

电动汽车参与电网调峰辅助服务的潜力分析 ——以南京市为例

冯奕, 刘颖

(南京工程学院经济与管理学院, 江苏 南京, 211167)

摘要: 电动汽车产业正蓬勃发展, 市场保有量不断增加, 若不加以控制, 其充电行为的不确定性会给电力系统的运行和调度带来较大的影响。若能有序引导, 电动汽车的充放电行为可提供移动储能功能, 参与电力系统调峰等辅助服务。但电动汽车提供辅助服务的能力是待评估的。电动汽车参与电网辅助服务具有响应速度快、调度灵活性强等优势。用实例计算南京区域电动汽车集群的潜力容量发现, 电动汽车参与电网调频辅助的潜力很可观。

关键词: 电动汽车; 辅助服务; 潜力分析

中图分类号: F062.1

与传统燃油汽车相比, 电动汽车可显著减少传统资源的消耗和依赖, 减少对环境产生的危害。因此, 电动汽车成为汽车行业的主要发展方向。在多项政策激励下, 我国已处于电动汽车的黄金发展阶段。

由于电动汽车的充电行为通常是任意的、分散的、随机的, 大量电动汽车无序接入电网将对电网产生不利影响^[1]。若有序引导, 电动汽车可作为分散式储能来参与电网辅助服务。利用电动汽车—电网互动技术(Vehicle to grid, V2G), 可以使电网和电动汽车的能源流和信息流双向流通, 为电动汽车参与电网辅助服务提供技术支持。

一、研究现状

国家能源局2017年颁布了《完善电力辅助服务补偿(市场)机制工作方案》(国能发监管[2017]67号), 方案鼓励扩大电力辅助服务提供主体, 鼓励储能设备参与电网, 允许第三方提供电力辅助服务^[2]。目前已有大量学者对电动汽车参与电网辅助服务进行了研究。胡泽春等学者研究证明电动汽车接入电网会加重电力系统的负担, 影响其稳定运行^[3]。针对具体的调度策略, 葛少云等学者研究了电动汽车有序充电, 并为了使电网峰谷差最小化提出了峰谷电价时段的优化模型与方法^[4]。但以

上研究均未考虑用户响应度问题, 王博等学者分别对不考虑用户响应度和考虑用户响应度的有序充电策略进行了建模及仿真分析^[5]。Andersson S L等学者研究德国和瑞典电动汽车用户参与调频服务的经济性情况, 发现在德国电动汽车用户可以通过参与调频服务获得收入, 但在瑞典则没有这份额外收益^[6]。李琥等学者指出电动汽车充电对电网产生影响的主要因素是电动汽车的普及程度、类型、充电时间、充电方式、充电特性五个方面^[7]。Haibo H等学者根据地区划分电动汽车运营商, 并且将电动汽车聚集起来, 使电动汽车在电网需要调峰时刻快速实时调度^[8]。孙强等学者提出了一种基于电动汽车的分层控制结构来建立电动汽车有序充放电过程控制的数学模型, 利用Aggregator(聚合商)作为电动汽车与电网调度机构之间中间人的角色, 实现了电动汽车跟踪上层目标的需求响应控制^[9]。占恺峤等学者提出了一种通过合理调度配电网中分散的电动汽车有序充电, 从而实现配电网网损最小化的模型与计算方法^[10]。

本文在分析电动汽车参与辅助服务优势的基础上, 将电动汽车的调度状态进行分类, 对不同状态的可调节容量进行计算, 以此来估算其参与辅助服务的潜力; 以南京市为例, 对电动汽车参与辅助服务的潜力进行实例计算, 对电动汽车更好地参与辅助服务提出建议。

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-06-21

基金项目: 江苏省高校哲学社会科学研究基金项目(2021SJA0438); 南京工程学院创新基金面上项目 I (CKJB201908); 南京工程学院产业经济与创新管理研究院开放基金项目(JGKB202103)

作者简介: 冯奕, 博士, 副教授, 研究方向为能源技术经济及管理。

E-mail: fengyi@njit.edu.cn

引文格式: 冯奕, 刘颖. 电动汽车参与电网调峰辅助服务的潜力分析——以南京市为例[J]. 南京工程学院学报(社会科学版), 2022, 22(4): 48-52.

