

电动汽车实时可调度容量评估方法研究

张聪¹, 张祥文², 夏俊荣², 孙海顺¹, 汪春², 许晓慧², 吴可¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 作为智能电网的重要组成部分, 电动汽车通过调控充放电功率可为电网提供备用容量, 参与调峰调频等辅助服务, 但该容量会受到用户出行需求、电池损耗等因素的影响。基于此, 首先分析了电动汽车参与电网调度的控制模式, 综合考虑用户出行需求、电池寿命、电池电量等约束, 提出了一种规模化电动汽车实时可调度容量的评估算法。最后, 模拟了一种以平抑总负荷波动为目标的充放电场景, 根据可调度容量所需持续时间, 基于所提方法评估出了分别用于电网一次、二次以及三次调频的电动汽车实时可调度容量, 验证了该方法的有效性。

关键词: 电动汽车; 充放电策略; 可调度容量; 用户需求

Research on estimation of electric vehicles real-time schedulable capacity

ZHANG Cong¹, ZHANG Xiangwen², XIA Junrong², SUN Haishun¹, WANG Chun², XU Xiaohui², WU Ke¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: As an important part of smart grid, electric vehicles (EVs) can supply reservation to grid by regulating charging and discharging power, providing ancillary services such as peak regulation, frequency regulation, etc. But the capacity is influenced by user demand, battery loss, etc. Firstly, the control model of EV involving in power dispatching is analyzed. Then an evaluation algorithm of EV real-time schedulable capacity is proposed. The algorithm considers the user demand, battery life and battery power constraints comprehensively. Finally, a scene of smart charging to stabilize the total load fluctuation is simulated, and the proposed algorithm is applied to calculate EV aggregator real-time schedulable capacity used for primary frequency regulation, secondary frequency regulation, and tertiary frequency regulation, based on required duration of schedulable capacity, which verifies the effectiveness of the algorithm.

This work is supported by National Science and Technology Support Plan (No. 2013BAA01B00) and National Natural Science Foundation of China (No. 51361135703).

Key words: electric vehicles; charging and discharging strategy; schedulable capacity; user demand

中图分类号: TM614

文章编号: 1674-3415(2015)22-0099-08

0 引言

随着化石能源危机和环境压力的加剧, 节能降耗和减少对化石能源的依赖已经成为全球经济发展所面临的共同问题。电动汽车以电力代替石油作为其主要动力能源, 具有碳排放低、环境友好等特点, 目前已得到多个国家的大力发展。

电动汽车规模化接入会给电网带来不可忽视的影响^[1-2], 但 V2G(Vehicle-to-grid)技术的发展给电网

的安全经济运行带来一定的机遇。电动汽车可为电网提供虚拟备用, 辅助电网参与调峰调频、提高可再生能源接入等服务^[3-5]。但电动汽车作为一种交通工具, 受到用户出行需求及电池损耗等制约, 不能不受控制地调度其电池容量。另外, 在参与调峰调频、机组组合等时, 电网需要根据电动汽车可调度容量作为参考^[6]。因此, 电动汽车可调度容量大小是个值得研究的问题。

目前这方面国外已有相关的研究, 文献[7]提出了一种 V2G 可调度容量的计算方法, 得到在满足用户需求的前提下电动汽车可以释放的电能。文献[8]提出一种评估电动汽车可调度容量的概率分布方

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAA01B00); 国家自然科学基金委项目(51361135703); 国家电网公司科技项目

法, 并优化出用于调频的合约容量。文献[9]基于排队理论模拟电动汽车随机性, 评估了停车场的可调度容量, 并指出电动汽车可调度容量具有较大的市场潜力, 但没有考虑用户的出行需求等约束。文献[10]基于电动汽车行为的概率特性, 研究了电动汽车可调度容量的经济性, 评估出了用于一二次调频的容量。文献[11]针对目标微网区域内配置的多类型电动汽车集群, 建立了各自的 V2G 可用容量评估模型。

