

考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略

王明深¹,穆云飞¹,贾宏杰¹,戚艳²,于建成²,齐文瑾³

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国网天津市电力公司电力科学研究院,天津 300384;3. 江苏省电力设计院,江苏 南京 211102)

摘要:为促进风电在电网中的消纳吸收,提出了考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略。首先对单体电动汽车入网后的储能特性进行精细化建模,充分考虑储能容量对不同荷电状态(SOC)的电动汽车有功响应能力的约束,在此基础上构建了电动汽车集群储能能力评估模型;进而针对多个电动汽车集群的协同控制,提出了考虑集群储能能力差异性的联络线功率波动平抑控制策略。该策略根据SOC自适应算法,在考虑各电动汽车响应能力约束的基础上,根据自身SOC水平确定各电动汽车的目标功率值,从而充分利用电动汽车与电网交换功率的连续调节能力;同时,该策略提出2种不同的交换功率控制方法,并探究不同方法在减少放电过程方面的差异性。最后,算例中利用电动汽车集群储能能力平抑联络线的功率波动,仿真结果验证了所提出的电动汽车集群储能能力评估模型和平抑控制策略的有效性。

关键词:电动汽车;集群;风电;储能能力;平抑控制;SOC;SOC自适应算法

中图分类号:TM 614;U 469.72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.030

0 引言

近年来,为应对能源危机,风力发电以其节能减排的巨大优势,在世界范围内快速发展。预计到2020年,我国风电装机容量将高达150 GW^[1]。随着风电在电网中的大规模接入,风电随机间歇性的特点将给电网的安全稳定运行产生深刻影响^[2-3]。风电功率具有强波动性,而传统发电机由于爬坡率的限制,难以追踪风电功率的快速变化,这已成为制约风电大规模入网的主要障碍^[4-5]。根据2010—2016年风电统计数据,我国弃风现象严重,弃风率超过10%,一些地区弃风率甚至高达47%^[6-7],弃风造成风电利用率低,严重影响风电入网的经济性。

为促进风电在电网中的消纳吸收,目前一种有效方式是借助储能装置来减轻风电功率波动的影响。文献[8-9]验证了电池储能系统具有能量密度高、充放电响应速度快的优势,能够有效平抑风电引起的功率波动;在文献[10-11]中,飞轮储能系统由于使用寿命长、运行维护方便的特点,成为辅助风电入网的另一重要储能系统;而文献[12-13]验证了超级电容在平抑风电所带来的功率波动时,具有效率

高、短时间充放电速度快的特点。然而,目前储能系统的投资及运行成本较高,大规模配置储能系统将严重影响风电入网的经济性^[14]。

近年来,随着需求响应技术的快速发展,以电动汽车为代表的需求侧资源,接入电网后能够作为储能单元,通过改变与电网交换的功率大小(充电或放电),为电网提供多类型的辅助服务。预计到2020年,我国电动汽车数量将达到 5×10^6 辆^[15],如此大规模电动汽车接入电网,其响应容量将十分可观。文献[16-17]在充分考虑用户出行规律的基础上,验证了电动汽车集群具有潜在的有功响应能力;文献[18-19]有效利用了电动汽车的响应能力,从而减轻了分布式电源接入配电网造成的电压波动问题;文献[20-21]提出了针对电动汽车的频率响应控制策略,利用电动汽车的响应能力来提升电网的频率稳定;文献[22-23]通过优化电动汽车的充放电过程,促进分布式电源在电网中的消纳吸收。

然而,目前针对电动汽车入网后的调度控制研究仍存在以下问题:①在建立单体电动汽车模型时,忽略了电池储能容量在时间尺度上对处于不同荷电状态SOC(State Of Charge)的电动汽车的响应能力的影响;②多个电动汽车集群在参与调度控制时,其约束主要来自有功响应能力的上下限约束,而忽略了集群之间储能容量的差异性;③不同SOC的电动汽车在控制过程中,主要是根据排队理论来选择参与调控的电动汽车,被选择的电动汽车通过充电、空闲、放电状态的相互切换来实现需求响应,而忽略了以电力电子装置为基础的充电桩对其入网功率连续调节的能力。

