

电动汽车充电站参与辅助服务的无功功率支撑能力评估

朱晗¹, 汪隆君¹, 陈志峰², 王钢¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 广州城市理工学院电气工程学院, 广州 510800)

摘要: 电动汽车(electric vehicle, EV)充电站利用其剩余无功功率容量向电网提供辅助服务, 既能帮助电网实现自动电压控制(automatic voltage control, AVC), 也能为充电站带来额外的收益。因此, 提出了EV充电站调压辅助服务的市场机制, 建立了充电站内充电桩的电路拓扑结构, 并分析了充电桩进行无功功率支撑的基本原理。在此基础上, 利用概率统计学和蒙特卡洛法, 考虑电动私家车、电动出租车各自对应的充电需求, 分别模拟了其充电行为; 并结合充电桩的功率约束和变压器容量约束, 预测出了充电站日内负荷分布曲线; 进而评估出充电站日内无功功率支撑能力, 并计算出日内充电站参与调压辅助服务所取得的收益。对充电站内快充充电桩的相关参数进行灵敏度分析, 体现出不同参数对应的EV充电站无功功率支撑能力的差异, 为充电站申报参与调压服务容量并获取相关补偿收益提供技术分析手段。

关键词: 电动汽车; 充电站; 无功功率支撑; 辅助服务; 序贯仿真

Assessment of Reactive Power Support Capability for Electric Vehicle Charging Station Participating in Auxiliary Service

ZHU Han¹, WANG Longjun¹, CHEN Zhifeng², WANG Gang¹

(1. School of Electrical Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. School of Electrical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

Abstract: Electric vehicle (EV) charging stations utilize their remaining reactive power capacity to provide auxiliary services to the power grid, assisting in achieving automatic voltage control (AVC) and generating additional revenue for the charging stations. In this paper a market mechanism for the voltage regulation auxiliary services of EV charging stations is proposed, the circuit topology of charging piles within the charging station is established, and the basic principles of reactive power support by charging piles are analyzed. Based on this, using probability statistics and the Monte Carlo method, considering the charging demands of electric private cars and electric taxis, the charging behaviors of each are simulated. Combined with power constraints of the charging piles and transformer capacity constraints, the daily load distribution curve of the charging station is predicted. Furthermore, the reactive power support capability of the charging station within a day is evaluated and the revenue obtained from the participation of the charging station in voltage regulation auxiliary services within a day is calculated. Sensitivity analysis of relevant parameters of fast-charging piles within the charging station is conducted, highlighting the differences in reactive power support capabilities corresponding to different parameters of EV charging stations. This provides technical analysis tools for charging stations to declare their participation capacities in voltage regulation services and obtain relevant compensation benefits.

Key words: electric vehicle; charging station; reactive power support; auxiliary service; sequential simulation

0 引言

随着新能源汽车销量的提高,充电需求也随之增加,这进一步推进了充电桩等相关基础设施的建设。预计到2025年新能源汽车持有量将达到3 651万辆,全国充电桩缺口会达到1 398万台^[1]。充电桩分为交流慢充和直流快充,国内目前以交流桩为主,而未来直流桩规模增速更高^[2-6]。风电、光伏等间歇性新能源的并网,引发配电网有功潮流逆流,导致配电网的电压越限问题日益严重,这给电力系统的可靠稳定运行带来重大隐患。充电桩作为需求侧可控资源,若能通过相关的技术和手段可用于电网辅助服务^[7],平衡电网的无功功率,减小电网电压偏差。而充电站作为一种必要的服务性基础设施^[8-9],配备多台充电桩和相关的监控设备可为电动汽车(electric vehicle, EV)快速补给电能^[10-11],也能利用其剩余无功功率容量参与电网辅助服务。若能合理地对充电站建模^[12],进而评估出充电站日内不同时刻可调用的无功功率容量并申报给电网调度中心,就能辅助电网进行调压,这有利于维护电力系统的安全稳定运行,保障电能质量。

国内外现有关于EV充电站辅助电网进行无功功率调压的文献大多数是站在电网效益的角度,以电压偏差最小、网损最低、辅助服务费用最小为目标进行控制和优化^[13-15]。文献[16]以配电网运行成本最低为目标,建立充电站与配电网分层协调的EV有功和无功功率实时优化模型。文献[17]通过调节充电桩的功率因数改变EV充电的有功功率,同时对配电网的节点进行无功功率支撑。上述文献将EV充电站看作无功功率源,通过充电桩对配电网进行无功功率补偿,但都未对充电桩的无功功率支撑能力进行评估量化。

利用充电站剩余无功功率容量支撑电网电压,电池不需要进行额外的充放电活动,因此不影响电池寿命和充电效率。但是,无功功率调压过程需要充电桩参与,对充电桩的电力电子器件寿命有一定影响^[18]。在此期间,充电站更多是充当无功功率电源的角色,对电力系统稳定性提供支撑^[19]。

在当今充电桩行业爆发式增长的背景下,为充分激发充电站参与辅助服务的积极性,电网在利用充电站参与调压辅助服务时需兼顾充电站的利益,从充电站调用的功率不应超过其剩余无功功率

容量。

为解决以上问题,本文综合考虑电网与充电站的利益,提出了一种评估EV充电站无功功率支撑能力的方法。首先,提出充电站参与电网辅助服务的市场机制;然后建立充电桩的拓扑结构,在此基础上建立EV充电行为的概率模型,并利用蒙特卡洛法模拟日内EV充电功率的分布情况,进而评估出充电站的无功功率支撑能力和参与调压辅助服务的收益;最后,通过灵敏度分析验证本模型和方法的有效性。