二、电动汽车参与辅助调峰优势

1. 响应速度快

电动汽车依靠 V2G 技术参与辅助服务。硬件主要为电力电子器件辅以智能控制设备,具有较快的反应速度。比起使用机械开关的传统调频机组 1 s ~ 10 s 的调节速度,电动汽车辅助调频响应速度可达 1 ms,具有明显的速度优势。

2. 调度灵活性强

电动汽车参与辅助服务的灵活性体现在两个方面:充放电状态的切换和参与体量的改变。与传统机组相比,使用电力电子器件可以使电动汽车在充放电状态之间灵活切换,实现双向调节。另外,电动汽车的个体功率较小,可实现充放电功率的无差调节。这两方面使得电动汽车可灵活响应电网的多种调频需求。

3. 调节成本小

电动汽车的充电站通常位于市中心,属于负荷密集地区,当电动汽车通过 V2G 技术接入电网进行电力传输时,与传统电厂输能相比产生的线损更小。除此之外,电动汽车参与电网调度不需要安装额外的设备,还可以减少一定的备用容量投资,节约了电网的建设运行成本。

三、电动汽车参与辅助服务的潜力计算方法

(一) 电动汽车调度状态分类

为了保证电动汽车满足用户本身出行需求,电动汽车在参与调度之前需要对电动汽车进行状态分类,并根据实况决定是否参与调度。根据电网要求,增加或减少的功率即为电动汽车可调节容量。当电动汽车电量未达最大值时,电动汽车可以增加或可接收电网输送的充电功率即可向下调度容量,称为可下调度容量;电动汽车可减少的充电功率或可向电网输送的放电功率,称为可上调容量^[11]。

为了描述电动汽车电池状态,定义荷电状态 SOC(State of charge)表示电池剩余可用容量,以其额定容量的百分比表示,其取值范围为 0 ~ 1。根据电动汽车初始 SOC 值的状态,可将其调度状态分为四类。各调度状态的取值边界定义如图 1 所示。

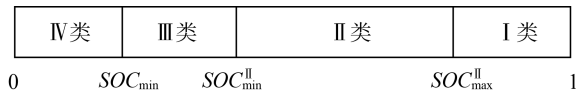


图 1 SOC 状态示意图

(I) 只可上调类型:车辆 i 处于快要满电状态,只允许放电调度的可调度类型。

(II) 既可上调又可下调类型:车辆 i 的剩余电量处于中间,既允许放电又允许充电调度的可调度类型。

(III) 只可下调类型:车辆 i 处于快要无电状态,只允许充电调度的可调度类型。

(IV) 不可调度类型:车辆 i 为不可调度类型。

2. 不同状态 SOC 值边界计算

根据上述 SOC 状态划分,下面将对其边界值进行界定。电动汽车不能参与调度的最小 SOC 值,即 SOC_{min} 计算公式为:

$$\begin{cases} SOC_i = \frac{xy}{C_i} \\ SOC_{min} = 1 - D_{max} + SOC_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: SOC_i 表示电动汽车每天正常行驶所需荷电状态; x 、 y 分别表示电动汽车每天行驶路程和每千米所耗费的电量; C_i 表示电动汽车电池额定存储电量; D_{max} 表示电动汽车最大放电深度(为保护电池,该值取 0.7)。

电动汽车既可充电又可放电调度(II类)的 SOC 值范围计算公式为:

$$\begin{cases} SOC_{min}^{\parallel} = \frac{\mu P_d^{\max} \Delta t}{C_i} + SOC_{min} \\ SOC_{max}^{\parallel} = SOC_{max} - \frac{\mu P_c^{\max} \Delta t}{C_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ 表示充放电效率; $P_d^{\max}$ 表示最大放电功率; Δt 表示调度时间(本文取 0.5 h); SOC_{max} 表示电池最大 SOC(本文取 1); $P_c^{\max}$ 表示最大充电功率。

(二) 电动汽车调度容量

1. 单辆电动汽车调度容量计算

(1) 向上调度容量

电动汽车参与电网调度的前提是满足自身的出行需求,即电动汽车在进行 Δt 时间段的电力调度之后,电动汽车的电量不能小于 SOC_{min} ,即 SOC 值不得少于 30%。

由可向上调度容量的定义可知,单辆电动汽车可向上调度容量公式为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,t}^{up} &= P_{i,max}^d - P_{i,t}, \\ P_{i,t} &\in [0, P_{i,max}^d] \end{aligned} \quad (3)$$

公式中: $\Delta P_{i,t}^{up}$ 表示第 i 辆电动汽车可上调容量; $P_{i,max}^d$ 表示第 i 辆电动汽车最大放电功率; $P_{i,t}$ 表示电动汽车充放电功率。

