

引用格式:袁小溪,李香龙,孙舟,等.电动汽车参与紧急调控的功率分配策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):113-120.

Citation: YUAN Xiaoxi, LI Xianglong, SUN Zhou, et al. Power distribution strategy of electric vehicles for emergency control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 113-120.

电动汽车参与紧急调控的功率分配策略

袁小溪¹, 李香龙¹, 孙舟¹, 段小宇², 周文斌¹, 刘祥瑞¹, 胡泽春²

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100051; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:电动汽车作为一种移动储能资源,可以通过运营商聚合参与电网紧急调控服务。针对电动汽车运营商参与紧急调控的功率分配策略问题,分析了电动汽车参与紧急调控的手段,并对不同类型的电动汽车用户参与紧急调控的灵活性和经济性开展分析。综合考虑负荷转移、充电量减少和反向充电3种调控方式,建立电动汽车参与紧急调控的功率分配优化模型,并对其进行松弛简化从而得到线性规划模型。算例分析表明,所提功率分配策略能够快速有效地实现车辆间的紧急调控功率分配,在传统有序充电调控外有效挖掘站内电动汽车的灵活性。

关键词:电动汽车;紧急调控;功率分配;反向放电;负荷转移

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.012 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2024)06-0113-08

Power distribution strategy of electric vehicles for emergency control

YUAN Xiaoxi¹, LI Xianglong¹, SUN Zhou¹, DUAN Xiaoyu²,
ZHOU Wenbin¹, LIU Xianglu¹, HU Zechun²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100051, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a mobile energy storage resource, electric vehicles can participate in the emergency control service of power grids through the aggregation of operators. The power distribution strategy of electric vehicle operators participating in emergency control is proposed, and the means of electric vehicles participating in emergency control is analyzed. The flexibility and economy of different types of electric vehicle users participating in emergency control are discussed. The power distribution optimization model of electric vehicles participating in emergency control is established by comprehensively considering the three control modes of load transfer, charge reduction, and vehicle-to-grid (V2G), and the model is further simplified to a linear programming model by relaxation. The case study shows that the proposed power distribution strategy can quickly and effectively realize the power distribution of electric vehicles for emergency control and effectively activate the flexibility of electric vehicles within stations beyond traditional orderly charging control.

Key words: electric vehicle; emergency control; power distribution; vehicle-to-grid; load transfer

为实现“双碳”目标,大力发展电动汽车已成为全球共识。2022年底,全球电动汽车保有量已超2 600万辆^[1],与此同时,中国作为最大的电动汽车市场,新能源汽车保有量也达到了1 310万辆,渗透率达到4.10%。在电动汽车基础设施建设方面,截至2022年底,中国新能源汽车公共充电桩保有量约

为185万个,私人充电桩约为340万个。随着交通电气化推进和电动汽车渗透率升高,一方面电动汽车充电负荷将成为电力系统不可忽视的重要负荷来源,对电网投资和韧性提升提出了更高的要求;另一方面,电动汽车作为一种可移动的类储能资源,其中蕴藏的灵活性能够为电网运行提供削峰填

收稿日期:2023-06-05;修回日期:2023-08-30

基金项目:北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会资助项目(Z221100000222022);国网北京市电力公司科技项目(520223220011)

通信作者:段小宇(1994—),男,博士,助理研究员,主要从事电动汽车充放电设施规划与运行优化等研究;E-mail:duanxy@tsinghua.edu.cn

谷、调峰调频、需求侧响应,乃至特殊情况下紧急调控支援等服务^[2-6]。

电动汽车充电运营商可以将管理的多个充电站内的充电负荷和车辆调控灵活性进行聚合,通过发挥规模效应来更加经济地参与电网调节和支撑。为此,许多学者对电动汽车聚合有序充电开展了研究。文献[7]设计了运营商聚合电动汽车参与日前能量市场与备用市场的投标策略。文献[8]设计了对电动汽车充放电负荷聚合提供备用容量的估计方法。文献[9]基于所提的边界模型设计了省、市、站三级分层优化架构,对不同规模和层级的电动汽车充电功率进行聚合优化,并在站级设计启发式算法,根据动态的车辆接入状态进行充电功率优化计算。文献[10]设计了充电站内有序充电的两阶段优化策略,能够提升充电站的经济效益。文献[11]则分别建立了以购电成本最小和负荷偏差量最小为目标的优化模型以得到目标有序充电功率曲线和分时价格。文献[12]提出了电动汽车集群分层控制架构,通过分解高维问题提高计算效率。大多数聚合运行问题的研究聚焦在总功率曲线的优化之上,较少实现对每辆车充电曲线的可靠分配。同时需要指出的是,上述研究大多针对日前阶段和日内小时前阶段的充电功率优化,很少考虑实时性的功率调节。