1 充电站调压辅助服务的市场机制

充电站参与电网调压辅助服务的系统框架如图1所示。本文的辅助服务可分为3部分:无功功率支撑能力评估模型、无功功率调度优化模型和辅助服务补偿结算。其中,无功功率支撑能力评估模型是调压辅助服务机制的基础,也是约束调压效果的依据;无功功率调度优化模型体现了电网与EV充电站的协作,目的是使电网自身调压费用与充电站补偿费用最小化;辅助服务补偿结算秉承“谁受益谁承担”的原则^[20],依据成本制定补偿费用标准,由受益方对非受益方进行合理地补偿,有利于双方实现互利共赢。

EV充电站参与辅助服务需以自愿为首要原则,与电网签订辅助服务合同后,即需要向聚合商上报充电状态和功率信息,接受电网调度中心的调节指令。

当配电网电压发生越限情况时,调度中心首先采用调整自有变电站的有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)的分接头、投切补偿电容器组(capacitor bank, CB)等调压措施,当这些措施仍不能解决问题,调用EV充电站充电桩参与调压辅助服务。

EV充电站的补偿费用由电网承担,所以调度中心在接收到聚合商申报的无功功率容量后,需考虑传统的无功功率调节设备成本和EV充电站参与辅助服务的补偿费用,从而确定调压辅助服务的具体调用优先级。

调度中心完成无功功率调度优化模型的求解后可获取EV充电站需要调度的无功功率大小并向聚合商下发调节指令,聚合商收到指令后分配充电站的功率控制信号,最终实现充电站本地调压;同

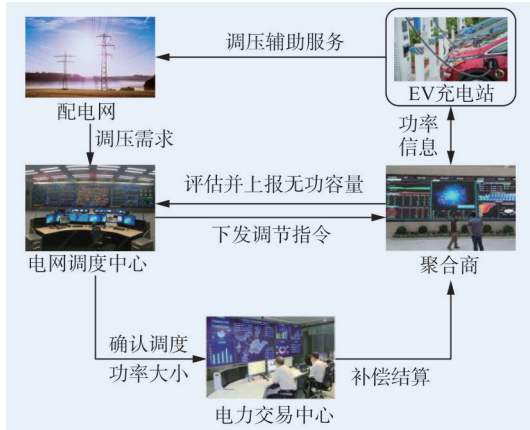


图1 充电站调压辅助服务系统框架

Fig. 1 System framework of charging station in voltage regulation ancillary service

时,电力交易中心依据调度中心上报的功率计算补偿费用并交给聚合商。

2 四象限充电桩拓扑结构及无功功率支撑原理

2.1 四象限充电桩拓扑结构

工程应用的四象限充电桩拓扑结构由有源钳位三电平逆变器(active neutral-point clamped, ANPC)和双有源桥变换器(dual active bridge, DAB)两部分组成,如图2所示。其中,ANPC可以进行0~60 kW功率双向传输,支持三相交流380 V供电和1 000 V直流系统应用。DAB作为双向DC/DC变换器可以实现0~15 kW双向功率传输,4个DAB分成两组,两两并联,输入端接在ANPC输出上,为将其整合起来,通过一个双刀双掷开关将其连接,开关掷于左边,上下两组DAB就串联起来,可达到1 000 V的直流电压输出;开关掷于右边,4个DAB一起并联,可输出低至200 V的直流电压,总体1个ANPC带4个DAB的结构可以实现200 V~1 000 V的直流电压输出。

ANPC逆变器是在中点钳位逆变器(neutral-point clamped, NPC)拓扑的基础上针对功率开关管损耗不均衡问题而提出的改进拓扑,具有分散内管损耗、效率高、自由度高等优点^[21]。ANPC逆变器的电路拓扑结构如图3所示,其中 e_a 、 e_b 、 e_c 为电网侧的三相交流电压; L_s 为滤波电感; R_s 为功率开关管的损耗; i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器三相输出电流;Q1—Q18为18个功率开关管, C_1 和 C_2 为直流母线电

