助服务,边缘终端按如下流程计算 $X_{h,i}$ 的功率调节指令 $\Delta P_{h,i}$ 。

(1) 计及一次调频与二次调频计算 FCS_h 调频所需的功率调节总额 ΔP_h 。其中一次调频调节功率 $\Delta P_{h,primary}$ 由边缘终端按文献[32]依据就地采集的系统频率计算所得。

$$\Delta P_h = \Delta P_{h,AGC} + \Delta P_{h,primary} \quad (17)$$

(2) 边缘终端依据车主设置的 $T_{d,h,i}$ 将 ΔP_h 分解为多个 $\Delta P_{h,i}$ 。对所有 $T_{d,h,i} > 0$ 的 EV,按 $P_{h,i,base}$ 降序排列,优先调用排序靠前 EV,得到其对应的 $\Delta P_{h,i}$,直至 ΔP_h 完全分解或已遍历完 FCS_h 内所有 EV。

考虑秒级的调频响应指标^[33],以较短的 Δt_1 为间隔滚动计算 $\Delta P_{h,i}$ 。

调频调用后,聚合商将依据文献[33]获取相应的一次调频收益 $F_{h,3}$,二次调频里程收益 $F_{h,4}$,二次调频容量收益 $F_{h,5}$ 。其中 F_5 是根据日前申报计算所得,故无须分散至各边缘终端计算。同时,聚合商

依据调频补偿系数 k_0 及各 EV 实际被调用时长 $T_{r,h,i}$, 给予车主调频补偿 $K_{r,h,i}$, 具体体现在充电账单费用减免。

$$K_{r,h,i} = k_0 T_{r,h,i} \quad (18)$$

若 FCS_h 日内共 $N_{h,f}$ 位车主实际参与调频, 聚合商在 FCS_h 共需要支付的调频补偿 $F_{h,6}$ 为:

$$F_{h,6} = \sum_{i=1}^{N_{h,f}} K_{r,h,i} \quad (19)$$

3.5 EV 充电功率计算及计费

确定 FCS_h 所处场景后基于 $P_{h,i,base}$ 与 $\Delta P_{h,i}$, 滚动计算 $X_{h,i}$ 分配功率 $P_{h,i}$:

$$P_{h,i} = \begin{cases} P_{h,i,base} & \text{场景1、2} \\ P_{h,i,base} - \Delta P_{h,i} & \text{场景3} \end{cases} \quad (20)$$

依据收益分项计算 FCS_h 日收益 F_h :

$$F_h = F_{h,1} - F_{h,2} + F_{h,3} + F_{h,4} - F_{h,6} \quad (21)$$

FEVA 聚合 H 个 FCS , 聚合商日收益 F 为:

$$F = \sum_{h=1}^H F_h + F_5 \quad (22)$$

3.6 二次调频信号分解

如图 4 所示, 聚合商基于云边协同实时分解调度中心下发的二次调频信号 P_{AGC} 为各 FCS 的 $\Delta P_{h,AGC}$ 。

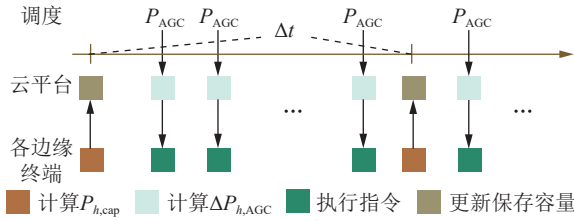


图 4 P_{AGC} 分配到 FCS 流程

Fig.4 Flow chart of P_{AGC} distribution to FCS

(1) 以 FCS_h 为例。 P_{AGC} 到达前, 边缘终端以 Δt 为间隔滚动聚合 FCS 内尚有调频调用时间的 EV 的充电功率基准值, 作为实时可用调频容量 $P_{h,cap}$ 并上传云平台。

$$P_{h,cap} = k_2 \sum_{i|T_{d,h,i}>0} P_{h,i,base} \quad (23)$$

式中: k_2 为调频容量折算系数, 反映 FCS 内 EV 充电功率基值随时间递减。折算后的 $P_{h,cap}$ 可视为 FCS_h 在 Δt 内可用调频容量下限。

(2) P_{AGC} 到达后, 云平台依据各边缘终端上传的 $P_{h,cap}$, 按式(24)等比分配各 FCS 的 $\Delta P_{h,AGC}$, 并限幅保证 $\Delta P_{h,AGC}$ 不超过 $P_{h,cap}$ 。

$$\Delta P_{h,AGC} = \min \left\{ \frac{P_{h,cap}}{\sum_{h=1}^H P_{h,cap}} P_{AGC}, P_{h,cap} \right\} \quad (24)$$

4 二次调频容量日前申报

日前申报依赖于 FEVA 二次调频容量的准确评估及预测。在云边协同的柔性运营策略下, 各 FCS 运行较为独立, 可将 FEVA 调频容量评估问题拆分为多个 FCS 的日内可用调频功率曲线评估问题。以 FCS_h 为例, 连续时段 $P_{h,cap}$ 及 $\Delta P_{h,AGC}$ 分别构成相应功率曲线。由于日内运行中已包含二次调频的调用, 应按式(25)恢复未参与调频的可用调频功率 $L_{1,h}$ 。

$$L_{1,h} = P_{h,cap} + \Delta P_{h,AGC} \quad (25)$$

聚合商通过云平台汇集各 FCS 的 $L_{1,h}$ 后, 按如下步骤预测次日调频容量。

(1) 按时段对各 $L_{1,h}$ 求和形成 FEVA 的日调频容量 L_2 。文献 [33] 规定日前申报的时间尺度 Δt_2 为 1 h, 因此以 00:00—01:00、01:00—02:00、...、23:00—24:00 为区间, 分别对各区间内的 L_2 曲线取最小值, 形成 L_3 。