针对电动汽车参与紧急调控和应急供电的问题,文献[13]提出了将双向充电桩作为应急电源接入微电网的设计方法。文献[14]考虑电动汽车通过反向放电对孤岛系统进行可靠性增强,并设计了应急供电策略。文献[15]考虑居民区的容量限制和应急备用能力预留,给出了基于最优价值网络的电动汽车充放电策略优化方法。文献[16]基于模糊K-means算法提出了电动汽车供电聚集方案。但上述研究主要针对空间分散、未进行充电的车辆,实际中无法保证车辆响应和功率策略的执行。相反,站内正在充电车辆参与紧急调控的灵活性更为可靠,而目前尚缺乏针对站内车辆进行二次功率分配以响应电网紧急调控需求的研究。

为了更好地为电动汽车参与紧急调控提供策略支撑,本文针对电动汽车充电运营商聚合下属各站内电动汽车响应电网紧急调控需求的场景展开研究。首先介绍用户自发充电曲线确定和紧急需求处理方法。然后进行电动汽车参与紧急调控的灵活性与经济性分析,介绍电动汽车参与紧急调控需求响应的3类手段和用户分类。最后,建立电动

汽车参与紧急调控的功率分配优化模型。

本文的主要创新性贡献如下。

1) 综合考虑电动汽车采用负荷转移、充电量减少和反向放电3种调控方式参与紧急调控的情况,在传统的有序充电方式进行负荷转移的基础上,将充电量减少与反向放电2种方式加入调控,能够进一步有效地发掘电动汽车参与紧急调控的灵活性。

2) 以最小化总调控成本为目标建立电动汽车参与紧急调控的功率分配优化模型,将充电量减少与反向放电的补偿成本纳入优化目标考量,并通过松弛原始优化模型中的0-1变量将模型简化成为易于快速求解的线性规划模型,以快速执行车辆充电功率分配决策。

1 电动汽车自发充电曲线与紧急调控需求处理

电动汽车充电运营商通过聚合电动汽车参与电网紧急调控,首先需要获取来自电动汽车用户的充电行为偏好和电网侧的紧急调控需求。

1.1 用户偏好输入与自发充电曲线确定

电动汽车用户在接入充电设施或注册运营商系统时表达充电偏好和参与调控意向,其中,充电偏好即充电按照速度优先还是经济优先的方式,参与调控的意向即选择是否参与紧急调控、是否接受减少充电量、是否接受反向放电,同时给出充电电量不足与反向放电的期望补偿价格 c_i^{rd} 、 c_i^{dc} 和需保证的离开时电池电量最小值 e_i^{min} ,并且需给出预计的离开时间 t_i^{dep} 、在预计离开时期望达到的电池电量 e_i^{exp} 。其中,下标 i 为用户或电动汽车的标号。

根据用户提供的偏好可得到每一辆电动汽车没有参与调控条件下 i 的自发充电功率曲线 $\{p_{i,t}^0; \forall t\}$ 。选择速度优先的车辆将按照接入后立即以额定功率 P_i^{nc} 充电,直至电池电量达到用户设定的期望值 e_i^{exp} ;而选择经济优先的车辆将根据车辆离开前各时间段的充电价格 c_i^{chg} 按照充电总费用最低的方式安排充电。基于此,即可得到各个车辆的自发充电功率曲线,上述2类典型自发充电功率曲线如图1所示。将各车辆的自发充电功率曲线叠加即可得到车辆的聚合自发充电功率曲线,将其作为运营商参与紧急调控的容量评估和调控功率确定的基础。当有车辆接入或离开充电站时,运营商的聚合自发充电功率曲线也应进行更新。图2为调控需求与时间窗口示意图。

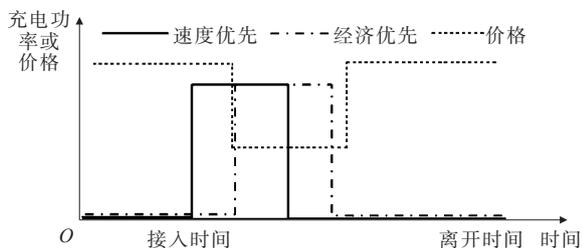


图 1 典型车辆自发充电功率曲线

Figure 1 Self-charging power curves of typical electric vehicles

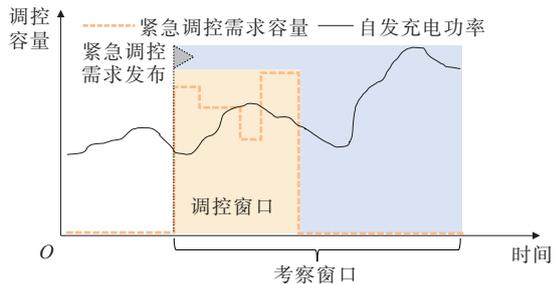


图 2 调控需求与时间窗口示意图

Figure 2 Control demand and time window

1.2 紧急调控需求

考虑电网因电力供需不平衡而需要切除部分负荷的紧急调控需求,其紧急调控需求曲线可依据调控时段和下调功率等参数生成。分配给电动汽车调控的各时刻需求容量记为 P_i^{emg} ,调控时间窗口记为 \mathcal{T}^{emg} ,调控窗口时间长度为 $T^{emg} = |\mathcal{T}^{emg}|$ 。运营商在接收到紧急调控需求之后,应考察长于调控窗口长度的一段时间窗,将其取为当前站内接入电动汽车的最晚离开时间。