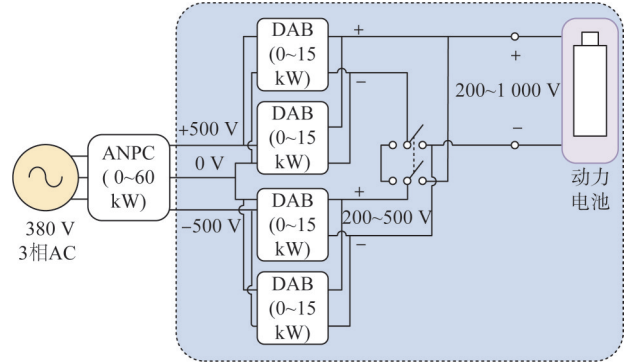


图2 充电桩电路拓扑结构

Fig. 2 Circuit topology structure of charging piles

容, V_{dc} 为直流母线电压。

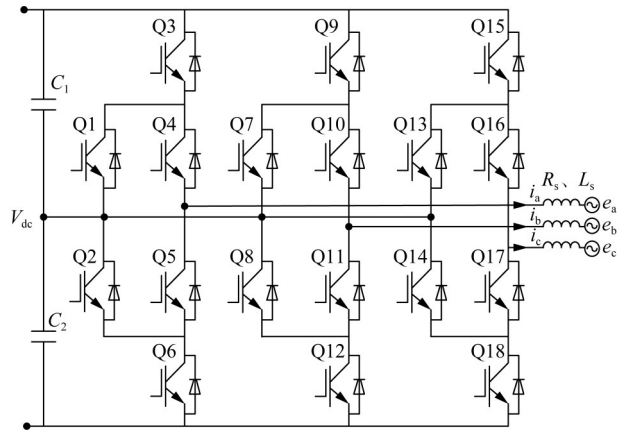


图3 ANPC逆变器电路拓扑结构

Fig. 3 Circuit topology structure of the ANPC inverter

双有源桥DC-DC变换器具有结构对称、能量双向流动、电气隔离、功率密度高以及易于实现软开关等优点^[22]。DAB变换器的电路拓扑结构如图4所示,其中 U_1 和 U_2 分别为变换器输入电压与输出电压,Q1—Q8即两侧全桥的功率开关管, L 为漏感和一次侧串联电感之和, $n:1$ 为高频变压器变比, C_1 和 C_2 分别为变换器两侧稳压电容。

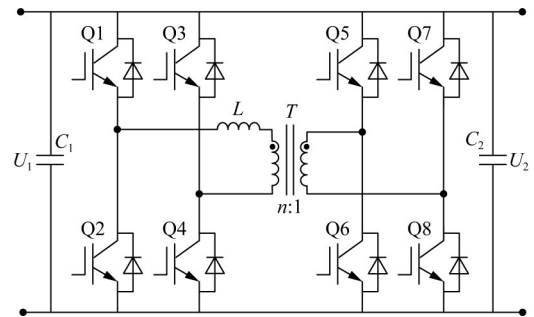


图4 DAB变换器电路拓扑结构

Fig. 4 Circuit topology structure of DAB converter

为满足规模化推广充电桩参与调压辅助服务,需要电力调度部门公布聚合商参与调压辅助服务的通信接口,聚合商内部调试北向调度接口和南向充电桩通信接口,以确保充电桩参与调压辅助服务通信接口的适用性。

2.2 充电桩无功功率支撑原理

若忽略功率开关管的损耗,充电桩并网点有功功率 P 和无功功率 Q ^[23] 分别为:

$$P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \quad (1)$$

$$Q = \frac{3}{2}(e_q i_d - e_d i_q) \quad (2)$$

式中: e_d 、 e_q 分别为 e_a 、 e_b 、 e_c 在 dq 坐标系中的分量; i_d 、 i_q 分别为 i_a 、 i_b 、 i_c 在 dq 坐标系中的分量。通过 PQ 控制^[24], 可以控制充电桩输出指定的功率, 进而实现 EV 充电站与电网之间的功率交换^[25-26]。

四象限充电桩工作区域如图 5 所示的 4 个象限, P 为充电桩向 EV 提供的充电功率, Q 为充电桩可利用的无功功率容量, 用于辅助服务申报。

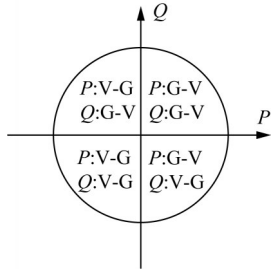


图 5 充电桩四象限运行区域

Fig. 5 Four quadrant operation areas of charging piles

由于充电桩容量是有限的, 充电桩在利用其无功功率参与调压辅助服务时, 无功功率输出增加会影响其输出有功功率, 因此必须同时考虑 EV 的充电需求。

3 充电站无功功率支撑能力评估

3.1 无功功率容量评估

考虑到充电桩与电网的互动, 以及 EV 充电时有功功率对无功功率的影响, 定义 EV 充电站的可申报无功容量^[27]为:

$$Q = \sum_{i=1}^{N_f + N_s} \sqrt{S_{i, \max}^2 - (P_{i, c} + P_{i, g})^2} \quad (3)$$

式中: $S_{i, \max}$ 为充电站内第 i 台充电桩的最大视在功率; N_f 和 N_s 分别为该充电站内所含快充和慢充充电

桩的数量; $P_{i, c}$ 为第 i 台充电桩提供给 EV 的充电功率; $P_{i, g}$ 为第 i 台充电桩向电网输送的有功功率。

3.2 EV 充电站的充电方式

充电桩提供给 EV 的充电方式分为: 直流快充与交流慢充 2 种形式, 不同的充电方式 EV 充电功率和充电时长都有区别。

图 6 给出 2 种充电方式功率随荷电状态 (state of charge, SOC) 的变化典型曲线, 可以看出慢充充电桩的功率几乎不变, 而快充充电桩的功率随 SOC 的变化而变化。

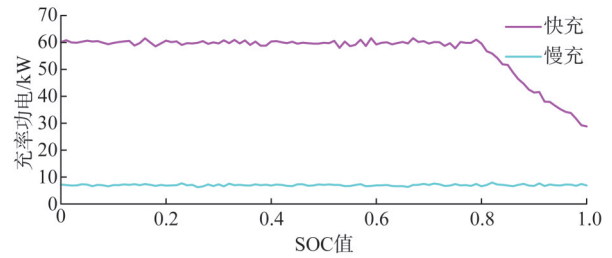


图 6 慢充和快充充电桩的充电功率

Fig. 6 Charging powers of slow and fast charging piles

慢充和快充充电桩的充电功率 P_{cs} 、 P_{cf} 随 SOC 变化的规律^[28-29]可以由式(4)—(5)来表示。

$$P_{cs} = P_{ns}, 0 \leq S_{soc} \leq 1 \quad (4)$$

$$P_{cf} = \begin{cases} P_{nf}, 0 \leq S_{soc} \leq S_{soc, c} \\ P_{nf} \exp(-\lambda_f (S_{soc} - S_{soc, c})), S_{soc, c} < S_{soc} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{ns} 为交流慢充充电桩的额定充电功率, 其最大视在功率设为 S_{cs} ; P_{nf} 为直流快充充电桩的额定充电功率, 其最大视在功率设为 S_{cf} ; $S_{soc, c}$ 为快充充电桩充电功率开始跌落时对应的 SOC 数值; λ_f 为快充充电功率跌落系数。