但目前研究大多集中于对电动汽车 V2G 可调度容量的评估, 没有考虑电动汽车作为一种可控性负荷所提供的容量。本文在此基础上, 首先对电动汽车参与电网调度的控制模式进行了分析, 基于电动汽车实时数据, 综合考虑用户出行需求、电池寿命、电池电量等约束, 提出了一种规模化电动汽车实时可调度容量的评估方法。该方法首先根据用户需求及电池寿命确定出电动汽车允许充放电功率的上限, 根据电池电量约束确定允许充放电功率的下限。进而结合当前功率计算出各个调度时段内电动汽车可以提供的可上调和可下调容量, 为电动汽车参与调峰调频提供依据和指导。

1 电动汽车参与电网调度控制模式

单辆电动汽车的容量对于电网而言是微不足道的, 对电动汽车采取“分散接入, 集中控制”的模式, 由集中管理器进行统一管理和控制, 以集中管理器为单元参与电网调度^[12]。集中管理器作为电网和电动汽车的桥梁, 将两者连接起来, 其主要包括两部分内容: 数据管理系统和控制系统。数据管理系统负责收集由电池能量管理监测系统和电网调度中心发送的实时数据以及相关历史数据; 控制系统负责对数据和指令进行分析, 优化计算, 得出各电动汽车的充放电功率; 然后通过对智能充放电机的控制, 实现对电动汽车充放电功率的调节。智能电表的作用则是实现双向通信、双向计量、用电信息存储等功能^[13]。

电动汽车参与电网调度的控制模式如图 1 所示。首先, 集中管理器基于由数据管理系统获得的电动汽车实时数据, 评估出可以被调度的电动汽车容量大小并上报给电网调度中心, 调度中心根据当前网络的能量需求向电动汽车集中管理器下达控制指令, 集中管理器则通过控制系统实现对电动汽车充放电功率的调节, 以达到满足电网需求的目的。

利用电动汽车的实时可调度容量辅助电网调频是电动汽车提供电力辅助服务的重要组成部分, 目前国外许多国家已经形成了较为成熟的电力辅助服

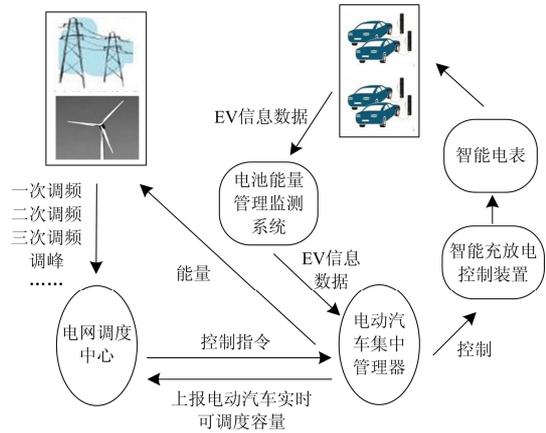


图 1 电动汽车参与电网调度的控制模式

Fig. 1 Control mode of EVs involved in grid dispatching

务市场, 电网只需要向提供服务的机构买入备用容量即可实现调峰调频, 因此上文所述的电动汽车集中管理器参与电力市场是可行的。根据不同的用途, 频率调节备用可以分为一次备用、二次备用和三次备用, 如图 2 所示。

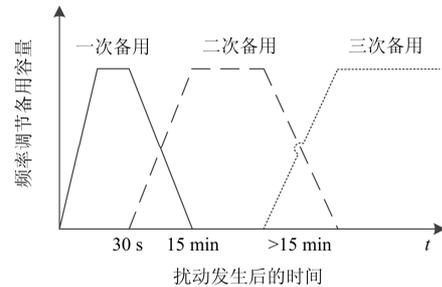


图 2 频率调节备用容量分类

Fig. 2 Classification of frequency control reserve capacity

各备用的具体特征如下:

(1) 一次备用是在频率越限发生仅几秒钟之后就会动作, 恢复发电和负荷之间的平衡, 实现有差调节。该调节备用可由常规机组提供, 是发电机组通过调速系统的自动反应, 调控机组需要在 5~30 s 内动作并且持续 15 min。

(2) 二次备用需要在 5~15 min 内动作释放一次备用, 以备下一个扰动发生。该调节备用可由输电系统运营公司(Transmission System Operator, TSO)通过自动发电控制(AGC)提供, 并要能够持续 15 min 以上, 实现误差调节, 从而使频率稳定在允许的范围。

(3) 三次备用是在当存在较大扰动, 而二次调频已无法满足的情况下动作, 以恢复二次调频备用, 大多数输电系统运营公司的三次调频是由人工操作, 该容量要持续 1~2 h。其目的是通过协调各发