2 电动汽车参与紧急调控的灵活性与经济性分析

基于所获得的电动汽车用户充电行为相关参数和来自电网的紧急调控需求曲线,运营商可通过调用和发掘充电车辆的灵活性来尽可能地响应电网紧急调控需求。本节将介绍电动汽车参与紧急调控的方式和不同偏好用户参与调控的灵活性与经济性评估方法。

2.1 电动汽车参与紧急调控的手段

激发电动汽车的灵活性以参与紧急调控的手段包括以下 3 类。

1) 充电负荷转移。

充电负荷转移相当于将充电负荷从调控窗口转移到窗口外的另一时段,在用户离开时可达到预先设置的电量值,且不进行放电。由于用户离开时

充电达到的能量值不变,这种方式对用户而言是“无感”的,因而可不向用户支付补偿成本。

充电负荷转移的调控能力大小可通过充电时间裕度与可转移电量 2 个指标量化。充电时间裕度 $T_{i,t}^{max,c}$ 即车辆 i 在时段 t 内,在预期离开时间 t_i^{dep} 之前,剩余的除充电时间和缓冲时间外的时间长度,其表达式为

$$T_{i,t}^{max,c} = T_{i,t}^{rem} - \frac{E_{i,t}^{rem}}{\eta^c P_i^{rt,c}} - \tau_i^{buf} \quad (1)$$

式中, $T_{i,t}^{rem} = t_i^{dep} - t$ 为到预期离开时间 t_i^{dep} 之前剩余的总时长; $E_{i,t}^{rem}$ 为车辆 i 在时段 t 时距离期望电池电量 e_i^{exp} 的能量差; η^c 为充电效率; $P_i^{rt,c}$ 为额定充电功率; τ_i^{buf} 为考虑涓流充电而引入的缓冲时间。

具体到某个调控窗口 T^{emg} ,在该窗口内其可转移的充电负荷提供的调控电量为

$$E_{i,t,T^{emg}}^{cs} = \eta^c P_i^{rt,c} \cdot \min\{T_{i,T^{emg}}^+, T_{i,t}^{max,c}\} \quad (2)$$

式中, $T_{i,t,T^{emg}}^+$ 为车辆 i 在调控窗口 T^{emg} 内自发充电功率大于 0 的时长。

$$T_{i,T^{emg}}^+ = \sum_t \delta_{i,t} \Delta t \quad (3)$$

式中, Δt 为单位时段时长; $\delta_{i,t}$ 为表示时段 t 内车辆 i 自发充电功率 $p_{i,t}^0$ 是否大于 0 的 0-1 变量:

$$\delta_{i,t} = \begin{cases} 0, & p_{i,t}^0 = 0 \\ 1, & p_{i,t}^0 > 0 \end{cases}$$

2) 减少充电量。

在原有离开时的电量需求基础上适当降低离开时的电量水平,可起到发掘调控潜力的作用。在一个调控窗口 T^{emg} 内,可提供的调控电量为

$$E_{i,t,T^{emg}}^{rd} = \min\left\{e_i^{er}, \eta^c P_i^{rt,c} (T_{i,T^{emg}}^+ - T_{i,t}^{max,c})_+\right\} \quad (4)$$

式中, e_i^{er} 为车辆 i 离开时可达到的因调控需要而减少的电量值。

考虑车辆接续的出行需求,车辆离开时的电池电量不能低于用户预先设置的最小值,即

$$e_i^{rd} \leq e_i^{exp} - E_{i,t_i}^{rem} - e_i^{\min} \quad (5)$$

3) 反向放电。

前 2 种调控方式都是从减少充电功率的角度出发,未考虑放电情况。在考虑暂停充电或降低充电功率之外,采用一段时间内反向放电的方法,可以进一步在此前已降为 0 的充电功率基础上发掘调控潜力。因允许反向放电而在一个调控窗口内可提供的调控电量可通过最大放电支撑时间计算。考虑反向放电后可以通过及时回充来实现能量需求

不降低的情况,此时在额定充电功率、额定放电功率分别为 $P_i^{rt,c}$ 和 $P_i^{rt,d}$ 时,其可提供的最大放电支撑时间为

$$T_{i,t}^{\max,d} = \frac{\eta^c \eta^d P_i^{rt,c}}{P_i^{rt,d} + \eta^c \eta^d P_i^{rt,c}} \left(T_{i,t}^{\text{rem}} - \frac{E_{i,t}^{\text{rem}}}{\eta^c P_i^{rt,c}} - \tau_i^{\text{buf}} \right) \quad (6)$$