3.3 EV 充电行为

EV 充电行为包括日行驶里程数、起始充电时刻和充电时间等^[30], 具有很强的随机性, 能够影响充电站的日内充电功率分布, 进而影响到充电站的无功功率支撑能力评估。不同用途 EV 的充电行为差异显著, 本文选取的 EV 车辆包含私家车和出租车两种, 对两种车辆都作出如下假设。

1) 私家车和出租车每 100 km 耗电量均为 18 kWh。

2) EV 在最后 1 次结束行程后开始充电。

3) 每次充电的电量取决于当日的行驶里程。

4)私家车和出租车的电池容量均为90 kWh。

5)私家车和出租车的充电效率均为90%。

6)每次充电都充至满电量。

3.3.1 日行驶里程数

最大日行驶里程数是EV性能和使用体验的关键性指标之一,它直接量化了车辆在每日出行中能够覆盖的总路程。该数值取决于EV所搭载电池的容量和能源利用效率。一般而言,最大日行驶里程的规模与电池容量和能效成正相关。本文假设私家车和出租车的最大日行程里数分别为200 km和500 km。日平均里程数反映了EV一天的耗电量,决定了车辆的SOC状态,进而会影响充电时长。两种车辆的日平均里程数均满足如下分布。

$$f(L_x) = \frac{1}{L_x \sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln L_x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2} \right] \quad (6)$$

式中: L_x 为EV日行程里数; μ_x 与 σ_x 分别为日行程里数的数学期望与标准差。 μ_x 与 σ_x 随着不同车辆的出行特性而变化。对于私家车: $\mu_x = 3.5$, $\sigma_x = 0.75$; 对于出租车: $\mu_x = 5.5$, $\sigma_x = 0.25$ 。

3.3.2 起始充电时刻

起始充电时刻体现了EV充电具有很强的随机性,充电时刻越集中,充电站需要供给的充电功率越大。私家车和出租车的起始充电时刻概率密度函数分别为:

$$f_d(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right], & 0 < t \leq (\mu_s - 12) \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right], & (\mu_s - 12) < t \leq 24 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right], & 0 < t \leq (\mu_s + 5.5) \\ \frac{1}{2\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - \mu_s - 11)^2}{2\sigma_s^2} \right], & (\mu_s + 5.5) < t \leq 24 \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ_s 和 σ_s 分别为起始充电时刻的数学期望与标准差。 μ_s 和 σ_s 随着不同车辆的充电行为而变化。对于私家车: $\mu_s = 18.3$, $\sigma_s = 3.1$; 对于出租车:

$\mu_s = 4$, $\sigma_s = 1.5$ 。

3.3.3 充电时间

起始充电时刻和充电时间共同决定充电时间段,充电时间受多种因素的影响^[31-32],主要是由充电功率和日行驶里程来推导。考虑本文充电站内的两种充电桩以及车辆的充电行为,假设私家车在充电时刻较密集的时间段选择快充,其他时间段选择慢充;而出租车在整个时间段均选择快充。

慢充车辆充电时间 T_{cs} 为:

$$T_{cs} = \frac{L_{ev} w_{100}}{100 P_{ns} \eta_{ev}} \quad (9)$$

式中: L_{ev} 为车辆的日行驶里程; w_{100} 为车辆每100 km的耗电量; η_{ev} 为充电效率; P_{ns} 为慢充充电桩的额定充电功率。