电厂之间的负荷经济分配, 实现电网的经济、稳定运行。

因此, 针对不同的用途, 电动汽车可调度容量也可以相应地分为一次可调度容量、二次可调度容量和三次可调度容量。下面具体介绍可调度容量的评估方法。

2 电动汽车可调度容量评估方法

既是负荷又是电源, 电动汽车在智能充电模式下, 可以通过改变其充放电功率实现与电网的优化互动^[14-15]。因此对于当前时刻某一辆电动汽车而言, 如果充放电功率介于最大充放电功率之间, 则其将具有可上下调控的能力, 相应容量即称为电动汽车的可调度容量。

电动汽车可以等效为分布式电源, 在满足用户基本需求、电池寿命及电量约束等因素前提下, 将电动汽车可增加的负荷容量等效为可减小的发电容量, 对应称为电动汽车可下调容量; 将电动汽车可减小的负荷容量等效为可增大的发电容量, 对应称为电动汽车可上调容量。显然可上调容量为正, 可下调容量为负, 具体如图 3 所示。

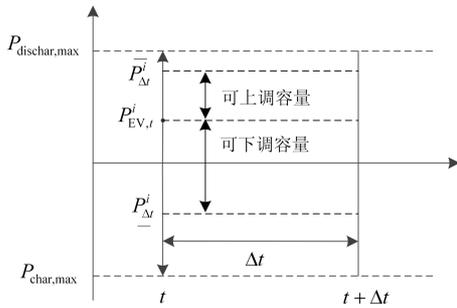


图 3 电动汽车可调度容量示意图

Fig. 3 Schedulable capacity of EVs

图 3 中, $P_{dischar,max}$ 、 $P_{char,max}$ 为电动汽车最大放电功率和最大充电功率; $P_{EV,t}^i$ 为当前时刻电动汽车充放电功率, 定义 $P_{EV,t}^i > 0$ 表示放电, $P_{EV,t}^i < 0$ 表示充电; Δt 为可调度容量所需持续时长, 不同的应用所需时长不同, 例如二次调频所需持续时长大于一次调频; $P_{\Delta t}^i$ 、 $P_{\Delta t}^i$ 分别为 Δt 时间内所允许的充放电功率上限和下限。 $P_{\Delta t}^i$ 与 $P_{EV,t}^i$ 的差值即为电动汽车的实时可上调容量, $P_{EV,t}^i$ 与 $P_{\Delta t}^i$ 差值即为电动汽车的实时可下调容量, 实时可调度容量的评估方法具体所下所示。

2.1 电动汽车实时可上调容量的评估算法

电动汽车的充放电功率是否具有上调空间, 主要受限于电动汽车用户的出行用电需求及电池寿命。只有在满足用户需求、放电深度在允许范围内、当前功率小于最大放电功率时, 才可以进一步减小

充电功率或者释放更多的电能。

(1) 考虑用户出行用电需求

为了保证电动汽车在离开时达到用户所期望的电量 SOC_{need}^i , 则经过 Δt 时段的调度之后, 电动汽车在 $t + \Delta t$ 时刻的电量要大于公式(1)计算的所允许最小电量 $SOC_{min,t+\Delta t}^i$ 。

$$SOC_{min,t+\Delta t}^i = SOC_{need}^i - \frac{(-P_{char,max}) \times \eta_{char} \times (T_{dep,i} - (t + \Delta t))}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_i 为电池容量; η_{char} 为电动汽车充电效率; $T_{dep,i}$ 为第 i 辆电动汽车离开时刻。该式表示的意义为, 在 $t + \Delta t$ 时刻, 如果电池电量大于所允许的最小电量 $SOC_{min,t+\Delta t}^i$, 此后如果持续以最大充电功率为电动汽车充电, 则能够在计划离开时达到用户期望电量。否则, 则不能够达到用户需求。

(2) 考虑电池寿命

电池寿命可用在一定工况下充放电的循环次数表示, 图 4 所示为目前应用较为广泛的两种电池放电深度与循环寿命的关系。可以看出, 放电深度与循环寿命成反比, 放电深度越大, 循环寿命将会越短。因此, 为了保护电池寿命, 需要尽量避免频繁