(2) 基于 PatchTST 模型 [34], 以过往 14 d 的 L_3 曲线为输入, 预估次日全天的二次调频容量 L_4 , 并向调度中心申报。其中, PatchTST 是一种基于 Transformer 的时间序列预测和自监督学习模型。相较于 Transformer 及其他变体(线性分解等), PatchTST 具有以下优点: (1) 有较低的时间复杂度及空间复杂度, 能显著缩短模型训练时长; (2) 具备学习较长历史数据的能力; (3) 能显著提高长期预测的准确性。

5 云边协同工作流程

聚合商将上述多种计算、通信任务分别部署于各边缘终端或云平台, 通过云边协同实现柔性运营, 如图 5 所示, 其中虚线箭头为云边通信。作为柔性运营的核心, 边缘终端具备功率分配、统计分析及信息交互三大功能。日内运行中, 边缘终端依据场景状态机实时切换 FCS 运营场景; 场景 1 时以 Δt 间隔定时求解分时功率分配模型; 场景 2 时以 Δt 间隔定时求解提前离开模型; 场景 3 时以 Δt_1 间隔定时求取 $\Delta P_{h,i}$; 3 种场景下均需以 Δt_1 间隔, 按式(20)计算分配功率 $P_{h,i}$, 按式(23)计算 $P_{h,cap}$ 。EV 接入快充桩触发 2.2 节流程, 给每位车主制定 M , 如图 5 绿色框所示。如图 5 紫色框左侧所示, 次日调频容量申报前形成 $L_{1,h}$ 。为实现云边协同, 边缘终端向云平台上传 $P_{h,i}$ 、 $P_{h,cap}$ 、 $L_{1,h}$ 及 FCS_h 内各车主的 M , 从云平台接收 $\Delta P_{h,AGC}$ 及车主的设

定、选择。各 FCS 边缘终端工作流程相互独立。云平台实时分解调度中心下发的 P_{AGC} 并下发到 FCS_h 边缘终端,如图 5 黄色框所示。所有 FCS 的 $L_{1,h}$ 上传完成触发云平台计算流程,预测 L_4 并申报,如图 5 紫色框右侧所示。

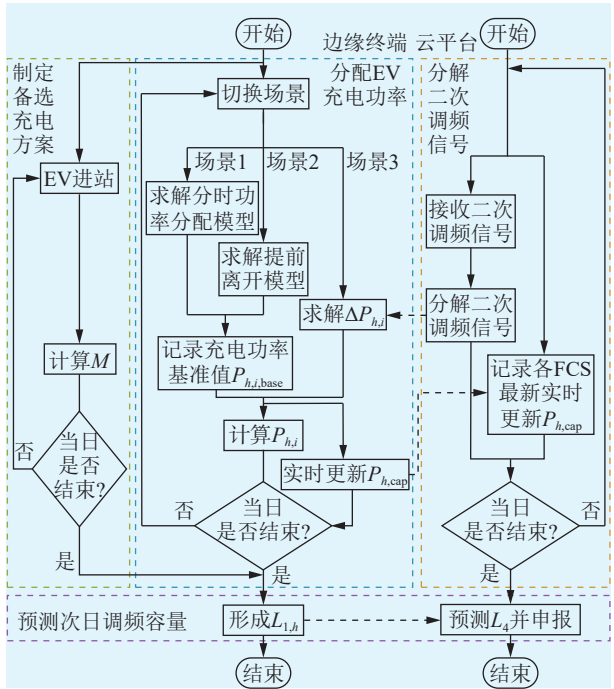


图 5 云边协同计算流程

Fig.5 Cloud-edge collaborative computing flowchart

为适配南网充电桩通信规约^[35]:边缘终端在计算 $P_{h,i}$ 后须先将结果上传至云平台;云平台计费后再返回指令至对应边缘终端;最后由边缘终端将指令下发至对应充电桩。

6 算例分析

6.1 参数说明

以深圳某 EV 聚合商为参考,设其拥有 10 座 FCS,各 FCS 内充电桩数量不同,在 40~66 个之间。为模拟车主充电偏好的多样性,设车主的选择服从均匀分布,而各车主驶入时间按某地区 2018 年—2021 年 EV 进站的历史记录设置。算例相关参数如表 1 所示,其中 $U(a, b)$ 表示取值在区间 $[a, b]$ 内均匀分布。电网频率来源于某电网调度中心区域控制误差真实信号。充电费 c_1 、服务费 c_2 来源于深圳某快充站分时电价,如表 2 所示。

6.2 调频容量评估及日前预测

次日调频容量申报前,各边缘终端就地评估所在 FCS 的 $L_{1,h}$,如图 6(a)所示;云平台接收边缘终端上送数据并汇总,形成 L_2 并进一步修正得到 L_3 ,如图 6(b)所示。