为此,本文在充分研究电动汽车入网后储能特性的基础上,构建了单体电动汽车的精细化储能能

收稿日期:2018-01-30;修回日期:2018-03-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050403);国家自然科学基金资助项目(51677124, 51625702);国网天津市电力公司科技项目(KJ17-1-08);国际应用能源联合实验室(分布式能源与微网)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA050403), the National Natural Science Foundation of China(51677124, 51625702), the Science and Technology Project of State Grid Tianjin Electric Power Company(KJ17-1-08) and APPLIED ENERGY UNILAB-DEM(Distributed Energy & Microgrid)

力模型,以精确分析电动汽车集群的储能能力;在平抑控制策略中,多个电动汽车集群在协同追踪风电带来的功率波动时,充分考虑了不同集群储能能力的差异性;同时,该策略考虑了针对电动汽车入网后关于功率控制的 2 种控制方法,并对不同控制方法下的放电过程进行对比分析,以减少电池的放电过程;电动汽车在参与平抑控制时,充分考虑入网功率的连续调节能力,根据 SOC 自适应算法,不同 SOC 的电动汽车在平抑控制时贡献不同的响应能力。

1 平抑控制策略实现框架

考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的联络线功率平抑控制策略的实现框架如图 1 所示。

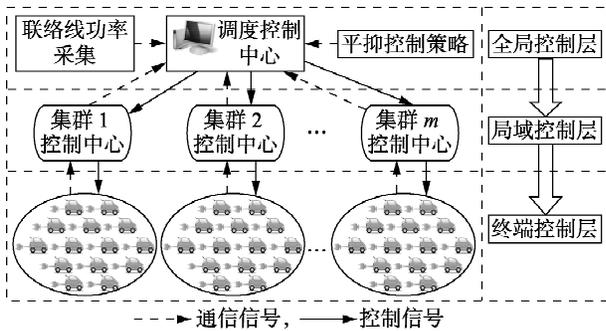


图 1 平抑控制策略实现框架

Fig.1 Framework of smooth control strategy

图 1 中包括 m 个电动汽车集群,根据调度控制范围的不同,该平抑控制策略实现了全局控制层、局域控制层和终端控制层之间的协同控制。本文将电动汽车与电网交换的功率定义为电动汽车的输出功率,输出功率为正表示电动汽车向电网反馈电能,输出功率为负则表示电动汽车从电网获取电能。

a. 全局控制层。该层的调度控制中心实时采集联络线的功率数据,并接收局域控制层中各电动汽车集群控制中心提供的储能能力参数;然后根据平抑控制策略,计算各集群的响应容量,并向各电动汽车集群控制中心发出调度控制信号。

b. 局域控制层。该层的各电动汽车集群控制中心实时采集电动汽车的输出功率和 SOC,并根据离线数据,包括电动汽车电池容量、出行需求 SOC、SOC 变化范围、额定充放电功率、充放电效率、离开电网时间等信息,实时评估集群的储能能力参数,并将储能能力参数提供给全局控制层;同时,该层的集群控制中心,接收来自全局控制层的调度控制信号,并根据 SOC 自适应算法和电动汽车输出功率限制,计算各电动汽车的输出功率值。

c. 终端控制层。该层主要是终端设备,主要用来接收来自局域控制层的控制信号,并实时调整电动汽车的输出功率;同时,用户入网前需要在相应的终端设备上设定其充电计划,并将充电计划的信息

提供给局域控制层。

2 电动汽车集群储能能力评估模型

2.1 单体电动汽车精细化储能能力模型

电动汽车接入电网后,可以等效为电池储能单元,借助基于电力电子装置的充电桩,通过调整其输出功率,在满足用户出行需求的前提下,参与到电网的运行中。单体电动汽车的储能能力有限,而以集群为整体的大规模电动汽车的储能能力十分可观。构建精细化的单体电动汽车储能能力模型,对于评估电动汽车集群的储能能力具有重要意义。