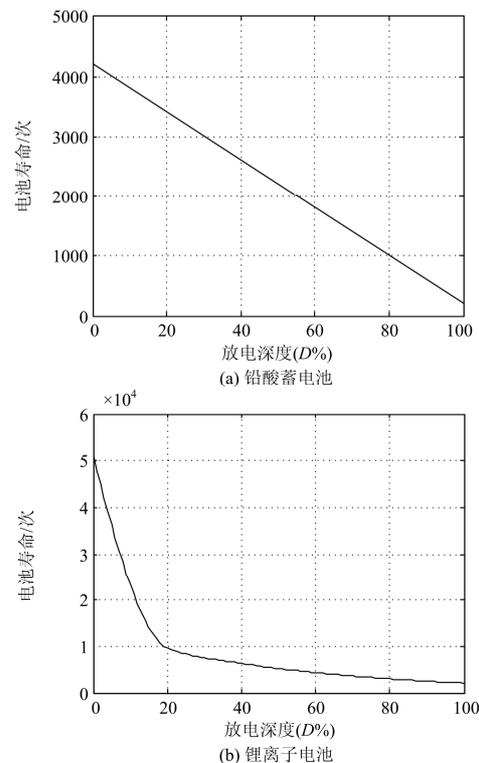


图 4 电动汽车电池放电深度与寿命的关系

Fig. 4 Relationship between the EV battery discharge depth and the battery life

地深度充放电,即放电深度不能过大^[16-17]。本文以锂离子电池为例进行研究,从图4中可以看出,锂离子电池寿命要比铅酸电池长,当锂离子电池放电为60%时,循环寿命有4358次,放电深度80%时,循环寿命为3000次,能够达到锂电池使用寿命的标准^[17]。

一二次调频相比于三次调频充放电循环更加频繁,为了既能够提供更多的可调度容量,又可以尽量减小对电池寿命的影响,本文将用于一次调频的放电深度设定为50%,用于二次调频的放电深度设定为60%,而用于三次调频的放电深度设定为80%。因此在 $t + \Delta t$ 时刻,电动汽车电量不得低于允许 $100\% - D_{\max}$,如式(2)所示。

$$SOC_{\min,t+\Delta t}^i \geq 100\% - D_{\max} \quad (2)$$

式中, D_{\max} 为电动汽车允许的最大放电深度。

由此,通过最小允许电量 $SOC_{\min,t+\Delta t}^i$ 可以进一步计算出 Δt 时间内电动汽车充放电功率的上限 $\overline{P}_{\Delta t}^i$,如式(3)所示。

$$\overline{P}_{\Delta t}^i = \begin{cases} \max(P_{\text{char,max}}, -\frac{\Delta SOC_t^i \times C_i}{\eta_{\text{char}} \times \Delta t}), & \Delta SOC_t^i > 0 \\ \min(P_{\text{dischar,max}}, -\frac{\Delta SOC_t^i \times C_i}{\eta_{\text{dischar}} \times \Delta t}), & \Delta SOC_t^i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta SOC_t^i = SOC_{\min,t+\Delta t}^i - SOC_t^i \quad (4)$$

式中: ΔSOC_t^i 为 $t + \Delta t$ 时刻所允许最小电量与当前电量的差值; η_{char} 、 η_{dischar} 分别为电动汽车充电、放电效率。如果 $\overline{P}_{\Delta t}^i > 0$, 则 $\overline{P}_{\Delta t}^i$ 表示满足用户需求所允许的最大放电功率; 如果 $\overline{P}_{\Delta t}^i < 0$, 则 $\overline{P}_{\Delta t}^i$ 表示允许的最小充电功率。

从图3中可以看到,当 $\overline{P}_{\Delta t}^i > P_{\text{EV},t}^i$ 时,表示此时电动汽车充放电功率具有上调的空间,即电动汽车实时可上调容量为

$$\Delta P_{\text{up}}^i = \overline{P}_{\Delta t}^i - P_{\text{EV},t}^i \quad (5)$$

规模化电动汽车的可上调容量为

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

2.2 可下调容量的计算方法

电动汽车充放电功率是否具有下调空间,主要受限于充电设备的最大充电功率和电池电量约束。只有当充电功率小于最大充电功率,且电池未充满时,才可以进一步增大充电功率,从而为电网提供