快充车辆自身拥有供电功率-荷电状态特性曲线,其充电时间 T_{cf} 的时序计算包含在图7所示的充电站日运营仿真流程中。

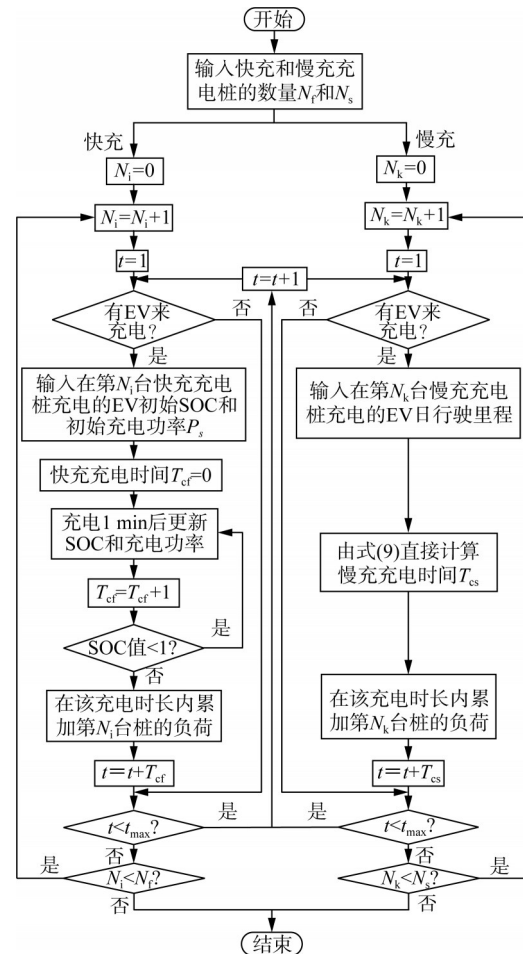


图7 充电站日运营仿真流程

Fig. 7 Daily operational simulation process of charging station

3.4 EV充电站约束

1) 充电桩参与调压辅助服务的约束主要为功率约束, EV充电过程中, 充电桩均具备无功功率支撑能力。在无功功率支撑的过程中, EV的充电活动也能正常进行。

$$0 \leq P_{cf} \leq P_{nf} \quad (10)$$

$$P_{cs} = P_{ns} \quad (11)$$

$$(P_{cs} + P_{csg})^2 + Q_{cs}^2 \leq S_{cs}^2 \quad (12)$$

$$(P_{cf} + P_{cfg})^2 + Q_{cf}^2 \leq S_{cf}^2 \quad (13)$$

式中: P_{cs} 和 P_{cf} 分别为慢充和快充充电桩提供给EV的充电功率; P_{csg} 和 P_{cfg} 分别为慢充和快充充电桩输送给电网的有功功率; Q_{cs} 和 Q_{cf} 分别为慢充和快充充电桩可申报的无功容量。

2) 充电站的变压器容量约束。EV充电站采用第 i 台慢充充电桩的额定充电功率; $P_{j,nf}$ 为第 j 台快充充电桩的额定充电功率; P_T 为单台变压器容量。

4 辅助服务补偿结算

n 台变压器进行供电, 保证所有的慢充和快充充电桩都能正常投运。

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_s} P_{i,ns} + \sum_{j=1}^{N_f} P_{j,nf} \leq n \times P_T \quad (14)$$

式中 $P_{i,ns}$ 为第 i 台慢充充电桩的额定充电功率。

聚合商的补偿费用为:

$$C_a = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_s} (c_p P_{i,t} + c_q Q_{i,t}) \Delta t \quad (15)$$

式中: c_p 和 c_q 分别为EV充电站有功功率调节和无功功率调节的补偿价格, 本文均设为250元/MWh; $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别为充电站 i 在时刻 t 接受调度中心指挥需要补偿的有功功率和无功功率; Δt 为充电站提供辅助服务的单位时长, 本文中设为1 min; N_c 为给配电网提供辅助服务的充电站数量; T 为调节时段数量。EV充电站补偿分配遵循“多劳多得”的原则, 参与调压辅助服务的充电站按照线性分配原则获得收益。

值得注意的是, 各地辅助服务市场规则建立和完善程度会影响到充电站的商业收益及参与积极性。

5 算例分析

5.1 充电桩功率分析

快充充电桩和慢充充电桩的参数如表1所示。

为验证本文所提充电桩拓扑结构的有效性, 选

表1 快充和慢充充电桩参数

Tab. 1 Parameters of fast charging piles and slow charging

piles				
参数	额定有功功率/kW	最大视在功率/kVA	$S_{SOC,c}$	λ_f
快充充电桩	60	61	0.8	3.56
慢充充电桩	7	8		

取快充充电桩分析其在输出额定充电功率时的功率情况, 其功率曲线如图8所示。充电桩在0.02 s时开始响应, 0.12 s后充电桩的充电功率在58.79~61.12 kW波动, 0.12~0.2 s期间充电功率的平均值为59.93 kW, 与设定额定充电功率60 kW仅相差0.12%; 而在0.14 s后, 充电桩可申报的无功功率在9.87~13.21 kvar波动, 0.14~0.2 s期间无功功率平均值为11.62 kvar, 与设定无功功率11 kvar相差5.64%。可以看出在本文模型下, 充电桩可满足EV的充电需求。

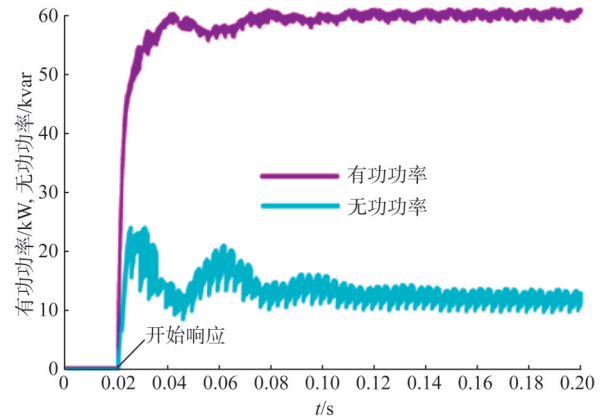


图8 快充充电桩功率

Fig. 8 Power of fast charging piles

5.2 无功功率支撑能力评估模型

5.2.1 EV充电站日运营仿真流程

为验证本文提出的无功评估方法的有效性, 本节假设EV充电站共30台慢充充电桩和30台快充充电桩, 一天内有300辆私家车和200辆出租车到充电站充电。利用蒙特卡洛法模拟一天内EV在充电站的充电情况, 将一天24 h划分为 $t_{max}=1440$ 个时段, 充电站日运营仿真流程如图7所示。

5.2.2 EV日平均里程数

私家车的日平均里程数分别服从对数正态分布 $N(3.5, 0.75^2)$ 和 $N(5.5, 0.25^2)$ 。

5.2.3 EV起始充电时刻

私家车的起始充电时刻服从正态分布 $N(18.3,$

3.1²), 其概率密度曲线如图 9(a)所示, 图中阴影部分表示起始充电时刻在该区域的车辆选择快充充电桩, 且该区域的概率为 0.5, 其余的区域则选择慢充充电桩; 出租车的起始充电时刻服从正态分布 $N(4, 1.5^2)$ 和 $N(15, 1.5^2)$, 其概率密度曲线如图 9(b)所示。