以电动汽车采用“慢充”的充电方式为例,单体电动汽车的储能特性如图 2 所示,图中 t 为时间, S 为 SOC,阴影部分为电动汽车入网后的最大运行区域。为获取单体电动汽车的最大运行区域,以集群 k 中的电动汽车 j 为例,图中 $[t_{j,s}^k, t_{j,d}^k]$ 为电动汽车接入电网时段, $[S_{j,\min}^k, S_{j,\max}^k]$ 为电动汽车能够进行输出功率控制的 SOC 范围, $S_{j,s}^k$ 为用户出行前对 SOC 的需求。图 2 中, A 点坐标为 $(t_{j,s}^k, S_{j,s}^k)$,代表电动汽车在 $t_{j,s}^k$ 时刻接入电网的 SOC 值为 $S_{j,s}^k$; $A-B-C$ 为最大运行区域上边界,代表电动汽车最快充电过程; $A-D-E-F$ 为最大运行区域下边界,为最慢充电过程,其中 $A-D$ 为额定功率下的放电过程, $E-F$ 为保证用户出行需求的强制充电过程。

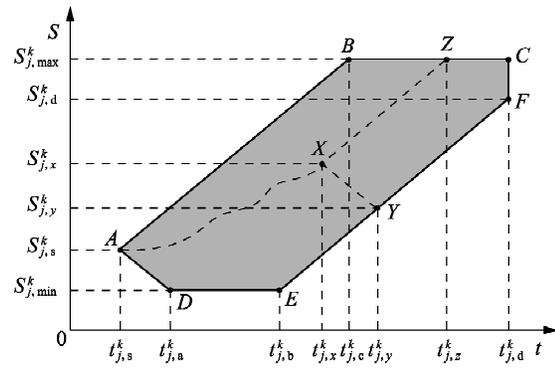


图 2 单体电动汽车储能特性

Fig.2 Energy storage characteristic of an EV

因此,如图 2 中阴影部分所示的电动汽车最大运行区域 $ABCFED$,可以看作 6 条直线 AB 、 BC 、 CF 、 AD 、 DE 、 EF 围成的可行域,考虑到电动汽车的额定充放电功率是恒定的,以 t 和 S 为变量,6 条直线的数学方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} AB: P_{j,c}^k \eta_{j,c}^k (t - t_{j,s}^k) / R_j^k - (S - S_{j,s}^k) = 0 \\ BC: S - S_{j,\max}^k = 0 \\ CF: t - t_{j,d}^k = 0 \\ AD: -P_{j,d}^k (t - t_{j,s}^k) / \eta_{j,d}^k / R_j^k - (S - S_{j,s}^k) = 0 \\ DE: S - S_{j,\min}^k = 0 \\ EF: P_{j,c}^k \eta_{j,c}^k (t - t_{j,d}^k) / R_j^k - (S - S_{j,d}^k) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_{j,c}^k$ 和 $P_{j,d}^k$ 分别为电动汽车额定充、放电功率; $\eta_{j,c}^k$ 和 $\eta_{j,d}^k$ 分别为电动汽车充、放电效率; R_j^k 为电动汽车电池容量。

考虑到电动汽车交通出行时间及出行需求的共同约束,为获取单体电动汽车的最大储能能力,图2中给出了一条电动汽车可能的充电曲线 AX ,以坐标为 $(t_{j,x}^k, S_{j,x}^k)$ 的运行点 X 为出发点,分别获取电动汽车的最快充电过程 XZ 和最快放电过程 XY ,直线 XZ 和 XY 的方程如式(2)所示。 Z 和 X 的纵坐标之差 $S_{j,z}^k - S_{j,x}^k$ 与 R_j^k 的乘积即为电动汽车充电的可用储能容量,如式(3)所示; X 和 Y 的纵坐标之差 $S_{j,x}^k - S_{j,y}^k$ 与 R_j^k 的乘积即为电动汽车放电的可用储能容量,如式(4)所示。 Z 是直线 XZ 与上边界 $A-B-C-F$ 的交点,而 Y 是直线 XY 与下边界 $A-D-E-F-C$ 的交点。