下调备用容量。

考虑电池电量约束:

$$SOC_{t+\Delta t}^i \leq 100\% \quad (7)$$

则在 Δt 时间内,电动汽车可以增加的最大电量为

$$\Delta SOC_t^i = 100\% - SOC_t^i \quad (8)$$

因此,电动汽车所允许的最大充电功率为

$$\underline{P}_{\Delta t}^i = \max(P_{\text{char,max}}, -\frac{\Delta SOC_t^i \times C_i}{\eta_{\text{char}} \times \Delta t}) \quad (9)$$

从图3中可以看到,当 $P_{\text{EV},t}^i > \underline{P}_{\Delta t}^i$ 时,表示此时电动汽车充放电功率具有下调的空间,即电动汽车实时可下调容量为

$$\Delta P_{\text{down}}^i = P_{\text{EV},t}^i - \underline{P}_{\Delta t}^i \quad (10)$$

规模化电动汽车的可下调容量可表示为

$$P_{\text{total,down}} = \sum_{i=1}^N \Delta P_{\text{down}}^i \quad (11)$$

图5所示为电动汽车实时可调度容量的评估算法流程图,具体步骤如下。

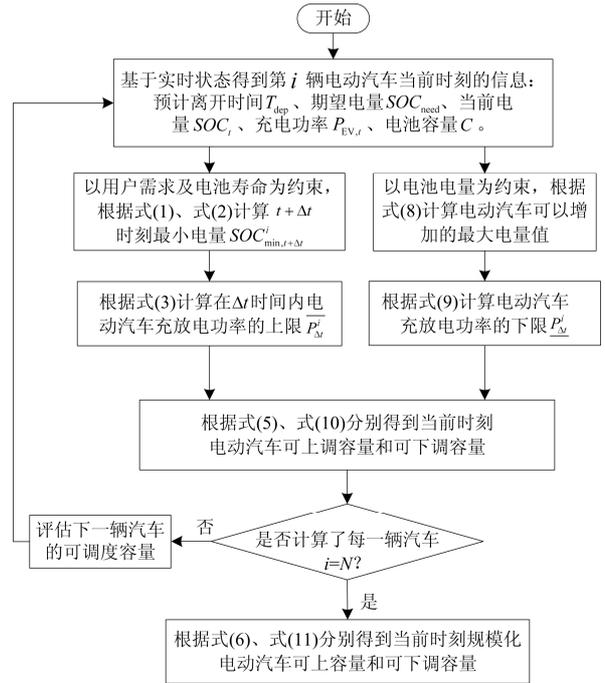


图5 电动汽车实时可调度容量的评估算法流程图

Fig. 5 Calculation process of the real-time schedulable capacity of EVs

(1) 基于实时状态得到当前时刻各辆电动汽车的信息,具体包括预计离开时间、当前电量、期望电量、充电功率、电池容量等;

(2) 以用户需求及电池寿命为约束,根据式(1)、

式(2)计算 $t + \Delta t$ 时刻最小允许电量。以电池电量为约束, 根据式(8)计算电动汽车可以增加的最大电量;

(3) 分别根据式(3)、式(9)计算 Δt 时间内电动汽车充放电功率的上限和下限;

(4) 分别根据式(5)、式(10)计算电动汽车可上调和可下调容量;

(5) 判断是否计算了每一辆汽车, 如果是则输出规模化电动汽车可调度容量; 否则返回(1)。

3 算例分析及应用

3.1 充放电场景模拟

为了对上述算法进行验证, 本文模拟了一个电动汽车集中管理器辖区内电动汽车的充放电场景, 得到该场景下每辆电动汽车一天 24 h 各个时刻的实时数据信息, 进而评估出该集中管理器一天内的实时可调度容量。该场景以平抑总负荷波动为目标, 电动汽车充放电功率为控制变量, 具体模型如式(12)^[18]。

(1) 目标函数

$$\min \sqrt{\sum_{t=1}^T (P_{load,t} - \sum_{i=1}^N P_{EV,t}^i - P_{average})^2} \quad (12)$$