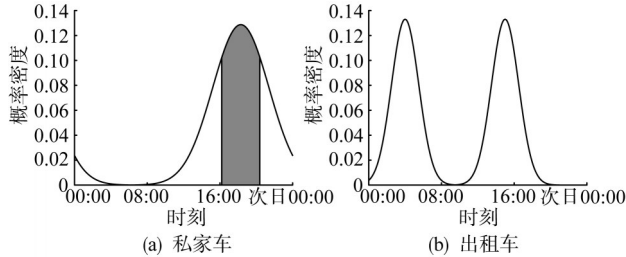


图 9 电动私家车和电动出租车起始充电时刻分布

Fig. 9 Distribution of starting charging times for electric private cars and electric taxi cars

5.2.4 EV 充电功率、无功功率容量评估和充电站收益

通过对上述 EV 充电负荷建模和蒙特卡洛法的使用, 可以预测出 EV 充电站日内负荷分布情况。假设充电站剩余容量均以无功功率的形式支撑电网, 根据式(3)可以评估出充电站一天内的无功功率支撑能力; 假设充电站被调用的无功功率占剩余无功容量的比例服从均匀分布 $U(0.7, 0.9)$, 调节时段数 T 设为 5, 根据式(15)可以计算出充电站一天的收益情况。EV 充电站日内负荷分布、可申报的无功功率容量及充电站收益分别如图 10 和图 11 所示。

电动私家车的负荷峰值时刻为 16:38; 电动出租车的负荷峰值时段为 04:22 和 15:33; EV 充电站的负荷峰值时段为 04:22 和 15:36, 这两个负荷峰值对应充电站无功功率支撑能力曲线的谷值。充电站一天内不同时刻的收益在 3.15~7.58 元波动, 00:00—23:59 期间每分钟平均收益为 5.794 元, 根据式(15)得充电站一天内参与调压辅助服务的收益为 8 343.66 元。

5.3 灵敏度分析

充电站日内可申报无功功率容量受多种因素影响, 本节选取快充充电桩充电功率开始跌落时对应的 SOC 数值 $S_{\text{SOC},c}$ 和快充充电桩的最大视在功率 S_{cf} 来分析。

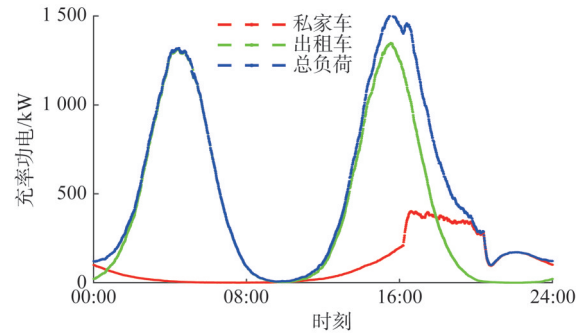


图 10 电动汽车充电站日内负荷预测曲线

Fig. 10 Daily load forecast curves of electric vehicle charging station

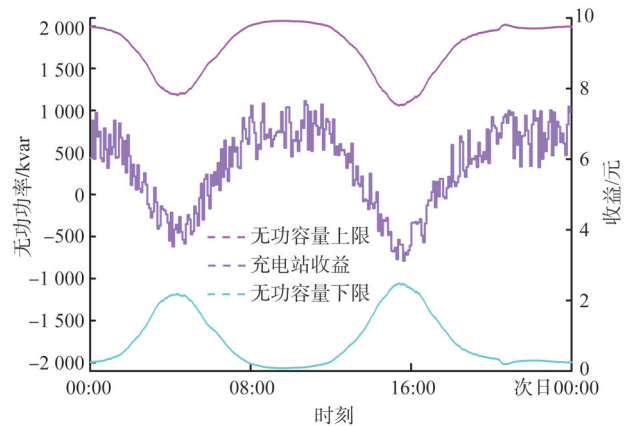


图 11 电动汽车充电站日内可申报无功功率容量及收益

Fig. 11 Daily declarable reactive power capacities and revenues of electric vehicle charging station

其中, $S_{\text{SOC},c}$ 取决于电动汽车电池管理系统 (battery management system, BMS) 特性, 不同型号 EV 配备 BMS 对应的 $S_{\text{SOC},c}$ 数值有差异, 表 2 给出了几种常见车型的 $S_{\text{SOC},c}$ 数值, 该参数来源于 EV 充电过程录波记录。当 EV 到达充电站开始充电, 智能充电桩能自动识别 EV 型号并从历史数据库获取相应的 $S_{\text{SOC},c}$ 数值并上报给聚合商; 参数 S_{cf} (充电桩的最大视在功率) 来源于充电桩的铭牌参数, 充电站参与辅助服务前需上报相关参数给聚合商用于无功功率支撑能力评估。

为验证 $S_{\text{SOC},c}$ 和 S_{cf} 对无功功率支撑能力的影响, 本文采用控制变量法, 讨论两种情况: 1) S_{cf} 取 61 kVA, $S_{\text{SOC},c}$ 分别取为 0.5、0.65、0.8、0.95 时充