(2) 向下调度容量

单辆电动汽车可向下调度容量公式为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{i,t}^{down} &= P_{i,max}^c - P_{i,t}, \\ P_{i,t} &\in [0, P_{i,max}^c] \end{aligned} \quad (4)$$

公式中: $\Delta P_{i,t}^{down}$ 表示第 i 辆电动汽车可下调容量; $P_{i,max}^c$ 表示第 i 辆电动汽车最大充电功率。

2. 多辆电动汽车调度容量计算

(1) 多个电动汽车可向上调度容量公式

$$P_{total,t}^{up} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{i,t}^{up} \quad (5)$$

公式中: $P_{total,t}^{up}$ 表示向上调度总容量。

(2) 多个电动汽车可向下调度容量公式

$$P_{\text{total},t}^{\text{down}} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{i,t}^{\text{down}} \quad (6)$$

上述公式中, $P_{\text{total},t}^{\text{down}}$ 表示向下调度总容量。

为了求得最大调度容量, 本文设定处于可调度状态的电动汽车的充放电功率为 0 ($P_{i,t} = 0$, 即既没充电也没放电), 电动汽车调度时长 Δt 为 0.5 h。

四、实例分析

(一) 情景设置

1. 仿真参数

截至 2021 年底, 江苏省全省机动车保有量 2 365.92 万辆^[12], 其中, 南京保有量为 291.345 9

万辆, 约占比 13%。全省纯电动汽车保有量为 199 096 辆, 按照南京机动车占比来估算南京电动汽车保有量为 25 882 辆。假定能参与调度的电动汽车为总量的 50%, 因此设定可参与调度的电动汽车数量为 12 000 辆。

根据《节能与新能源汽车年鉴》2021 年 3 月数据, 大约估算电动私家车为 60%, 电动公交车的数量占比为 20%, 电动公务车为 20%。因此设定南京区域能参与调度的电动私家电动汽车有 7 200 辆, 电动公交车 2 400 辆以及电动公务车 2 400 辆。

2. 电动汽车出行数据

根据文献[11]对电动汽车行为特性的分析, 对电动汽车的参数进行设置, 如表 1 所示。

表 1 电动汽车参数设置表

类型	电池容量 $C/(\text{kW} \cdot \text{h})$	平均日行程 y/km	平均耗电量/ $(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{km})$	最大充电功率/ kW	最大放电功率/ kW	接入电网 时刻	脱离电网 时刻
私家车	25.5	40	0.13	7	5	8:00 17:30	7:30 17:00
公交车	324	200	1.23	63	40	23:00	4:30
公务车	25.5	60	0.13	7	5	18:00	7:00

(二) 电动汽车调度状态 SOC 值划分

根据式(1)和式(2), 私家车调度状态 SOC 划分计算为:

$$SOC_t = \frac{xy}{C_i} = \frac{0.13 \times 40}{25.5} = 0.2$$

$$SOC_{\min} = 1 - D_{\max} + SOC_t = 1 - 0.7 + 0.2 = 0.5$$

$$SOC_{\min}^{\text{II}} = \frac{\mu P_d^{\max} \Delta t}{C_i} + SOC_{\min} = \frac{0.95 \times 5 \times 0.5}{25.5} + 0.5 = 0.59$$

$$SOC_{\max}^{\text{II}} = SOC_{\max} - \frac{\mu P_c^{\max} \Delta t}{C_i} = 1 - \frac{0.95 \times 7 \times 0.5}{25.5} = 0.87$$

类似地, 可计算出公交车和公务车的调度状态边界。根据上述计算, 将私家车、公交车和公务车的调度状态边界汇总如表 2 所示。

表 2 各类电动汽车调度状态划分

类型	I 类状态	II 类状态	III 类状态	IV 类状态
私家车	1 ~ 0.87	0.87 ~ 0.59	0.59 ~ 0.5	0.5 ~ 0
公交车	—	—	—	1 ~ 0
公务车	1 ~ 0.87	0.87 ~ 0.69	0.69 ~ 0.6	0.6 ~ 0

由计算结果可见, 电动公交车由于日行驶里程较多, 在保证其工作所需电量以及考虑电池损耗的情况下, 其电池是没有可调范围的, 因此, 本文不考

虑电动公交车的调度容量。

(三) 调度容量潜力计算

1. 计算方法

根据情景设置、电动汽车调度状态划分以及上述容量计算方法, 假定一日内电动汽车仅参与一次电网调度, 计算电动汽车在用电高峰期的一小时内可调度容量, 计算流程如图 2 所示。