式中: $P_{load,t}$ 为常规负荷; N 为电动汽车规模; T 为一天内的时间节点数; $P_{EV,t}^i$ 为控制变量, 即电动汽车的充放电功率, $P_{EV,t}^i > 0$ 为放电, $P_{EV,t}^i < 0$ 为充电; $P_{average}$ 为平均负荷。

$$P_{average} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{load,t} - \sum_{i=1}^N P_{EV,t}^i) \quad (13)$$

(2) 约束条件

1) 充放电功率约束

$$P_{char,max} \leq P_{EV,t}^i \leq P_{dischar,max} \quad (14)$$

2) 用户电量需求及电池容量约束

电动汽车在离开时要能够达到用户出行需求, 同时受到电池容量的限制, 电动汽车的电量不得大于电池自身最大容量 $SOC \leq 100\%$, 即

$$SOC_{need}^i - SOC_0^i \leq \frac{\Delta E_i}{C_i} \times 100\% \leq 100\% - SOC_0^i \quad (15)$$

式中: SOC_0^i 为电动汽车起始电量; ΔE_i 为电动汽车增加的电能。

$$\Delta E_i = -\sum_{t=1}^T P_{EV,t}^i \times \Delta t \times \eta \quad (16)$$

利用 Matlab 进行仿真建模, 假设该集中管理器辖区内并网电动汽车有 2 000 辆, 最大充电与放电

功率均为 5 kW; 充放电效率为 95%。电动汽车用户行为具有不确定性, 如起始电量、并网时间、离开时间等参数, 可利用统计学方法确定它们的概率分布, 为模拟充电场景, 本文参考文献[19]中对用户行为的研究, 设置各参数如表 1 所示。

图 6 和图 7 所示为在该算例模拟下, 电动汽车充放电负荷对常规负荷的影响及与电网的能量交互。可以看出, 在白天 9:00~12:00 和傍晚 18:00~21:00 的负荷高峰期, 电动汽车集中管理器利用电池中富裕的能量向电网放电, 减小负荷峰值, 起到削峰的作用。而在白天 13:00~15:00 和晚上 23:00~6:00 的负荷低谷期, 为了满足用户第二天的出行需求, 大部分电动汽车将进入充电状态, 增大低谷负荷, 起到填谷的作用。

表 1 某集中管理器辖区内电动汽车参数

Table 1 EV parameters of the aggregator

并网时段	电池容量/kWh	起始电量 SOC/%	期望电量	并网时间	离网时间
白天	40	N(65,15)	85	N(9.3,0.15)	N(17.5,0.25)
晚上		N(45,15)	90	N(18.5,1.2)	N(7.5,0.5)

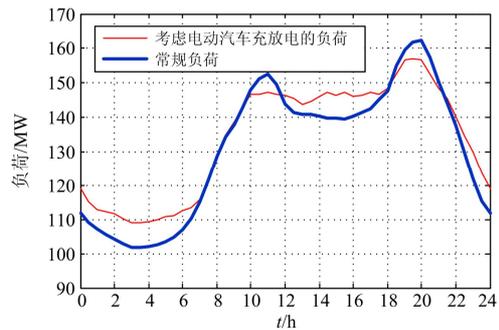


图 6 电动汽车智能充放电对常规负荷影响

Fig. 6 Influence of EV charging and discharging on the traditional load

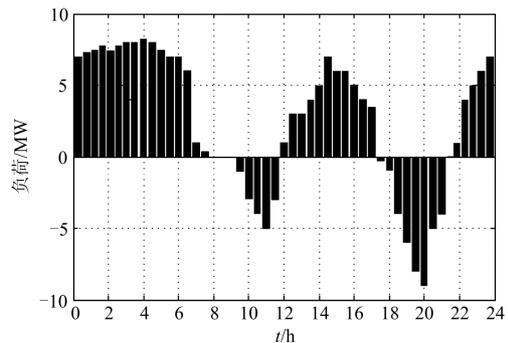


图 7 电动汽车集中管理器一天内与电网的能量交互

Fig. 7 Energy interaction of EV aggregator and the power grid in one day

3.2 算例应用与分析

基于上述场景模拟，可以得到该场景下每辆电动汽车一天 24 h 各个时刻的实时数据信息，包括：当前电量、期望电量、充电功率、电池容量、预计离开时间等，从而根据本文所提的电动汽车可调度容量评估方法，评估出该集中管理器可以提供的实时可调度容量大小。根据频率调节容量的特点，分别设置一次、二次、三次调频容量的持续时长及电池放电深度如表 2 所示。