$$\begin{cases} XZ: \frac{P_{j,c}^k \eta_{j,c}^k}{R_j^k} (t - t_{j,x}^k) - (S - S_{j,x}^k) = 0 \\ XY: -\frac{P_{j,d}^k / \eta_{j,d}^k}{R_j^k} (t - t_{j,x}^k) - (S - S_{j,x}^k) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$R_{j,c}^k = (S_{j,z}^k - S_{j,x}^k) R_j^k \quad (3)$$

$$R_{j,d}^k = (S_{j,x}^k - S_{j,y}^k) R_j^k \quad (4)$$

考虑到入网后电动汽车输出功率受到其可用储能容量的约束,仍以 t 时刻电动汽车运行点 X 为例,电动汽车输出功率 $P_j^k(t)$ 的上下限约束如式(5)所示,电动汽车实时 SOC $S_j^k(t)$ 如式(6)所示。

$$\begin{cases} P_{j,\max}^k(t) = \min \left\{ P_{j,d}^k, \frac{R_{j,d}^k \eta_{j,d}^k}{t_{j,y}^k - t} \right\} \\ P_{j,\min}^k(t) = \max \left\{ -P_{j,c}^k, \frac{-R_{j,c}^k / \eta_{j,c}^k}{t_{j,z}^k - t} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

$$S_j^k(t) = S_{j,s}^k + \int_{t_{j,s}^k}^t \frac{-P_j^k(t) \eta_j^k(t)}{R_j^k(t)} dt \quad (6)$$

其中, $P_{j,\max}^k(t)$ 和 $P_{j,\min}^k(t)$ 分别为电动汽车输出功率的上、下限约束; $\eta_j^k(t)$ 为电动汽车与电网交换功率的效率,如式(7)所示。

$$\eta_j^k(t) = \begin{cases} \eta_{j,c}^k & P_j^k > 0 \\ 1/\eta_{j,d}^k & P_j^k < 0 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 电动汽车集群储能能力模型

为评估电动汽车集群的储能能力大小,根据2.1节中单体电动汽车储能能力模型,以 t 时刻电动汽车入网数量为 $n_A^k(t)$ 的集群 k 为例,定义集合 $N_A^k(t) = \{1, \dots, j-1, j, j+1, \dots, n_A^k(t)\}$ 为电动汽车下标 j 构成的集合。为获取集群储能能力,将电动汽车集群等效为电池,则该集群实时储能容量及 SOC 如式(8)所示。

$$\begin{cases} R_A^k(t) = \sum_{j=1}^{n_A^k(t)} [R_{j,c}^k(t) + R_{j,d}^k(t)] \\ S_A^k(t) = \sum_{j=1}^{n_A^k(t)} R_{j,d}^k(t) / R_A^k(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $R_A^k(t)$ 为电动汽车集群的等效电池储能容量; $S_A^k(t)$ 为集群的等效电池 SOC 值。

电动汽车集群的输出功率 $P_A^k(t)$ 如式(9)所示,其输出功率的上、下限约束如式(10)所示。

$$P_A^k(t) = \sum_{j=1}^{n_A^k(t)} P_j^k(t) \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{A,\max}^k(t) = \sum_{j=1}^{n_A^k(t)} P_{j,\max}^k(t) \\ P_{A,\min}^k(t) = \sum_{j=1}^{n_A^k(t)} P_{j,\min}^k(t) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $P_{A,\max}^k(t)$ 和 $P_{A,\min}^k(t)$ 分别为电动汽车集群输出功率的上、下限约束。