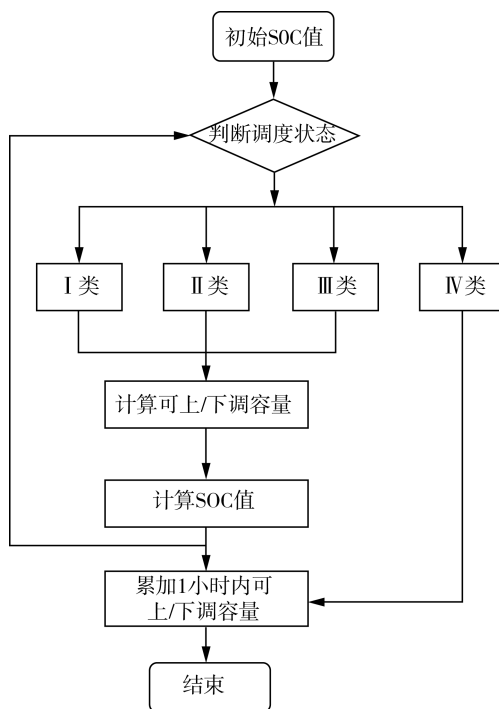


图 2 容量计算流程图

根据调度状态划分,将电动汽车的起始 SOC 值设置为高、中、低三类,为简便计算,三类起始 SOC 分别设为定值 0.9、0.6 和 0.3。对不同 SOC 值状态下电动私家车和公务车的可调度容量进行计算。

2. 高峰时期可调度容量计算

首先选取 20:00 ~ 21:00 用电高峰时期(两个 Δt)的可调度容量进行计算,因为用电高峰时期电网负荷较高,供给小于需求,所以此时段调度容量只考虑向上调度容量。

(1) 私家车调度容量计算

当起始 SOC 值为 0.9 时,第一个 Δt 内电动汽车只可向上调度,根据式(3)和式(5),调度容量计算为:

$$\Delta P_{i,t}^{up} = P_{i,max}^d - P_{i,t} = 5 \text{ kW}$$

$$P_{total,t}^{up} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{i,t}^{up} = 5 \times 7\ 200 = 36\ 000 \text{ kW}$$

调度完成后,此时电动汽车 SOC 值计算为:

$$SOC_{t+\Delta t} = SOC_t - \frac{\mu P_d^{max} \Delta t}{C_i} = 0.9 - \frac{0.95 \times 5 \times 0.5}{25.5} = 0.8$$

第二个 Δt 内电动汽车既可向上也可向下调度,选择向上调度,调度容量为 36 000 kW。

当起始 SOC 值为 0.6 时,第一个 Δt 内电动汽车既可向上调度又可向下调度。若第一个阶段选择向上调度时,调度容量计算为 36 000 kW。调度

完成后,此时 SOC 值为 0.5,此时电动汽车 SOC 值进入不可调度状态,此时第二阶段调度容量为 0。

当起始 SOC 值为 0.3 时,电动汽车不可调度,因此总调度容量为 0。

(2) 公务车调度容量计算

当起始 SOC 值为 0.9 时,第一个 Δt 内电动汽车只可向上调度,调度容量计算为:

$$\Delta P_{i,t}^{up} = P_{i,max}^d - P_{i,t} = 5 \text{ kW}$$

$$P_{total,t}^{up} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{i,t}^{up} = 12\ 000 \text{ kW}$$

调度完成后,此时电动汽车 SOC 值计算为:

$$SOC_{t+\Delta t} = SOC_t - \frac{\mu P_d^{max} \Delta t}{C_i} = 0.9 - \frac{0.95 \times 5 \times 0.5}{25.5} = 0.8$$

第二个调度时间 Δt 内电动汽车既可向上也可向下调度,选择向上调度,调度容量为 12 000 kW。

当起始 SOC 值为 0.6 和 0.3 时,公务车均处于不可调度状态,因此调度容量为 0。

3. 低谷时期可调度容量计算

选取 00:00 ~ 1:00 用电低谷时期的可调度容量进行计算,因为用电低谷时期电网负荷较小,供给大于需求,因此,此时段调度容量只考虑向下调度容量。计算过程与方法不再赘述。

综上所述,不同类型电动汽车在不同初始 SOC 值的情况下在用电高峰时期和低谷时期的一小时内可参与调度的容量计算如表 3 所示。

表 3 调度容量结果表 kW

类型	初始 SOC 值		电动私家车			电动公务车		
			0.9	0.6	0.3	0.9	0.6	0.3
单辆 调度 容量	高峰时期	第一个 Δt	5	5	0	5	0	0
		(可上调容量)	5	0	0	5	0	0
	低谷时期	第一个 Δt	0	7	0	0	7	0
		(可下调容量)	0	7	0	0	7	0
多辆 调度 容量	高峰时期	第一个 Δt	36	36	0	12	0	0
		(可上调容量)	36	0	0	12	0	0
	低谷时期	第一个 Δt	0	50.4	0	0	16.8	0
		(可下调容量)	0	50.4	0	0	16.8	0