表 2 频率调节参数

Table 2 Parameters of frequency control

容量类型	持续时长 Δt /h	电池放电深度(D%)
一次调频	0.25	50
二次调频	0.5	60
三次调频	2	80

图 8 所示为给定场景下，该集中管理器一天中可以提供的实时可调度容量。可以看出，电动汽车可调度容量随时间变化，这取决于各个时刻电动汽车的状态、用户需求等因素。比较图 7，当电动汽车处于放电状态时，则具有由放电变为充电的潜能，因此充放电功率具有较大的下调空间，可下调容量较大；当电动汽车处于充电状态时，则具有反向放电的潜能，因此充放电功率具有较大的上调空间，可上调容量较大。

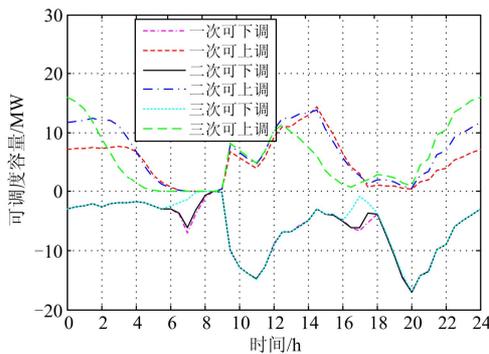


图 8 电动汽车集中管理器实时可调度容量

Fig. 8 Real-time schedulable capacity of EV aggregator

另外，因为持续时间及放电深度不同，不同类型的调频容量也不尽相同，尤其是可上调容量。

从图 8 中可以看出，在电动汽车并网的初期 20:00~1:00，由于所允许放电深度越大，电动汽车可提供的容量就会越大，所以一次可调度容量小于二次可调度容量小于三次可调度容量；而在电动汽车并网的后期，13:00~17:00 和 4:00~7:00，由于电

动汽车陆续离网，可调度容量所需持续时间越长，电动汽车可控性就会越差，因此三次可调度容量小于二次可调度容量小于一次可调度容量。此外，由于可下调容量只由离网时间及电池电量约束决定，不受持续时间及放电深度的影响，因此三者的可下调容量变化不大。

图 9 所示为电池放电深度对可调度容量的影响，取时刻 2:00 用于二次调频的可调度容量为例。可以看出，可下调容量不受放电深度影响，而可上调容量则随着放电深度的增加而增大。放电深度为 80% 时，可调度容量已接近于最大值，而放电深度为 20% 时，几乎不允许电动汽车参与放电，可上调容量为零。因此，需要合理确定放电深度，以保证既能减小电池损耗，又能充分利用电动汽车可调度容量。

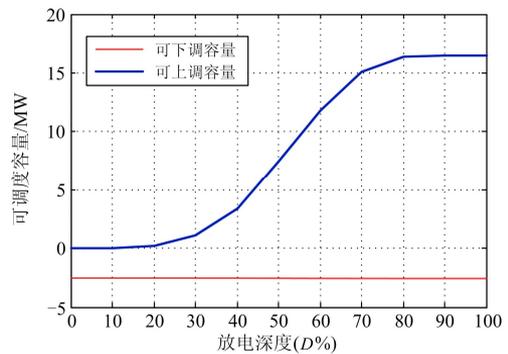


图 9 可调度容量与放电深度关系

Fig. 9 Relationship between the schedulable capacity of the EV battery discharge depth

4 结论

电动汽车在智能充电模式下，可以通过改变其充放电功率实现与电网的优化互动，为电网提供备用容量，参与电网调峰调频等辅助服务，但该容量会受到用户出行需求、电池损耗等因素的制约，不能无限制的调度。

本文首先分析了电动汽车参与电网调度的控制模式，综合考虑用户电量需求、电池寿命、电池电量等约束，提出了一种规模化电动汽车实时可调度容量的评估方法。该方法基于电动汽车的实时数据，根据用户需求及电池寿命计算电动汽车充放电功率的上限，根据电池电量约束确定最大允许充电功率，结合当前功率评估出调度时段内电动汽车可以上调与下调的容量大小。