3 平抑控制策略

3.1 功率波动率

联络线用于连接负荷区域与电网,负荷区域包括常规负荷、电动汽车负荷以及风电等,联络线的功率波动直接影响电网的稳定运行。为评估联络线功率的波动性,以 T 为研究时段,本文定义了联络线功率的波动率 r_T ,如式(11)~(13)所示。

$$r_T = \frac{P_{DE,T}^{\max} - P_{DE,T}^{\min}}{P_{DE}^{\text{rated}}} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_E(t) = \sum_{k=1}^m P_A^k(t) \\ P_D(t) = P_{DE}(t) - P_E(t) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{DE,T}^{\max} = \max \{ P_{DE}(t), P_{DE}(t-\Delta t), \dots, \\ P_{DE}(t-(u_T-1)\Delta t) \} \\ P_{DE,T}^{\min} = \min \{ P_{DE}(t), P_{DE}(t-\Delta t), \dots, \\ P_{DE}(t-(u_T-1)\Delta t) \} \\ T = u_T \Delta t \end{cases} \quad (13)$$

其中, $P_{DE}(t)$ 为联络线的实时功率; P_{DE}^{rated} 为联络线的额定功率; $P_E(t)$ 为多个电动汽车集群的总输出功率; $P_D(t)$ 为联络线的实时功率与 $P_E(t)$ 的差值; Δt 为时间间隔; u_T 为 T 时段内的时间间隔数量。

在波动率 r_T 的基础上,本文定义了联络线功率的实时波动率 $r(t)$,如式(14)所示,同时,定义了实时波动率的上、下限,如式(15)所示。

$$r(t) = \frac{P_{DE}(t) - P_{DE}(t-\Delta t)}{P_{DE}^{\text{rated}}} \quad (14)$$

$$\begin{cases} r_{\min} = -r_T^{\lim}/u_T \\ r_{\max} = r_T^{\lim}/u_T \end{cases} \quad (15)$$

其中, r_T^{\lim} 为风电功率波动率 r_T 的阈值, 即波动率 r_T 满足 $0 \leq r_T \leq r_T^{\lim}$ 。

3.2 平抑控制策略

为充分利用电动汽车集群的储能能力, 以降低联络线功率波动对电网的影响, 本文在考虑电动汽车输出功率上下限约束的基础上, 提出了基于电动汽车 SOC 自适应算法的平抑控制策略。该平抑控制策略的实现过程如步骤 1—4 所示。

步骤 1: 确定多个电动汽车集群总输出功率的目标变化值 $\Delta P_{E*}(t)$ 。

(1) 计算联络线功率平抑目标值 $P_{DE*}(t)$, 该步骤中, 提出方法 1 和方法 2 来计算 $P_{DE*}(t)$ 。

方法 1: 通过以下过程 **a—c** 用来确定 $P_{DE*}(t)$ 。

a. 若 $r(t) < r_{\min}$, 则有:

$$P_{DE*}(t) = P_{DE}(t - \Delta t) + r_{\min} P_{DE}^{\text{rated}} \quad (16)$$

b. 若 $r_{\min} \leq r(t) \leq r_{\max}$, 则有:

$$P_{DE*}(t) = P_{DE}(t) \quad (17)$$

c. 若 $r(t) > r_{\max}$, 则有:

$$P_{DE*}(t) = P_{DE}(t - \Delta t) + r_{\max} P_{DE}^{\text{rated}} \quad (18)$$

方法 2: 由于电动汽车放电成本较高^[24-25], 因此在控制过程中, 应减少电动汽车放电过程。本文提出参数 $P_{A,d}^k(t)$ 来指示各电动汽车集群放电功率的大小, 如式(19)所示。因此, 修正后的联络线功率 $P_{DE}(t)$ 如式(20)所示。本方法中, 在计算 $P_{DE*}(t)$ 时, 需要用 $P_{DE'}(t)$ 取代 $P_{DE}(t)$ 来进行方法 1 中过程 **a—c** 的计算。

$$P_{A,d}^k(t) = \sum_j P_j^k(t) \quad P_j^k(t) > 0; j \in N_{A,d}^k(t) \quad (19)$$