式中, η^d 为放电效率。

在反向放电基础上,如果离开时能量进一步降低至低于当前能量,则最大放电支撑时间可以进一步提高。此时,最大放电支撑时间为

$$T_{i,t}^{\max,d} = \frac{\eta^c \eta^d P_i^{rt,c}}{P_i^{rt,d} + \eta^c \eta^d P_i^{rt,c}} \left(T_{i,t}^{\text{rem}} - \frac{E_{i,t}^{\text{rem}} - E_i^{\text{cut}}}{\eta^c P_i^{rt,c}} - \tau_i^{\text{buf}} \right) + \frac{\eta^d E_i^{\text{cut}}}{P_i^{rt,d}} \quad (7)$$

式中, E_i^{cut} 为相对当前能量进一步减少的能量值。

因此,在一个调控窗口内,通过反向放电提供的调控电量为

$$E_{i,t,T^{\text{emg}}}^{\text{dc}} = \frac{1}{\eta^d} P_i^{rt,d} \min\{T^{\text{emg}}, T_{i,t}^{\max,d}\} \quad (8)$$

2.2 电动汽车用户分类与经济性

基于上述3种电动汽车参与紧急调控的方式,本文将参与紧急调控的电动汽车用户按照是否接受离开时电量不足(以下简称“充电不足”)和是否接受反向放电分为以下4种类型,对应可提供的紧急调控能力及相应成本如下。

1) 不接受充电不足+不接受放电。

此类型仅可进行充电负荷转移,必须满足用户离开时的电量需求,但不向用户支付紧急调控费用。

2) 不接受充电不足+接受放电。

此类型必须满足用户离开时的电量需求,才可以进行放电操作。从经济性的角度出发,首先进行充电负荷转移,此时不需支付紧急调控补偿费用,但当需要反向放电进一步发掘调控潜力时,则应支付放电补偿成本。按照放电里程即累计放电电量 e_i^{dc} 和用户上报的单位放电电量补偿成本 c_i^{dc} 进行补偿。

3) 接受充电不足+不接受放电。

此类型不一定满足用户设定的离开时电量需求,可以将其降低到不低于最小限制值 e_i^{min} 的水平。类似地,首先进行充电负荷转移,此时不需要支付补偿费用,但当需要降低离开时电量以进一步发掘潜力时,则应根据用户上报的单位电量成本 c_i^{rd} 和电量降低值 e_i^{rd} 来支付充电不足的补偿成本。

4) 接受充电不足+接受放电。

此类型既可以接受降低其离开时的电量,同时可接受放电。此类用户的调控阶段最复杂:首先,最经济的调控方式是仅进行充电负荷转移,此时不需要支付补偿费用;其次,进行降低充电电量的操作,但离开时电量需求仍不低于当前电量,仅增加充电不足的补偿成本;然后,进行反向放电操作,但暂时不进一步降低电量需求,应增加放电补偿成本;最后,允许进一步降低电量需求至低于当前电量,同时增加放电补偿成本和充电不足补偿成本。

3 电动汽车参与紧急调控的功率分配策略

3.1 功率分配优化模型建立

基于前述电动汽车参与紧急调控的3种方式,可以将电动汽车用户在紧急调控下的功率分配策略建立一个以最小化总调控成本/最大化调控收益为目标的优化问题。

优化目标函数如下:

$$\min \sum_i (c_i^{\text{rd}} e_i^{\text{rd}} + c_i^{\text{dc}} e_i^{\text{dc}}) + \epsilon \sum_i (c_i^+ p_i^+ \Delta t - c_i^- p_i^- \Delta t) - \sum_i c_i^{\text{sig}} p_i^{\text{sig}} \quad (9)$$

式中, c_i^+ 、 c_i^- 分别为从电网购电与向电网放电的电价; p_i^+ 、 p_i^- 分别为运营商聚合从电网购电与向电网放电的电价; ϵ 为放缩因子; c_i^{sig} 为未满足的调控容量惩罚价格; p_i^{sig} 为未满足的调控容量。优化目标中的成本包括减少充电量的补偿成本、反向放电的补偿成本、未满足调控容量的惩罚成本和基于电价的松弛项。

需满足的约束条件如下:

$$\sum_i \left(\eta^c p_{i,t}^{\text{ev}+} \Delta t - \frac{1}{\eta^d} p_{i,t}^{\text{ev}-} \Delta t \right) = \sum_i \eta^c p_{i,t}^0 \Delta t - e_i^{\text{rd}} \quad (10)$$

$$\mu_{i,t} p_{i,t}^{\text{ev}+} + (1 - \mu_{i,t}) p_{i,t}^{\text{ev}-} = 0, \forall i, t \quad (11)$$

$$p_{i,t}^{\text{ev}+}, p_{i,t}^{\text{ev}-} \geq 0, \forall i, t \quad (12)$$

$$\sum_i (p_{i,t}^{\text{ev}+} - p_{i,t}^{\text{ev}-}) = p_t^+ - p_t^-, \forall t \quad (13)$$

$$\lambda_t p_t^+ + (1 - \lambda_t) p_t^- = 0, \forall t \quad (14)$$

$$p_t^+, p_t^- \geq 0, \forall t \quad (15)$$

$$p_t^{\text{sig}} \geq p_t^{\text{emg}} - \left(\sum_i p_{i,t}^0 - p_t^+ + p_t^- \right), t \in \mathcal{T}^{\text{emg}} \quad (16)$$