通过算例模拟，评估了给定场景下用于一次调

频、二次调频、三次调频的电动汽车可调度容量。结果表明, 由于可调度容量所需持续时长和允许放电深度不同, 不同应用场合的可调度容量不同, 并且可调度容量所需持续时间越短、允许放电深度越大, 则可调度容量越大, 验证了评估算法的有效性。该评估算法可以为电动汽车参与调峰调频提供依据和指导。

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.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [2] 张祥文, 江星星, 王龙, 等. 配电网接纳电动汽车能力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 14-20.
ZHANG Xiangwen, WANG Xingxing, WANG Long, et al. Research on assessment methods of distribution network's ability of admitting electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 14-20.
- [3] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [4] METS K, VERSCHUEREN T, HAERICK W, et al. Optimizing smart energy control strategies for plug in hybrid electric vehicle charging[C] // Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMSWkaps), 2010 IEEE/IFIP, 2010.
- [5] PECAS LOPES J A, ROCHA ALMEIDA P M, SOARES F J. Using vehicle-to-grid to maximize the integration of intermittent renewable energy resources in islanded electric grids[C] // International Conference on Clean Electrical Power, 2009: 290-295.
- [6] 汪春, 吴可, 张祥文, 等. 规模化电动汽车和风电协同调度的机组组合问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 41-48.
WANG Chun, WU Ke, ZHANG Xiangwen, et al. Unit commitment considering coordinated dispatch of large scale electric vehicles and wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 41-48.
- [7] KUMAR K N, SIVANEASAN B, CHEAH P H, et al. V2G capacity estimation using dynamic EV scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 2(5): 1051-1060.
- [8] HAN SEKYUNG, HAN SOOHEE, SEZAKI K. Estimation of achievable power capacity from plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation: case studies for market participation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(4): 632-641.
- [9] CHUKWU UC, MAHAJAN SM. V2G electric power capacity estimation and ancillary service market evaluation[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. San Diego, CA: 2011: 1-8.
- [10] DALLINGER D, KRAMPE D, WIETSCHEL M. Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 302-313.
- [11] 翁国庆, 张有兵, 戚军, 等. 多类型电动汽车电池集群参与微网储能的V2G可用容量评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 36-45.
WENG Guoqing, ZHANG Youbing, QI Jun, et al. Evaluation for V2G available capacity of battery groups of electric vehicles as energy storage elements in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 36-45.
- [12] STROEHLE P, BECHER S, LAMPARTER S, et al. The impact of charging strategies for electric vehicles on power distribution networks[C] // Energy Market (EEM), 2011 8th International Conference on the European: IEEE, 2011: 51-56.
- [13] 薛红红. 电动汽车与电网互动技术之协调充电策略探究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
XUE Honghong. The research of coordinated charging strategies on vehicle to grid technology[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2012.
- [14] 戴欣, 袁越, 傅质馨, 等. 用户侧电动汽车放电策略及其经济效益评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 55-61.
DAI Xin, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Discharge

- strategy and economic benefits evaluation of electric vehicles in user side [J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 55-61.
- [15] 李敏, 苏小林, 阎晓霞, 等. 电动汽车有序充放电控制与利用研究新进展[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(6): 70-76, 80.
- LI Min, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. New development of the coordinated charging and discharging control for plug-in electric vehicles[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(6): 70-76, 80.
- [16] LIU L, SOHN C, BALZER G, et al. Economic assessment of lithium-ion batteries in terms of V2G utilisation[C] // Electrical and Power Engineering (EPE), 2012 International Conference and Exposition on: IEEE, 2012: 934-938.
- [17] ZHOU C, QIAN K, ALLAN M, et al. Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1041-1050.
- [18] 张聪, 许晓慧, 孙海顺, 等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 19-24.
- ZHANG Cong, XU Xiaohui, SUN Haishun, et al. Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 19-24.
- [19] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 30(11): 126-130.
- TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 30(11): 126-130.
-
- 收稿日期: 2015-04-20; 修回日期: 2015-07-02
- 作者简介:
- 张聪(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事规模化电动汽车与电网交互机理方面的研究工作; E-mail: hustzhangcong@qq.com
- 张祥文(1980-), 男, 硕士, 高工, 主要从事变电站自动化以及新能源发电方向的研究工作;
- 孙海顺(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统仿真与数字仿真、FACTS控制、电动汽车与电网交互机理等方向的研究工作。
- (编辑 葛艳娜)