其中, $N_{A,d}^k(t)$ 为集群 k 中处于放电状态的电动汽车下标 j 构成的集合, 满足 $N_{A,d}^k(t) \subseteq N_A^k(t)$ 。

$$P_{DE'}(t) = P_{DE}(t) - P_{A,d}^k(t) \quad (20)$$

(2) 确定多个电动汽车集群总输出功率的目标变化值 $\Delta P_{E*}(t)$ 。

在获取 $P_{DE*}(t)$ 的基础上, $\Delta P_{E*}(t)$ 的表达式如下:

$$\Delta P_{E*}(t) = P_{DE*}(t) - P_{DE}(t) \quad (21)$$

步骤 2: 确定各电动汽车集群输出功率的目标变化值 $\Delta P_{A*}^k(t)$ 。

在获取 $\Delta P_{E*}(t)$ 的基础上, 根据不同电动汽车集群储能能力的差异, 利用以下过程 **a—d** 来确定各集群输出功率的目标变化值 $\Delta P_{A*}^k(t)$ 。

a. 如果 $0 < \Delta P_{E*}(t) \leq \sum_{k=1}^m (P_{A,\max}^k(t) - P_A^k(t))$, 为保证储能容量较大的集群提供较多的目标功率, 则有:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{k=1}^m R_A^k(t) S_A^k(t) \Delta P_{A*}^k(t) \\ & \text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^m \Delta P_{A*}^k(t) = \Delta P_{E*}(t) \\ 0 \leq \Delta P_{A*}^k(t) \leq P_{A,\max}^k(t) - P_A^k(t) \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

b. 如果 $\sum_{k=1}^m (P_{A,\min}^k(t) - P_A^k(t)) \leq \Delta P_{E*}(t) < 0$, 为保证储能容量较小的集群提供较多的目标功率, 则有:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{k=1}^m R_A^k(t) (1 - S_A^k(t)) (-\Delta P_{A*}^k(t)) \\ & \text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^m \Delta P_{A*}^k(t) = \Delta P_{E*}(t) \\ P_{A,\min}^k(t) - P_A^k(t) \leq \Delta P_{A*}^k(t) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

c. 如果 $\Delta P_{E*}(t) > \sum_{k=1}^m (P_{A,\max}^k(t) - P_A^k(t))$, 集群只能响应部分目标功率, 则有:

$$\Delta P_{A*}^k(t) = \sum_{k=1}^m (P_{A,\max}^k(t) - P_A^k(t)) \quad (24)$$

d. 如果 $\Delta P_{E*}(t) < \sum_{k=1}^m (P_{A,\min}^k(t) - P_A^k(t))$, 集群只能响应部分目标功率, 则有:

$$\Delta P_{A*}^k(t) = \sum_{k=1}^m (P_{A,\min}^k(t) - P_A^k(t)) \quad (25)$$

在上述过程 **c** 和 **d** 中, 电动汽车集群无法达到输出功率的目标要求, 即无法完全平抑功率的波动, 不能平抑的部分需要由储能电池提供。

步骤 3: 利用 SOC 自适应算法确定各集群中电动汽车输出功率的目标值 $P_{j*}^k(t)$ 。

根据步骤 2 获取的每个电动汽车集群输出功率的目标变化值 $\Delta P_{A*}^k(t)$, 根据 SOC 自适应算法, 考虑到电池的容量约束, 利用式(26)和(27)确定各电动汽车输出功率的目标值 $P_{j*}^k(t)$ 。

a. 如果 $\Delta P_{A*}^k(t) > 0$, SOC 较高的电动汽车提供更多的目标功率, 则有:

$$P_{j*}^k(t) = P_j^k(t) + \frac{S_j^k(t) - S_{j,y}^k(t)}{n^k(t) \sum_{j=1}^m (S_j^k(t) - S_{j,y}^k(t))} \Delta P_{A*}^k(t) \quad (26)$$

b. 如果 $\Delta P_{A*}^k(t) < 0$, SOC 较低的电动汽车提供更多的目标功率, 则有:

$$P_{j*}^k(t) = P_j^k(t) + \frac{S_j^k(t) - S_{j,z}^k(t)}{n^k(t) \sum_{j=1}^m (S_j^k(t) - S_{j,z}^k(t))} \Delta P_{A*}^k(t) \quad (27)$$