表 2 快充充电桩不同 EV 对应的 $S_{\text{SOC},c}$

参数	特斯拉 Model 3	小鹏 P7	宝马 i3	比亚迪汉 EV
$S_{\text{SOC},c}$	0.65	0.55	0.70	0.8

电站的无功功率支撑能力；2) $S_{\text{SOC},c}$ 取 0.8, S_{cf} 分别取为 60.5、61、65、70 时充电站的无功功率支撑能力。 $S_{\text{SOC},c}$ 和 S_{cf} 对充电站无功功率支撑能力的影响分别如图 12 和图 13 所示。从图 12 中可知, 随着 $S_{\text{SOC},c}$ 的升高, EV 充电站可申报的无功功率会逐渐降低; 从图 13 中可知, 随着 S_{cf} 的升高, EV 充电站可申报的无功功率会逐渐升高; 从功率的上下限分析, 功率曲线的上下限相差越大, 越能体现出充电站日内不同时刻可申报的无功功率容量的差异。

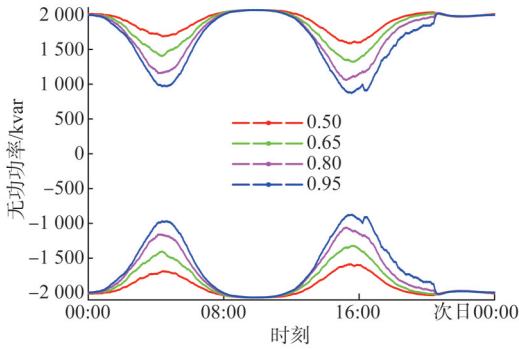


图 12 $S_{\text{SOC},c}$ 对电动汽车充电站无功功率支撑能力的影响
Fig. 12 Impacts of $S_{\text{SOC},c}$ on reactive power support capabilities of electric vehicle charging station

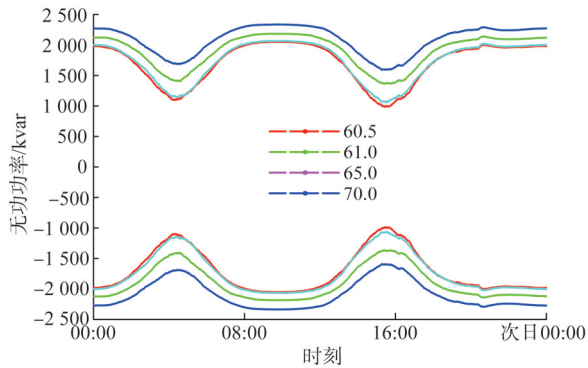


图 13 S_{cf} 对电动汽车充电站无功功率支撑能力的影响
Fig. 13 Impacts of S_{cf} on reactive power support capabilities of electric vehicle charging station

为进一步量化 $S_{\text{SOC},c}$ 和 S_{cf} 对充电站无功功率支撑能力评估的影响, 本文定义充电站日内可申报无功功率容量的差异率为:

$$D_Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\sum_{i=1}^{N_f + N_s} S_{i,\max}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ 分别为功率曲线的极大值和极小值; $S_{i,\max}$ 为第 i 台充电桩的最大视在功率; N_f 、 N_s 分别为充电站所含快充和慢充充电桩的数量。 D_Q

与 $S_{\text{SOC},c}$ 、 S_{cf} 的关系如表 3 所示。

表 3 不同参数下充电站可申报无功功率容量的差异率
Tab. 3 Difference rates of reactive power capacities to declare for charging stations in different parameters

参数 $S_{\text{SOC},c}$	S_{cf} 不同值对应的差异率/%			
	60.5 kVA	61.0 kVA	65.0 kVA	70.0 kVA
0.5	23.59	23.16	19.66	17.34
0.65	38.34	35.90	29.08	24.45
0.8	51.79	48.49	37.42	31.75
0.95	60.04	57.68	45.13	36.13

由表 3 可得出如下结论。

1) 在 S_{cf} 确定为 61 kVA, $S_{\text{SOC},c}$ 取 0.5 时, D_Q 为 23.16%; D_Q 随着 $S_{\text{SOC},c}$ 的增大而增大, 当 $S_{\text{SOC},c}$ 取 0.95 时, D_Q 高达 57.68%。

2) 在 $S_{\text{SOC},c}$ 确定为 0.8, S_{cf} 取 60.5 kVA 时, D_Q 为 51.79%; D_Q 随着 S_{cf} 的增大而减小, 当 S_{cf} 取 70 kVA 时, D_Q 低至 31.75%。

综上, D_Q 随着 $S_{\text{SOC},c}$ 的增大而增大, 随着 S_{cf} 的增大而减小; 在保证较高差异率的前提下, 为更充分利用充电站剩余的无功功率容量, 推荐 S_{cf} 取 61 kVA; 为保护电池在工作过程中安全充电, 推荐 $S_{\text{SOC},c}$ 取 0.8。

6 结论

本文提出了基于序贯仿真的电动汽车充电站无功功率支撑能力评估方法, 为充电站申报参与调压服务容量并获取相关补偿收益提供技术分析手段。算例分析可得到以下结论。

1) 充电站内快充充电桩的参数是影响无功功率支撑能力的主要因素, 无功功率支撑能力与充电桩充电功率开始跌落的数值 $S_{\text{SOC},c}$ 成负相关, 与充电桩的最大视在功率 S_{cf} 成正相关。

2) 所提模型适用于充电站的调压辅助服务, 后续研究将进一步拓展该模型的应用范围, 如计及充电站调压辅助服务的配电网无功优化模型。

本文的策略仍存在一些局限性, EV 充电行为未考虑电价因素的影响, 即电价政策可能导致充电站负荷曲线出现偏移, 进而影响无功功率支撑能力的评估, 这一点会在后续研究中改善。随着电动汽车技术的发展和新的充电标准出台, 技术指标和策略需要与时俱进, 将跟踪新技术进展并及时调整模