表 1 相关参数

Table 1 Relevant parameters

参数	取值
$Q_{h,i}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	$U(120, 150)$
$S_{h,i,0}$	$U(0.1, 0.3)$
$S_{e,h,i}$	$U(0.85, 1)$
$T_{d,h,i}/\text{min}$	$U(0, 15)$
T_c/min	30
$\Delta t/\text{min}$	2.5
$\Delta t_1/\text{s}$	15
$\Delta t_a/\text{min}$	20
S_a	0.75
$k_0/(\text{元}\cdot\text{min}^{-1})$	1
$k_1/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.143 6
T_r/min	5
$K_r/\text{元}$	5
m	3
N_x	10
车主选择时间最短方案(折衷、时间最短)概率	1/3
车主响应提前离开概率	0.8
k_2	0.95

表 2 分时电价

Table 2 Time of use pricing 单位:元/(kW·h)

时段	峰平谷	c_1	c_2
00:00—06:00、17:00—24:00	谷	0.584 5	0.297 9
06:00—08:00、10:00—13:00、14:00—17:00	平	0.938 4	0.229 2
08:00—10:00、13:00—14:00	峰	1.329 4	0.143 6

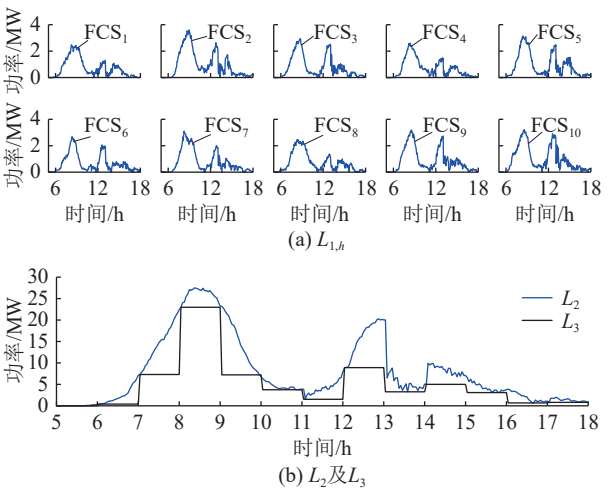


图 6 日内调频容量评估

Fig.6 Intraday frequency regulation capacity evaluation

基于 PatchTST 模型的预测结果 L_4 与实际值对比如图 7 所示。可见,云平台能预测出 FEVA 在工作日有较大调频容量,而在休息日调频容量较

低;同时,工作日调频容量预测峰值出现在 08:00—09:00 及 12:00—14:00,而在 00:00—06:00 与 18:00—24:00 后调频容量预测值约为 0。与 3 种常见预测模型,即长短期记忆^[36]、Transformer^[37]及线性分解^[38]进行横向对比,可知, PatchTST 预测精度最高。总体而言,文中方法能较准确地预测次日二次调频容量。

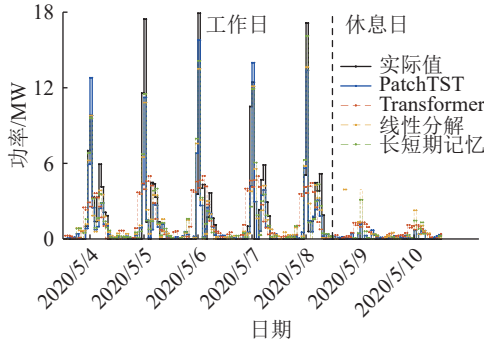


图 7 二次调频容量预测

Fig.7 Secondary frequency regulation capacity forecast

6.3 FEVA 日内运营分析

6.3.1 云平台运行分析

云平台接收到次日二次调频信号如图 8 所示。其中, P_{AGC} 由调度中心根据 6.2 节日前申报的二次调频容量生成^[39]。随后,云平台根据各 FCS 实时上传的 $P_{h,cap}$ 给 FCS_{*h*} 分配 $\Delta P_{h,AGC}$ 。

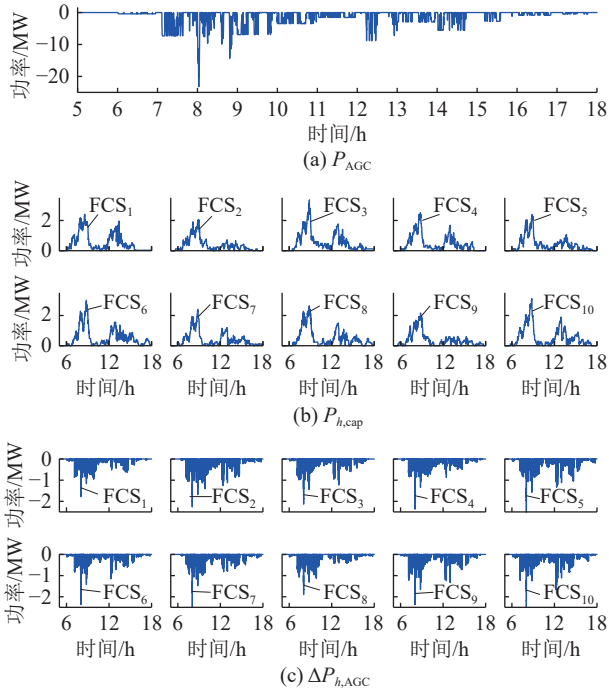


图 8 调频信号分解

Fig.8 Frequency regulation signal decomposition

6.3.2 FCS 运行分析

以 FCS₁ 为例深入分析,其服务对象为特种

EV(电动卡车、电动大巴)。若按现有运营模式,各 EV 全过程充电功率服从 P_{max} -SOC 曲线, FCS₁ 功率曲线如图 9 中红线所示。而采用文中策略后功率曲线如图 9 中蓝线所示,运营场景标注在图 9 顶部色带。