步骤 4: 利用各电动汽车输出功率的上下限约束修正 $P_{j*}^k(t)$ 。

步骤 3 在求取 $P_{j*}^k(t)$ 的过程中, 没有考虑各电

电动汽车输出功率的上下限约束,因此,需要对步骤 3 获取的 $P_{j^*}^k(t)$ 进行修正。对于电动汽车集群 k ,其中电动汽车输出功率违反其上下限约束的,即满足 $P_{j^*}^k(t) < P_{j,\min}^k(t)$ 或者 $P_{j^*}^k(t) > P_{j,\max}^k(t)$,则将电动汽车下标 j 构成的集合定义为 $N_{A,a}^k(t)$,该集合的补集定义为 $N_{A,b}^k(t)$,则满足 $N_{A,a}^k(t) \cap N_{A,b}^k(t) = \emptyset$ 以及 $N_{A,a}^k(t) \cup N_{A,b}^k(t) = N_A^k(t)$ 。

a. 如果存在 $P_{j^*}^k(t) > P_{j,\max}^k(t)$,则修正后的 $P_{j^*}^k(t)$ 如式(28)–(30)所示。

$$P_{A,a}^k(t) = \sum_j (P_{j^*}^k(t) - P_{j,\max}^k(t)) \quad j \in N_{A,a}^k(t) \quad (28)$$

$$P_{j^*}^k(t) = P_{j,\max}^k(t) \quad j \in N_{A,a}^k(t) \quad (29)$$

$$P_{j^*}^k(t) = P_{j^*}^k(t) + \frac{S_j^k(t) - S_{j,y}^k(t)}{\sum_j (S_j^k(t) - S_{j,y}^k(t))} P_{A,a}^k(t) \quad j \in N_{A,b}^k(t) \quad (30)$$

b. 如果存在 $P_{j^*}^k(t) < P_{j,\min}^k(t)$,则修正后的 $P_{j^*}^k(t)$ 如式(31)–(33)所示。

$$P_{A,a}^k(t) = \sum_j (P_{j^*}^k(t) - P_{j,\min}^k(t)) \quad j \in N_{A,a}^k(t) \quad (31)$$

$$P_{j^*}^k(t) = P_{j,\min}^k(t) \quad j \in N_{A,a}^k(t) \quad (32)$$

$$P_{j^*}^k(t) = P_{j^*}^k(t) + \frac{S_j^k(t) - S_{j,z}^k(t)}{\sum_j (S_j^k(t) - S_{j,z}^k(t))} P_{A,a}^k(t) \quad j \in N_{A,b}^k(t) \quad (33)$$

重新计算集合 $N_{A,a}^k(t)$,如果 $N_{A,a}^k(t)$ 仍然不为空集,则再次进行步骤 4 的计算过程,直到获取的 $N_{A,a}^k(t)$ 为空集为止。

根据步骤 1–4 获取的 $P_{j^*}^k(t)$,计算平抑后多个电动汽车集群的总输出功率 $P_{E,r}(t)$,如式(34)所示;在此基础上,计算平抑后的联络线实际功率 $P_{DE,r}(t)$,如式(35)所示。

$$P_{E,r}(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{n^k(t)} P_{j^*}^k(t) \quad (34)$$

$$P_{DE,r}(t) = P_D(t) + P_{E,r}(t) \quad (35)$$

4 算例分析

4.1 算例场景

结合天津配网特点进行说明,目前,可再生能源经由独立的馈线接入电网,示意的用电区域如附图 A1 所示。用电区域中,风电经由馈线 1 接入电网,而 3 个负荷区域(包括居民区、商业区、居民商业混合区)经由馈线 2–4 接入电网,每个负荷区域包括常规负荷和电动汽车负荷,风电可以看作功率为负值的负荷,风电及 3 个负荷区域的常规负荷曲线如图 3 所示(功率为标么值)。整个用电区域经由联络线接入电网,由于风电功率具有强波动性,因此造