$$p_t^{\text{sig}} \geq 0, t \in \mathcal{T}^{\text{emg}} \quad (17)$$

$$p_{i,t}^{\text{ev}+} - p_{i,t}^{\text{ev}-} \leq p_{i,t}^{\text{ev}0}, \forall i, \forall t \in \mathcal{T}^{\text{emg}} \quad (18)$$

$$p_{i,t}^{\text{ev}+} - p_{i,t}^{\text{ev}-} \geq p_{i,t}^{\text{ev}0}, \forall i, \forall t \in \mathcal{T}^{\text{val}} \quad (19)$$

$$\sum_t \frac{1}{\eta^d} p_{i,t}^{ev-} \Delta t = e_i^{dc}, \forall i \quad (20)$$

$$e_i^{rd} \geq 0, \forall i \in \Omega_3 \cup \Omega_4 \quad (21)$$

$$e_i^{rd} = 0, \forall i \in \Omega_2 \quad (22)$$

$$p_{i,t}^{ev-} \geq 0, \forall t, \forall i \in \Omega_2 \cup \Omega_4 \quad (23)$$

$$p_{i,t}^{ev-} = 0, \forall t, \forall i \in \Omega_3 \quad (24)$$

式(10)~(24)中, $\mu_{i,t}$ 为表征充放电状态的 0-1 变量, 0 代表充电, 1 代表放电; λ_i 为表征与电网交换功率状态的 0-1 变量, 0 代表从电网购电, 1 代表向电网放电; \mathcal{T}_i^{val} 为充电负荷可转移的有效时段, 即不早于调控窗口的车辆停泊时段。约束条件式(10)给出了充电功率与充电量之间的约束关系, 式(11)、(12)限制了车辆充放电状态, 同一时刻车辆的充/放电功率 $p_{i,t}^{ev+}$ 、 $p_{i,t}^{ev-}$ 中仅有最多一个为正。式(13)给出了电动汽车聚合充放电功率关系。式(14)、(15)限制了同一时刻的聚合净充电功率与放电功率 p_t^+ 、 p_t^- 不能同时为正。式(16)、(17)用于计算各时段未满足的调控容量。式(18)限制车辆充放电功率在调控窗口内不高于自发充电功率曲线, 而式(19)则限制车辆充放电功率在调控窗口外不低于自发充电功率曲线。式(20)给出了车辆的反向放电电量。式(21)~(24)给出了针对参与调控的 3 类电动汽车用户的优化变量限制, Ω_2 、 Ω_3 、 Ω_4 分别表示第 2、3、4 类用户的集合。式(21)、(22)表明接受充电不足的第 3、4 类用户的能量减少值 e_i^{rd} 才可为正。式(23)、(24)表明接受放电的第 2、4 类用户的放电功率 $p_{i,t}^{ev-}$ 才可为正。

3.2 模型简化处理

以上模型是一个带有 0-1 变量的混合整数线性规划模型, 可以在一定条件下进一步对 0-1 变量进行松弛简化从而加速求解过程。

1) 车辆充放电状态变量松弛。

可以证明, 当车辆充放电效率 $\eta^c > 0$, $\eta^d < 1$ 时, 可松弛掉表征车辆充放电状态的 0-1 变量 $\delta_{i,t}$ 及相关约束式。松弛后优化模型的最优解中, 车辆的充电功率与放电功率不同时为正。

2) 与电网交换功率状态变量松弛。

可以证明, 当从电网购电和向电网放电的电价满足 $c_t^+ > c_t^-$ 时, 可松弛掉表征与电网交换功率状态的 0-1 变量 λ_i 及约束式。松弛后优化模型的最优解中, 从电网购电的功率与向电网放电的功率不同时为正。

因此, 功率分配优化模型进一步简化为线性规划模型, 可利用求解工具快速求解。

4 算例分析

4.1 算例设置

对所提出的紧急调控策略进行仿真算例验证和分析, 首先介绍算例设置。

本文以管理 5 个充电站的电动汽车充电运营商为例。进入充电站充电的电动汽车订单参数通过蒙特卡罗抽样方法生成, 订单信息包括对应充电桩、充电开始时间、预期离开时间、起始能量、期望离开时能量、可接受的最低能量、是否参与紧急调控、是否接受充电不足和反向放电, 以及充电不足和放电的补偿价格等, 部分参数信息如表 1 所示。累计生成 100 辆电动汽车充电订单。为简便起见, 假设所有车辆都接受紧急调控, 是否接受减少充电量和反向放电采用随机抽样的方式决定, 并选择即到即充方式生成自发充电曲线。未满足调控需求的单位惩罚价格设置为 1 元/kW·h。所有车辆累计的自发充电功率和电网下发的紧急调控需求曲线如图 3 所示。在图 3 中可以看出, 在调控窗口内需减少的充电负荷幅度较大, 在部分时段甚至超过了自发充电功率。