型参数。

参考文献

- [1] 李航,邱迪.充电桩行业深度报告[R].上海:国海证券研究所,2022.
- [2] 鲁莽,周小兵,张维.国内外电动汽车充电设施发展状况研究[J].华中电力,2010,23(5):16-20.
LU Mang, ZHOU Xiaobing, ZHANG Wei. Research on the development status of electric vehicle charging infrastructure at home and abroad [J]. Hua Zhong Electric Power, 2010, 23(5): 16-20.
- [3] 郑佳俊,段小宇,胡泽春,等.组件式移动充电设施布局优化方法与投放策略[J].中国电力,2025,58(4):107-118.
ZHENG Jiajun, DUAN Xiaoyu, HU Zechun, et al. Modular mobile charging facility layout optimization method and deployment strategy [J]. Electric Power, 2025, 58(4): 107-118.
- [4] 袁洪涛,徐潇源,严正,等.电动汽车集中充换电设施规划和优化运行研究综述[J].电力系统保护与控制,2024,52(19):157-174.
YUAN Hongtao, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Review of centralized EV charging and battery swapping facility planning and optimal scheduling [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 157-174.
- [5] 张勇,蒲勇健,史乐峰.电动汽车充电基础设施建设与政府策略分析[J].中国软科学,2014(6):167-181.
ZHANG Yong, PU Yongjian, SHI Lefeng. Analysis of electric vehicle charging infrastructure construction and government strategies [J]. China Soft Science, 2014(6): 167-181.
- [6] LOGGIA R, MOSCATIELLO C, KERMANI M, et al. Electric vehicles charging stations sharing model control [C]//2022 IEEE/IAS 58th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), December 23-25, 2022, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE, 2022: 1-6.
- [7] 裴振坤,王学梅,康龙云.电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J].电力系统自动化,2023,47(18):17-32.
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 17-32.
- [8] 高飞燕.牵引用蓄电池智能充电机的研究与开发[D].长沙:湖南大学,2007.
- [9] 王博.电动汽车充电监控管理系统的设计与实现[D].北京:北京交通大学,2021.
- [10] 徐海明.电动汽车充电站运行与维护技术[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [11] 顾越.电动汽车充电机及其电气性能测试研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [12] 田增垚,刘少午,张强,等.电动汽车充电站参与电网调压的建模与控制方法[J].南方电网技术,2022,16(10):113-119.
TIAN Zengyao, LIU Shaowu, ZHANG Qiang, et al. Modeling and control methods of charging stations of electric vehicles for voltage regulations [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 113-119.
- [13] MITSUKURI Y, HARA R, KITA H, et al. A study on compensating voltage drop in distribution systems due to night-time simultaneous charging of electric vehicles utilizing charging power adjustment and reactive power injection [J]. Electrical Engineering in Japan, 2014, 189(4): 9-21.
- [14] HU J D, YE C J, DING Y, et al. A distributed MPC to exploit reactive power V2G for real-time voltage regulation in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 576-588.
- [15] 蔡黎,商冰洁,高乐,等.电动汽车有序充电研究与应用综述[J].南方电网技术,2023,17(11):97-107,129.
CAI Li, SHANG Bingjie, GAO Le, et al. Review of research and application on orderly charging of electric vehicles [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 97-107, 129.
- [16] 王强钢,田雨禾,王健,等.计及充电站无功补偿的配电网日前-实时协调优化模型[J].电力系统自动化,2021,45(17):27-34.
WANG Qianggang, TIAN Yuhe, WANG Jian, et al. Coordinated day-ahead and real-time optimization model for distribution network considering reactive power compensation of charging station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 27-34.
- [17] 苏粟,胡勇,王玮,等.基于电动汽车无功补偿的配电网电压调控策略[J].电力系统自动化,2017,41(10):72-81.
SU Su, HU Yong, WANG Wei, et al. Voltage regulation strategy for distribution network based on reactive power compensation of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 72-81.
- [18] PEYGHAMI S, WANG Z, BLAABJERG F. A guideline for reliability prediction in power electronic converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, PP(99):1-11.
- [19] PEYGHAMI S, BLAABJERG F, PALENSKY P. Incorporating power electronic converters reliability into modern power system reliability analysis [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9(2): 1668-1681.
- [20] 项中明,石博隆,吴昌,等.考虑无功辅助服务分段报价的多目标无功优化方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):40-47.
XIANG Zhongming, SHI Bolong, WU Chang, et al. Research on AVC considering quotation rules of reactive power ancillary services in the electricity market [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 40-47.
- [21] 朱文学.三电平ANPC并网逆变器虚拟同步控制策略研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [22] 陈根.双有源桥式变换器的非对称式调制与控制技术研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [23] 张兴.PWM整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [24] 张中锋.微网逆变器的下垂控制策略研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
- [25] 曹琦琦.V2G建模及接入系统分析研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [26] 曹宇航.V2G模式下基于复杂网络的电动汽车有序充放电策略[D].南京:南京邮电大学,2023.
- [27] 刘浩文,刘东,陈张宇,等.多级协同虚拟电厂环境下的无功辅助服务优化出清[J].电网技术,2021,45(7):2533-2541.
LIU Haowen, LIU Dong, CHEN Zhangyu, et al. Optimal reactive power service clearing based on multilevel cooperative VPP [J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2533-2541.

(下转第30页 Continued on Page 30)