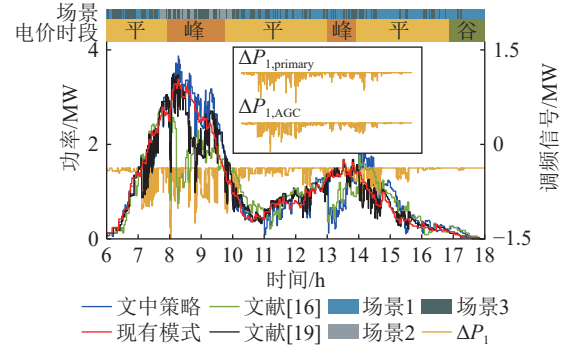


图 9 日负荷曲线及场景切换

Fig.9 Daily load curves and scene switching

在 06:00—07:40: (1) 充电桩数量充足, FCS₁ 基础运行于场景 1, 各 EV 功率基准值由分时功率分配模型计算; (2) 受分时电价限制, 若 06:00—08:00 充电负荷移至度电服务费 c_2 更低的 08:00—10:00 峰时段会降低聚合商收益, 故分时功率分配模型仍按最大功率确定各 EV 功率基准值。故蓝线形状与红线相似。同时, 因 FCS₁ 参与调频辅助服务间断运行于场景 3, 故蓝线会在红线基础上跟随黄线所示功率调节值 ΔP_1 波动。其中, 构成 ΔP_1 的 $\Delta P_{1,primary}$ 与 $\Delta P_{1,AGC}$ 如图 9 中方框内两曲线所示。由于一次调频投入条件为测量频率超出动作死区早期, 并在接到二次调频信号后退出, 故 $\Delta P_{1,primary}$ 脉冲较 $\Delta P_{1,AGC}$ 更为稀疏。

随着前来充电的 EV 陆续驶入, FCS₁ 在 07:40—10:02 空闲充电桩数量低于 10 个时进入运营场景 2, 为满足更多 EV 的充电需求采用提前离开模型。因刚并网 EV 充电功率一般高于接近满充的 EV, 故此时蓝线略高于红线; 同时, FCS₁ 参与调频运行于场景 3, 蓝线还会跟随 ΔP_1 波动。

在 10:02—13:00, FCS₁ 运行于场景 1、场景 3, 情况与 06:00—07:40 相似。

在 13:00—18:00, FCS₁ 运行于场景 1、场景 3。该时段内分时电价呈“峰-平-谷”的变化趋势, 即度电服务费 c_2 有所提高。分时功率分配模型依据价格变化及车主选择将部分 EV 充电电量向后推移, 以获得更高的 $F_{1,1}$, 故此时蓝线相比红线延迟。

FEVA 聚合商收益及其分项列于表 3, 其中聚合商净收益 F 为 66 267 元。收取费用包括充电服务费 $\sum F_{h,1}$ 及调频收益 $\sum F_{h,3} + \sum F_{h,4} + F_5$ 共计 75 029

元。一次调频收益 $\sum F_{h,3}$ 接近 $\sum F_{h,1}$ ，且为二次调频收益 $\sum F_{h,4}+F_5$ 的 15 倍。而支出补偿费用 $\sum F_{h,2}+\sum F_{h,6}$ 共计 8 762 元，即聚合商需支出 11.7%，以鼓励车主参与调频、提前离开。较现有运营模式：(1) 文中策略因参与调频而获取额外的调频收益，使总收益提升 127.9%；(2) 因采用提前离开模型，使日服务 EV 数提升 3%，在不增加 FCS 内充电桩数量的条件下为更多 EV 车主提供充电服务。当前单台边缘终端售价为 5 万元，FEVA 聚合商约 1 个月可收回改建投资成本。

表 3 聚合商收益分项
Table 3 Aggregator revenue sub item

策略	收益/元							日服务 EV 数
	F	$\sum F_{h,1}$	$\sum F_{h,2}$	$\sum F_{h,3}$	$\sum F_{h,4}$	F_5	$\sum F_{h,6}$	
文中策略	66 267	29 386	106	26 403	936	781	8 656	137
现有模式	29 071	29 071	0	0	0	0	0	133
文献[16]	28 086	28 086	0	0	0	0	0	122
文献[19]	65 383	28 331	0	26 747	957	833	8 514	130

6.3.3 与现有文献对比

文献[16]中策略为全天响应分时电价，其日负荷曲线如图 9 中绿线所示。可见，日内 06:00—08:00 及 11:00—18:00 内绿线与蓝线整体相当；但在 08:00—10:00 显著小于蓝线：(1) 对分时电价的响应会平移部分充电负荷到 10:00—11:00，相应地 10:00—11:00 内绿线略高于蓝线；(2) 在快充站 EV 数量高峰时段不尽快结束充电反而延长 EV 充电时间，会阻塞 EV 进入，降低日服务 EV 数，导致 FCS 的负荷曲线进一步下降。日负荷曲线的下降使文献[16]中策略的 $\sum F_{h,1}$ 小于文中策略。同时，因文献[16]中策略不参与调频仅含 $\sum F_{h,1}$ 一项收益，故 FEVA 总收益仅为文中策略的 42%。