表 1 电动汽车充电订单参数

Table 1 Parameters in electric vehicle charging orders

| 起始荷电状态 | 期望离开时荷电状态 | 可接受最低能量 | 减少充电量补偿价格/(元·(kW·h) ⁻¹) | 反向放电补偿价格/(元·(kW·h) ⁻¹) |
|------------------|------------------|----------|-------------------------------------|------------------------------------|
| [0.1, 0.5], 均匀分布 | [0.5, 1.0], 均匀分布 | 20% 荷电状态 | [0.6, 1.0], 均匀分布 | [1.0, 1.5], 均匀分布 |

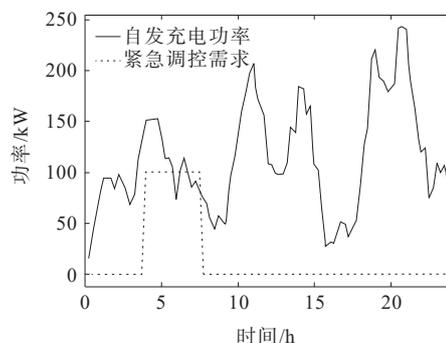


图 3 自发充电功率与紧急调控需求曲线

Figure 3 Self-charging power and emergency control demand curves

4.2 算例结果与分析

采用所提出的紧急调控策略计算得到各车辆参与调控的功率分配结果, 调控后所有车辆的总充

电功率曲线与自发充电功率曲线如图4所示。在给定的算例条件下,采用CVXPY进行模型生成并调用Gurobi求解的时间为38.2 s。紧急调控需求与调控后未满足的调控需求曲线如图5所示,运营商通过功率分配充分利用电动汽车的灵活性能够完全满足电网下达的紧急调控需求,在经济方面,在算例设置的补偿价格下,运营商向用户支付的紧急调控成本共48.9元,其中因减少充电量而支付的成本为19.6元,因反向放电而支付的补偿费用为8.3元。

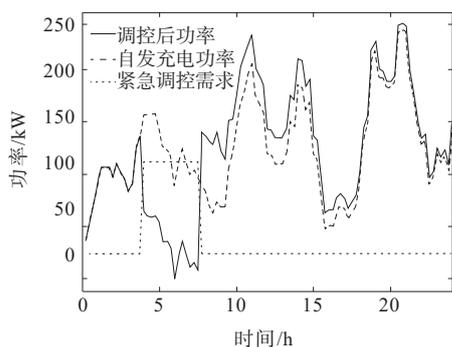


图4 调控后总充电功率曲线与自发充电功率曲线
Figure 4 Total charging power curve and self-charging power curve after control

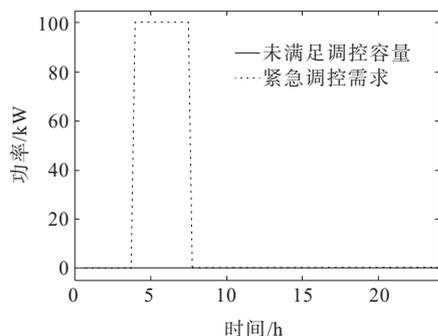


图5 紧急调控需求与调控后未满足的调控需求曲线
Figure 5 Curves of emergency control demand and unmet control demand after control

为了进一步分析所提调控策略,按照所提策略中的3种紧急调控方式满足需求电量和对应的补偿成本如表2所示。可以看出:充电负荷转移满足了最大比例的调控电量,此阶段也是传统意义上的有序充电调控,其将紧急调控窗口中的充电负荷尽可能向外转移,仅保留了部分车辆的充电负荷,即车辆为了按照预期电量完成充电,因时间紧迫而不得不在调控窗口内充电的负荷;减小充电量方式压缩了部分车辆的预期充电电量,从而将调控窗口内剩余的充电负荷进一步减少而无须转移至调控窗口之外,此阶段满足了5.92 kW·h的调控电量;最

后,通过部分车辆的反向放电,实现调控窗口内充放电功率进一步减少,满足了18.00 kW·h的调控电量。

图6、7分别给出了选择减少充电量与反向放电2种方式进行调控的车辆个体在调控前后的充放电功率曲线。图6的车辆通过负荷转移首先将窗口内的部分充电负荷转移至窗口,而后进一步通过减少充电量的方式降低窗口内的充电负荷。

表2 各调控方式满足调控需求与补偿成本

Table 2 Achieved control demand and compensation cost of control methods

| 调控方式 | 满足需求电量/(kW·h) | 补偿成本/元 |
|-------|---------------|--------|
| 负荷转移 | 351.00 | |
| 减少充电量 | 5.92 | 4.1 |
| 反向放电 | 18.00 | 18.7 |