本例中按照现有电动汽车保有量的 50% 参与电网调度,可产生的调度容量最大达 50 400 kW。而 2019 年,江苏省新增储能装机容量为 107 000 kW。相比可见,电动汽车参与电网调频辅助服务的潜力是相当可观的。

五、思考与建议

在资源与环境的压力下,电动汽车受政策鼓

励,成为当前发展热点。借助 V2G 技术,电动汽车可作为移动储能设备为电网提供辅助服务,为电网安全、稳定、经济运行做出贡献。本文针对电动汽车参与电网辅助服务提出以下发展建议。

从政府的角度来看,政府可对购买电动汽车的车主进行补贴或奖励,提升消费者购买电动汽车的意愿,增大电动汽车的总保有量;完善相关政策制度,积极引导电动汽车的充电行为,鼓励电动汽车用户积极参与电网调度。另外,政府可加大电动汽

车通信技术的研发投入,提高 V2G 智能化程度,在技术上促进电动汽车参与电网的辅助服务。

从电网的角度来看,电网可以按照城市电动汽车规模,增加电动汽车充电桩的数量并合理分布;在产生电力调度时,合理清算各类辅助服务所产生的成本,包括电网侧和用户侧所产生的实际成本和隐性成本,科学设定辅助服务价格补偿。培育电动汽车聚合商这一中间环节,将分散用户的资源聚合为较大规模资源,减少管理成本。

从用户的角度来看,电动汽车用户不妨提升自己的双碳意识,从思想上认识到参与辅助服务对于环保的巨大贡献;通过响应有序充放电参与辅助服务,除了可获得经济上的补偿之外,亦遵从了自身的环保理念,推进自身的价值实现。

参考文献:

- [1] 高赐威,张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术,2011,35(2):127-131.
- [2] 郭宏磊. 电力辅助服务市场储能发展及应用分析研究[J]. 中国电力企业管理,2019,580(31):40-42.
- [3] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10+25.
- [4] 葛少云,黄缪,刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):1-5.
- [5] 王博,艾欣. 考虑 V2G 用户响应度的峰谷电价时段优化有序充电[J]. 现代电力,2016,33(2):39-44.
- [6] Andersson S L, Eloffson A K, Galus M D, et al. Plug-in hybrid electric vehicles as regulating power providers: Case studies of Sweden and Germany[J]. Energy Policy, 2010, 38(6): 2751-2762.
- [7] 李琥,周琪,史静,等. 大规模电动汽车接入电网对南京市负荷特性的影响及对策[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(S1):19-24.
- [8] Haibo H, Ciwei G, Xuemei S, et al. Aggregation and scheduling methods of electric vehicle agents divided by regions[C]. Shanghai: International Conference on Systems and Informatics, 2016: 208-216.
- [9] 孙强,许方园,唐佳,等. 基于需求响应的电动汽车集群充电负荷建模及容量边界控制策略[J]. 电网技术,2016,40(9):2638-2645.
- [10] 占恺峤,宋永华,胡泽春,等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):11-18+213.
- [11] 王文超. 电动汽车辅助调频策略研究[D]. 太原:山西大学,2018.
- [12] 胡兰兰. 全省机动车保有量超 2 365 万辆[N]. 新华时报,2022-01-14(4).

Analysis on the Potential of Electric Vehicles Participating in Grid Auxiliary Services —Taking Nanjing as an Example

FENG Yi, LIU Ying

(School of Economics and Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Electric vehicle industry develops rapidly, so charging loads connected to grids will have a significant impact on power systems due to uncertainty of charging behavior of electric vehicles. On the other hand, as a movable and adjustable energy storage unit, electric vehicles can provide energy storage auxiliary services for a power system including peak regulation. However, the potential of electric vehicle supplying energy storage auxiliary services needs to be evaluated. This paper analyzes the feasibility of electric vehicles participating in grid auxiliary services, calculates the auxiliary service capacity of different types of electric vehicles, and then calculates the auxiliary service capacity of electric vehicle cluster. And an example of Nanjing is proposed to calculate the potential capacity of this cluster.

Key words: electric vehicles; ancillary services; potential analysis