文献[19]参与调频辅助服务，其日负荷曲线如图 9 中黑线所示。对 ΔP_1 的响应与文中策略一致，由于未采用提前离开模型，其充电功率曲线略低。在 13:00—16:00 未响应分时电价，与现有模式充电功率曲线相似。因此，文献[19]中策略调频收益 $\sum F_{h,3}+\sum F_{h,4}+F_5$ 与文中策略相当，但 $\sum F_{h,1}$ 少 1 055 元，导致其 FEVA 总收益为文中策略的 98.7%。

6.4 EV 充电状况分析

从车主视角评估 EV 充电状况及充电体验，以 FCS₁ 为例，日内共 143 辆 EV 到达 FCS₁，其中 6 辆 EV 因充电桩不足而离开，137 辆 EV 接受充电服务。

6.4.1 备选充电方案生成

以 01:20 驶入，电池容量 120 kW·h，初始 SOC

0.1，调频可延长时间上限 7 min，目标 SOC 0.85 的电动卡车车主甲为例，边缘终端为其生成备选方案集合 M 的过程如图 10 所示。

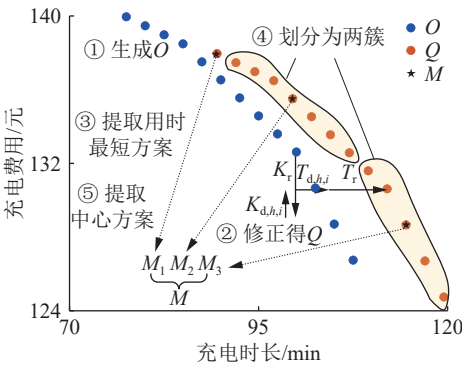


图 10 M 生成过程
Fig.10 M generation process

边缘终端求解单体 EV 充电方案模型，得到含 13 个充电方案的集合 O，对分时电价的响应使 O 中各方案充电服务费随充电时长增加而下降。基于 $T_{d,h,i}$ 、 $K_{d,h,i}$ 、 T_r 及 K_r 修正得到集合 Q，提取 Q 中用时最短方案作为方案 M₁；使用 K-means 聚类将 Q 中剩余的 12 个方案划分为 2 簇，并基于欧式距离分别提取各簇的中心方案 M₂及 M₃。合并构成 $M=\{M_1, M_2, M_3\}$ 供车主选择，其中方案 M₁ 充电时长为 90 min，充电费用为 138 元；方案 M₂ 充电时长为 100 min，充电费用为 135 元；方案 M₃ 充电时长为 115 min，充电费用为 128 元。若甲不参与调频，即设置 $T_{d,h,i}=0$ ，不再赘述。

6.4.2 多元化充电服务

部分车主选择充电方案后还会响应提前驶离，因此可将 137 位车主的充电行为分为 5 类：参与调频并提前离开的 A 类，参与调频不提前离开的 B 类，提前离开不参与调频的 C 类，仅响应分时电价的 D 类，均不响应的 E 类，各类 EV 充电性能如表 4 所示。为进一步衡量 EV 车主充电需求满足情况，定义 SOC 达成率指标 λ ， $\lambda=S_{1,h,i}/S_{e,h,i}$ 。

表 4 充电性能
Table 4 Charging performance

类别	数量	度电费用/ [元·(kW·h) ⁻¹]	平均充电 功率/kW	参与调频 时长/min	提前离开 时长/min	λ
A	35	1.121	82	7.3	19.11	99.3
B	81	1.062	62	6.9	0	100
C	4	1.163	91	0	18.75	98.9
D	10	1.042	58	0	0	100
E	7	1.223	68	0	0	100

相较于 E 类行为，采用 B 类行为的 EV 参与调频后，参与调频时长平均为 6.9 min，相应地获取调

频补偿后平均度电费用下降 13.2%; 采用 C 类行为的 EV 响应提前离开后避开 SOC 高时的低充电功率, 故其平均充电功率提升 33.8%; 采用 D 类行为的 EV 响应分时电价, 度电费用下降 14.8%, 平均充电功率下降 14.7%; 采用 A 类行为的 EV 参与调频并响应提前离开, 其平均度电费用下降的同时平均充电功率上升。

车主可依据自身需求选择不同的充电方案, 享受充电支付费用、充电持续时间及 EV 充电 SOC 目标值各异的充电服务。比如: 需要快速补电的私家车主可采用平均充电功率最高的 C 类行为; 倾向较低费用的电动巴士运营人员可采用度电费用最低的 D 类行为; 综合考虑充电费用与时间的电动卡车车主可采用 A 类行为或 B 类行为。可见, 文中策略能满足不同车主多元化充电需求, 提供更好的充电服务体验。

6.5 计算性能分析

优化模型求解及调频功率分配共同支撑 FEVA 日常运营服务。深入分析云边协同架构下二者计算性能, 并将其与现有集中接入架构^[28-29]下的计算性能进行对比分析, 结果如图 11 所示。