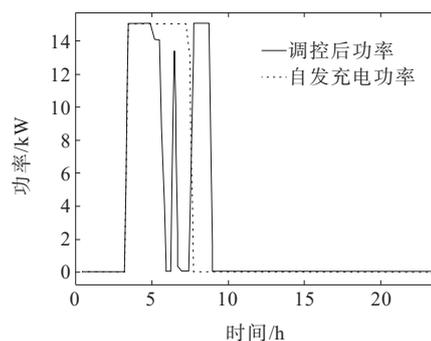


图6 某一车辆个体调控前后充放电功率曲线 (负荷转移+减少充电量)

Figure 6 Charging/discharging power curves of an electric vehicle before/after control (load transfer + charging reduction)

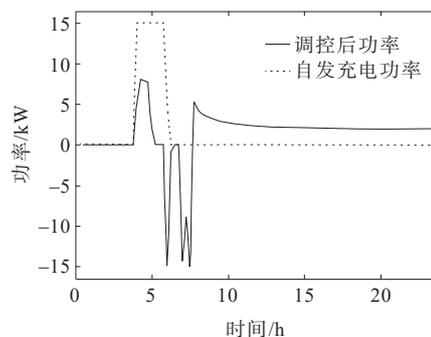


图7 某一车辆个体调控前后充放电功率曲线 (负荷转移+反向放电)

Figure 7 Charging/discharging power curves of an electric vehicle before/after control (load transfer + V2G)

图7的车辆同样首先通过负荷转移将窗口内的部分充电负荷转移至窗口,而后进一步通过反向放电的方式降低窗口内的充电负荷。综上,所提功率分配策略可以快速有效地分阶段将紧急调控需求

进行分解。

图 8 对比了不同调控方式的调控效果,给出了仅考虑部分调控方式的调控前后充放电功率曲线。

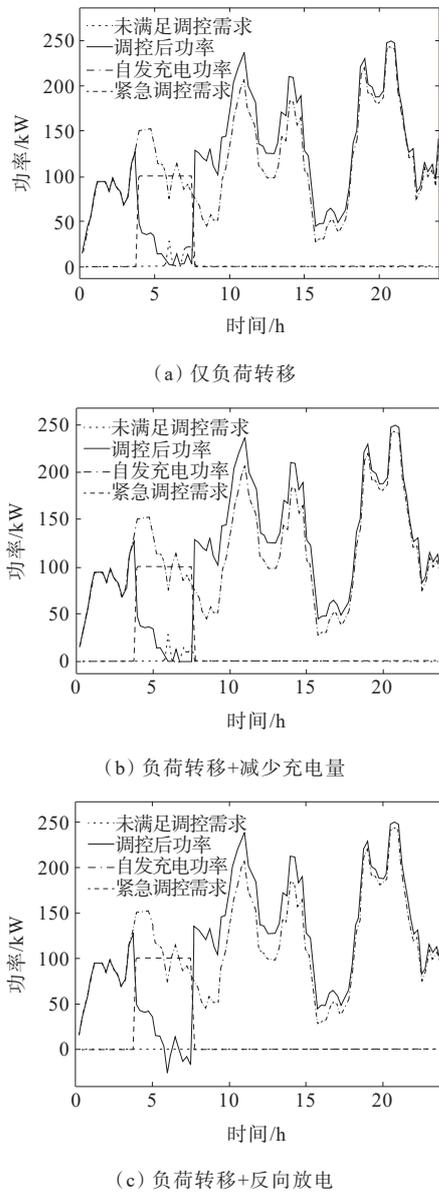


图 8 仅考虑部分调控方式的调控前后总充放电功率曲线
Figure 8 Charging/discharging power curves before/after control with some control methods

图 8(a) 基于现有研究仅考虑有序充电的调控方式,未满足调控需求带来的惩罚成本为 93.45 元;图 8(b) 考虑减少充电量和负荷转移的调控方式,未满足调控需求带来的惩罚成本为 68.54 元;图 8(c) 考虑反向放电和负荷转移的调控方式,可以全部满足调控需求,但反向放电的补偿成本为 25.19 元,相比 3 种调控方式下总的补偿成本增加了 10.5%。由此可见,综合考虑 3 种调控方式相较于传统仅考虑有序充电或仅考虑部分调控方式而言,调控更具

经济性;反向放电在算例中提供的调节能力相较减少充电量而言更大,这是由于减少充电量仅可以将充电功率压减至 0 而反向放电可进一步将其压减为负。

为了更好地比较不同补偿价格下的调控成本,增加了 2 种场景的算例分析,对比如表 3 所示。场景 1 即为本文算例设置的价格情景;场景 2 设置反向放电补偿价格高于未满足调控的惩罚价格,因此未使用反向放电方式且仍有未满足的调控需求;场景 3 设置减少充电量补偿价格高于反向放电,因此未采用减少充电量的方式,而通过反向放电完全满足了调控需求,但补偿成本相比场景 1 变高。