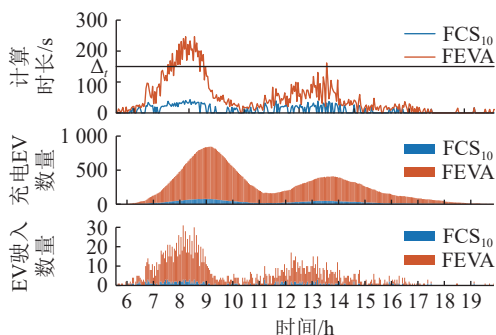


图 11 计算性能分析

Fig.11 Computational performance analysis

云边协同架构下, 边缘终端仅需为单个 FCS 求解单体 EV 充电方案模型、分时功率分配模型以及提前离开模型。以 FCS₁₀ 的边缘终端为代表, 分析云边协同架构计算性能, 如图 11 中蓝线所示, 其计算耗时介于 0.1~43.2 s 之间, 远小于 $\Delta t=150$ s。而现有集中接入架构下, 云平台为包含多个 FCS 的 FEVA 统一求解上述 3 个优化模型。如图 11 中橙线所示, 在 07:00—09:00 及 12:00—14:00 这 2 个 EV 进站高峰时段, FEVA 内较高的充电 EV 数量及进站 EV 数量将导致云平台求解时长超过 Δt 。计算超时将阻塞下一时段的 FCS 功率分配及通信、计费、支付功能, 逐步累计后会导致云平台崩溃。云边协同架构可以有效缓解由优化模型求解带来

的云平台资源压力。

云边协同架构下二次调频流程如图 12 所示, 含 8 个步骤: ① 云平台分解调度下发 P_{AGC} 为各 FCS 的 $\Delta P_{h,AGC}$, 耗时 0.1 ms; ② 下发 $\Delta P_{h,AGC}$ 至边缘终端, 耗时 31ms; ③ 边缘终端计算站内各 EV 功率, 耗时 0.1 ms; ④ 边缘终端上报 EV 功率至云平台, 耗时 31 ms; ⑤ 云平台计费; ⑥ 云平台返回指令至边缘终端, 共耗时 32 ms; ⑦ 边缘终端下发指令至充电桩, 耗时 55 ms; ⑧ 充电桩调整输出功率至指令值, 耗时 2.37 s。上述步骤共计耗时约 2.52 s, 小于文献 [33] 规定的二次调频响应时长 20 s。

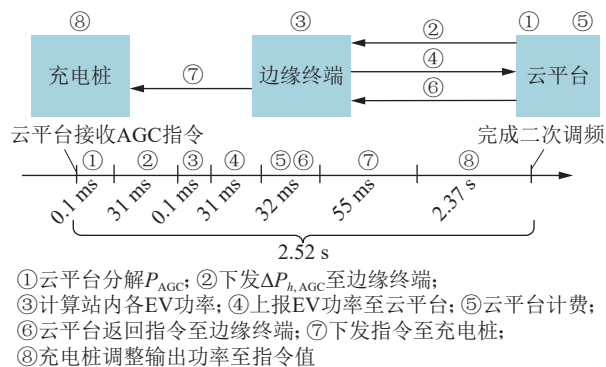


图 12 二次调频流程及耗时

Fig.12 Secondary frequency regulation process and time

一次调频流程与二次调频相似, 但无须经云平台接收由调度下发的指令, 而是直接依据就地测量的系统频率计算 $\Delta P_{h,i}$, 故无需步骤①、②, 共计耗时 2.49 s, 小于文献 [33] 规定的一次调频响应时长 15 s。因此, 云边协同架构能够胜任调频辅助服务功率分配。

7 结论

为引导车主积极参与调频辅助服务拓宽快充站聚合商收益渠道, 文中提出 FEVA 柔性运营策略。

(1) 构建基于云边协同的 FEVA 柔性运营策略, 通过云平台协同多个 FCS 参与调频辅助服务; 借助边缘终端就地管理 FCS, 为车主提供备选充电方案集合、实时分配 EV 充电功率、基于测量信号参与一次调频、引导车主提前驶离。相较于现有云平台集中接入的软件运营服务架构, 云边协同架构更加适用于调频辅助服务场景。

(2) 建立 FCS 场景状态机及其转移模型, 描述充电桩占用及功率需求、车主偏好、分时电价、并网点电气量变化, 实现 FCS 充电桩功率分配。

(3) 文中策略能为车主提供充电支付费用、充电持续时间及 EV 充电 SOC 目标值各异的充电服务, 满足车主多样化的充电需求。

采用文中所提策略的聚合商收益较现有运营模式能大幅增加,边缘终端频率就地测量能为一次调频有效开展提供支持,以获得更高的商业收益。

参考文献:

- [1] ATTAIANESE C, DI PASQUALE A, FRANZESE P, et al. A model-based EVs charging scheduling for a multi-slot ultra-fast charging station[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 216: 109009.
- [2] 张倩, 陈熙, 王立永, 等. V2G 直流充电桩检测方案与检测系统设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(13): 161-170.
ZHANG Qian, CHEN Xi, WANG Liyong, et al. Design of detection scheme and system for a V2G DC charging pile[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(13): 161-170.
- [3] 吴豫, 董智, 赵阳, 等. 基于 LSTM 算法的配电网分布式电源和电动汽车充电站联合优化规划[J]. *供用电*, 2023, 40(6): 64-74.
WU Yu, DONG Zhi, ZHAO Yang, et al. Joint optimization planning of distribution network DG and EV charging station based on LSTM algorithm[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(6): 64-74.
- [4] 华为技术有限公司、南方电网电动汽车服务有限公司. 智慧充电桩物联网技术白皮书[R]. 2020.
Huawei Technology Co., Ltd. and Southern Power Grid Electric Vehicle Service Co., Ltd. Smart charging station IoT technology white paper [R]. 2020.
- [5] MARIAN C, CHRISTIAN D, MARKUS H. P3 charging index report 07/22[R/OL]. [2025-04-10]. <https://www.p3-group.com/en/p3-updates/p3-charging-index-07-22-comparison-of-the-fast-charging-capabilities/>.
- [6] LYMPEROPOULOS I, QURESHI F A, BITLISLIOGLU A, et al. Ancillary services provision utilizing a network of fast-charging stations for electrical buses[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 665-672.
- [7] SANER C B, SAHA J, SRINIVASAN D. A charge curve and battery management system aware optimal charging scheduling framework for electric vehicle fast charging stations with heterogeneous customer mix[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(12): 14890-14902.
- [8] 刘洪, 张旭, 刘畅, 等. 考虑充电设施充裕性的电动私家车出行与充电需求时序交互分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(18): 5469-5478.
LIU Hong, ZHANG Xu, LIU Chang, et al. Timing interactive analysis of electric private vehicle traveling and charging demand considering the sufficiency of charging facilities[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(18): 5469-5478.
- [9] 深圳市永联科技股份有限公司. 20 kW 双向 DC-DC 充放电模块 UXC95050B[EB/OL]. [2025-04-10]. <https://www.szwinline.com/product/78.html>.
Shenzhen WineLine Technology Co., Ltd. 20 kW bidirectional DC-DC charging and discharging module UXC95050B [EB/OL]. [2025-04-10]. <https://www.szwinline.com/product/78.html>.
- [10] TU H, FENG H, SRDIC S, et al. Extreme fast charging of electric vehicles: a technology overview[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(4): 861-878.
- [11] 张亚朋, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 电动汽车虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12): 94-103.
ZHANG Yapeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capability evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual power plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 94-103.
- [12] 杨晓辉, 王晓鹏, 邓叶恒. 含电动汽车的主动配电网多目标分层优化调度[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 156-165.
YANG Xiaohui, WANG Xiaopeng, DENG Yeheng. Multi-objective hierarchical optimization dispatch of active distribution network with electric vehicles[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 156-165.
- [13] 冯野牧, 吕干云, 史明明, 等. 考虑 EV 充放电意愿的园区综合能源系统双层优化调度[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 142-153.
FENG Yemu, LYU Ganyun, SHI Mingming, et al. Two-layer optimal scheduling of park integrated energy system considering the charging and discharging willingness of electric vehicles[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 142-153.
- [14] 房超运, 杨昆, 柴瑞环. 分时电价下含电动汽车的微电网群多层多目标优化调度[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(1): 124-133.
FANG Chaoyun, YANG Kun, CHAI Ruihuan. Two-layer multi-objective optimal dispatching of microgrid group with electric vehicles under time-of-use electricity prices[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(1): 124-133.
- [15] 陈腾生, 杨汝泉, 隋坤明, 等. 考虑用户决策不确定性的电动汽车充电站用户参与度优化方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(4): 128-137.
CHEN Tengsheng, YANG Ruquan, SUI Kunming, et al. Optimization of user participation in electric vehicle charging stations considering uncertainty of user decision[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(4): 128-137.
- [16] LIU J Y, LIN G, HUANG S H, et al. Optimal EV charging scheduling by considering the limited number of chargers[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1112-1122.
- [17] 侯慧, 何梓姻, 侯婷婷, 等. 大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(14): 177-187.
HOU Hui, HE Ziyin, HOU Tingting, et al. A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2024,

- 52(14): 177-187.
- [18] 骆钊, 聂灵峰, 田肖, 等. 结合车主期望的充换电站辅助调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 90-101.
LUO Zhao, NIE Lingfeng, TIAN Xiao, et al. Auxiliary frequency regulation strategy for charging and swapping stations combined with the expectations of vehicle owners[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 90-101.
- [19] KIANI S, SHESHYKANI K, DAGDOUGUI H. An extended state space model for aggregation of large-scale EVs considering fast charging[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(1): 1238-1251.
- [20] 程杉, 李泮洋, 刘炜炜, 等. 电动汽车协助火电机组参与调频辅助服务优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 142-151.
CHENG Shan, LI Fengyang, LIU Weiwei, et al. Optimal control strategy of thermal power units with electric vehicles participating in frequency regulation auxiliary services[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 142-151.
- [21] 李咸善, 周晓岚, 姚俊伟, 等. 考虑车主多模式需求响应模糊意愿的优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 89-101.
LI Xianshan, ZHOU Xiaolan, YAO Junwei, et al. Optimal dispatch strategy considering fuzzy intention of multi-mode demand response of vehicle owners[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 89-101.
- [22] 黄元清, 刘迪迪, 覃光锋, 等. 计及车主需求的电动汽车聚合商能量调度策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 161-170.
HUANG Yuanqing, LIU Didi, QIN Guangfeng, et al. Energy scheduling strategy for electric vehicle aggregators considering vehicle owners demands[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 161-170.
- [23] 李珂, 王华昕, 倪静, 等. 基于双层规划的电动公交快充站经济性充电策略研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 128-135.
LI Ke, WANG Huaxin, NI Jing, et al. Research on economical charging strategy of electric bus fast charging station based on bi-level programming[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 128-135.
- [24] 罗毅初, 胡壮丽, 刘斌. 基于车-储联调的电动公交能源综合系统控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(3): 143-149.
LUO Yichu, HU Zhuangli, LIU Bin. Control strategy of electric bus energy integrated system based on vehicle-storage joint commissioning[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(3): 143-149.
- [25] 程平, 李晓光, 顾清华, 等. 露天矿新能源纯电动卡车的智能调度优化及应用[J]. 金属矿山, 2023(3): 193-198.
CHENG Ping, LI Xiaoguang, GU Qinghua, et al. Intelligent scheduling optimization and application of new energy electric truck in open-pit mine[J]. Metal Mine, 2023(3): 193-198.
- [26] 胡文东, 田志杰, 陈嘉瑞, 等. 考虑物流特性用于削峰填谷的纯电重卡双层协调优化调度方法[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(4): 421-430.
HU Wendong, TIAN Zhijie, CHEN Jiarui, et al. A two-layer coordinated optimization dispatch method of electric trucks for peak shaving and valley filling considering logistics characteristics[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(4): 421-430.
- [27] 李飞, 梁宝全, 张旭东, 等. 面向电动汽车快充站服务效率的自适应动态激励机制[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 48-55.
LI Fei, LIANG Baoquan, ZHANG Xudong, et al. Adaptive dynamic incentive mechanism for service efficiency of EV fast charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 48-55.
- [28] 刘丽娜, 周一飞, 王韬, 等. 基于云平台的用电计量采集信息流分析系统[J]. 电子器件, 2021, 44(4): 953-958.
LIU Lina, ZHOU Yifei, WANG Tao, et al. System for information flow of electricity usage acquisition based on clouding platform[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(4): 953-958.
- [29] 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.
- [30] YI L H, WEI E M. Optimal EV charging decisions considering charging rate characteristics and congestion effects[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2024, 11(5): 5045-5057.
- [31] IKOTUN A M, EZUGWU A E, ABUALIGAH L, et al. K-means clustering algorithms: a comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data[J]. *Information Sciences*, 2023, 622: 178-210.
- [32] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595—2021[S]. 2022. Grid Operation and Control. Guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource: GB/T 40595-2021[S]. 2022.
- [33] 国家能源局南方监管局. 关于印发《南方区域电力并网运行管理实施细则》《南方区域电力辅助服务管理实施细则》的通知[EB/OL]. [2025-04-10]. https://nfg.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/scjg/202402/t20240208_240258.html.
South China Energy Regulatory Office of National Energy Administration. Notice on the issuance of the "implementation rules for the management of grid-connected operation of electric power in the southern region" and the "implementation rules for the management of electric power auxiliary services in the southern region"[EB/OL]. [2025-04-10]. https://nfg.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgknr/scjg/202402/t20240208_240258.html.
- [34] NIE Yuqi, NAM H N, PHANWADEE S. A time series is worth 64 words: long-term forecasting with transformers

- [Z/OL]. [2025-04-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.14730>.
- [35] 南方电网电动汽车服务有限公司. 电动汽车充换电服务网络运营监控系统通信规约[S]. 2020.
China Southern Power Grid electric vehicle Service Co., Ltd. Electric vehicle charging and replacement service network operation monitoring system communication protocol[S]. 2020.
- [36] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [37] ASHISH V, NOAM S, NIKI P. Attention is all you need[Z/OL]. [2025-04-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.
- [38] ZENG A L, CHEN M X, ZHANG L, et al. Are transformers effective for time series forecasting?[Z/OL]. [2025-04-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.13504>.
- [39] 李翠萍, 司文博, 李军徽, 等. 基于集合经验模态分解和多目

标遗传算法的火-多储系统调频功率双层优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2017-2032.

LI Cuiping, SI Wenbo, LI Junhui, et al. Two-layer optimization of frequency modulated power of thermal generation and multi-storage system based on ensemble empirical mode decomposition and multi-objective genetic algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(7): 2017-2032.

作者简介:



胡卓毅

胡卓毅(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统需求侧管理(E-mail: 1073213101@qq.com);

王钢(1966), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统控制保护及自动化、高压直流输电技术;

汪隆君(1982), 男, 博士, 讲师, 通信作者, 研究方向为电力系统规划与可靠性。

Flexible operation strategy for fast charging station aggregators participating in frequency regulation auxiliary service based on cloud-edge collaboration

HU Zhuoyi¹, WANG Gang¹, WANG Longjun¹, ZENG Dehui², LIU Shenquan¹

(1. School of Electrical Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Jiayuan Electric Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510610, China)

Abstract: Aiming at the limited revenue sources of fast-charging electrical vehicle aggregation (FEVA), a flexible operation strategy, based on cloud-edge collaboration for fast charging stations (FCS), is proposed to participate in frequency regulation ancillary service. The proposed strategy, which takes the cloud platform and edge terminal as the core, guides the electric vehicle (EV) owners participating in frequency regulation and improves aggregator revenue while ensuring the charging experience for EV owners. Alternative charging schemes are solved for EV owners to choose from, which take the relationship between the maximum charging power of EV and the state of charge as the constraint. The cloud platform decomposes the frequency regulation signals to FCS and collaborates with them to participate in frequency regulation. The scene state machine is utilized to describe the FCS scenes and their transformation relationship. The refined mathematical models around each scene are established. While, edge terminal manages FCS locally by distributing EV power in the FCS and encouraging EV owners to end charging in advance. A deep learning model is employed to predict the next day's frequency regulation capacity for declaration. The numerical case verifies that the proposed strategy can accurately predict the frequency regulation capacity, satisfy the diversified charging demand of EV owners, and significantly improve aggregator revenue. Moreover, the cloud-edge collaborative architecture is more suitable for the frequency regulation auxiliary service.

Keywords: electric vehicle (EV); fast charging station (FCS); frequency regulation auxiliary service; owner's willingness; cloud-edge collaboration; state machine; flexible operation strategy

(编辑 方晶)