表 3 不同价格关系下各调控方式满足调控需求与补偿成本

Table 3 Achieved control demand and compensation cost of control methods under different price settings

| 场景 | 减少充电量 补偿价格/ (元·(kW·h) ⁻¹) | 反向放电 补偿价格/ (元·(kW·h) ⁻¹) | 未满足调 控成本/ 元 | 负荷转移 电量/ (kW·h) |
|----|---|--|-------------------|-----------------------|
| 1 | [0.6,1.0],均匀分布 | [1.0,1.5],均匀分布 | 0 | 351.00 |
| 2 | [0.6,1.0],均匀分布 | [4.0,6.0],均匀分布 | 68.54 | 300.50 |
| 3 | [1.5,2.5],均匀分布 | [1.0,1.5],均匀分布 | 0 | 350.41 |

| 场景 | 减少充电量/ (kW·h) | 减少充电量 补偿/元 | 反向放电电 量/(kW·h) | 反向放电 补偿/元 |
|----|------------------|---------------|-------------------|--------------|
| 1 | 5.92 | 4.10 | 18.0 | 18.70 |
| 2 | 5.92 | 5.91 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 24.6 | 25.85 |

5 结语

电动汽车可作为一种灵活性资源可通过运营商聚合参与到电网紧急调控之中。本文针对运营商聚合电动汽车参与紧急调控场景,基于 3 类调控手段和用户经济性分析,设计了运营商发挥电动汽车灵活性参与紧急调控的功率分配策略,并通过松弛整数变量将其转化为易于求解的线性规划模型,能够经济地进行车辆之间的功率分配,满足电网调控需求。在本文基础上,未来可以在经济成本中进一步考虑窗口内新接入车辆不确定性的影响,以更好地建模电动汽车灵活性。

参考文献:

[1] International Energy Agency. Global EV outlook 2023 [R].

- [2] 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.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10+25.
- [3] 袁小溪,潘鸣宇,段大鹏,等.基于网格划分的电动汽车充电负荷预测方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):19-26.
YUAN Xiaoxi, PAN Mingyu, DUAN Dapeng, et al. Prediction method of electric vehicle charging load based on grid division[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 19-26.
- [4] 范晋衡,刘琦颖,曲大鹏,等.考虑EV用户响应特性的激励型DR的削峰效果和各方需求分析[J].电力科学与技术学报,2022,37(6):138-149.
FAN Jinheng, LIU Qiyang, QU Dapeng, et al. Analysis on peak shaving effect and needs of all parties based on incentive demand response considering response characteristics of EV users[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 138-149.
- [5] 范宏,李嘉晖,郭琦.考虑用户充电决策行为的电动汽车充电引导策略[J].电力工程技术,2023,42(4):23-30.
FAN Hong, LI Jiahui, GUO Qi. Electric vehicle charging guidance strategy considering user charging decision-making behavior[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 23-30.
- [6] 肖丽,谢尧平,胡华锋,等.基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J].高压电器,2022,58(5):164-171.
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 164-171.
- [7] SARKER M R, DVORKIN Y, ORTEGA-VAZQUEZ M A. Optimal participation of an electric vehicle aggregator in day-ahead energy and reserve markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3506-3515.
- [8] ZHANG H C, HU Z C, XU Z W, et al. Evaluation of achievable vehicle-to-grid capacity using aggregate PEV model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 784-794.
- [9] XU Z W, SU W C, HU Z C, et al. A hierarchical framework for coordinated charging of plug-in electric vehicles in China[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 428-438.
- [10] 张良,严正,冯冬涵,等.采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J].电网技术,2014,38(4):967-973.
ZHANG Liang, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 967-973.
- [11] 常方宇,黄梅,张维戈.分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J].电网技术,2016,40(9):2609-2615.
CHANG Fangyu, HUANG Mei, ZHANG Weige. Research on coordinated charging of electric vehicles based on TOU charging price[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2609-2615.
- [12] 唐佳,高爽,王丹,等.入网电动汽车集群的分层控制方法[J].电力建设,2015,36(7):146-152.
TANG Jia, GAO Shuang, WANG Dan, et al. A hierarchical control algorithm for aggregated electric vehicles in distribution networks[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 146-152.
- [13] SONG Y, LI P C, ZHAO Y L, et al. Design and integration of the bi-directional electric vehicle charger into the microgrid as emergency power supply[C]//2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). Niigata, Japan. IEEE, 2018: 3698-3704.
- [14] XU N Z, CHAN K W, CHUNG C Y, et al. Enhancing adequacy of isolated systems with electric vehicle-based emergency strategy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(8): 3469-3475.
- [15] 谢东亮,张宇琼,吴巨爱,等.容量受限下电动汽车充电策略优化及应急备用能力分析[J].电力系统自动化,2018,42(11):56-63.
XIE Dongliang, ZHANG Yuqiong, WU Juai, et al. Charging optimization strategy and capability analysis as reserve measures for electric vehicles under limited-capacity area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 56-63.
- [16] 赵明宇,徐石明,高辉,等.基于模糊K-means算法的电动汽车应急供电策略[J].电力系统自动化,2016,40(5):91-95+108.
ZHAO Mingyu, XU Shiming, GAO Hui, et al. Strategy of electric vehicle emergency power supply based on fuzzy K-means algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 91-95+108.