成联络线的功率波动,进而影响电网的稳定运行。

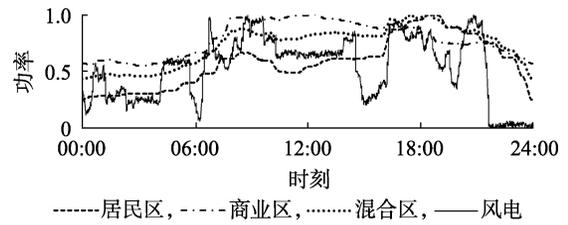


图 3 风电及常规负荷曲线

Fig.3 Profiles of wind power and conventional load

联络线用于连接用电区域与电网,其功率波动直接影响电网的稳定,因此,本算例以联络线功率为研究对象,利用 3 个负荷区域中接入的电动汽车来平抑联络线的功率波动,以降低风电接入所带来的功率波动对电网的影响。在各负荷区域中,假设电动汽车采用分散接入的方式,且本研究主要关注电动汽车的有功调度及控制,假设无功补偿满足电压要求,即各区域在风电入网、电动汽车接入及调控过程中不存在电压越限的问题,以此为背景展开研究。

算例中,风电的装机容量为 3 MW,居民区、商业区和混合区的最大负荷分别为 2 MW、2 MW、3 MW,各区域中接入的电动汽车看作一个集群,同时考虑 3 种不同类型的电动汽车:HBW (Home-Based-Work)、HBO (Home-Based-Other)、NHB (Non-Home-Based)^[26],上述 3 类车辆在 3 个负荷区域中的分布如表 1 所示^[18]。

表 1 不同类型电动汽车在 3 个负荷区域中的分布

Table 1 Distribution of different types of EVs in three load regions

类型	数量		
	居民区(集群 1)	商业区(集群 2)	混合区(集群 3)
HBW	99	0	82
HBO	51	0	43
NHB	0	150	100
总计	150	150	225

为了获取电动汽车集群的储能能力,需要模拟电动汽车接入电网的充电过程,电动汽车接入和离开电网时间($t_{j,s}^k$ 和 $t_{j,d}^k$)的概率分布如附录图 A2 所示^[19],其他电动汽车参数,包括电池容量(R_j^k)、接入电网时的 SOC($S_{j,s}^k$)、用户出行需求 SOC($S_{j,s}^k$),已在文献[27]中进行了详细介绍。本研究中,电动汽车所采用的额定充放电功率($P_{j,c}^k$ 和 $P_{j,d}^k$)均为 6.6 kW,其充放电效率($\eta_{j,c}^k$ 和 $\eta_{j,d}^k$)均为 0.92^[28]。考虑到放电深度对电池损耗的影响^[29],能够对电动汽车进行充放电控制的 SOC 范围为[0.4, 1.0],即有 $S_{j,\min}^k = 0.4$ 和 $S_{j,\max}^k = 1.0$ ^[28]。假设电动汽车在接入电网后立刻开始充电,接入电网时,如果其 $S_{j,s}^k$ 低于 $S_{j,\min}^k$,则需要对电动汽车进行充电,直到其 SOC 高于 $S_{j,\min}^k$,才能对电动汽车的输出功率进行控制。

本文中,假设联络线功率波动率的阈值为 15 min 内不高于 10%。而针对实际的电网,波动率的阈值是一个可调整的数值,可根据实际电网中发电机爬坡率、入网要求等,调整波动率的阈值。

4.2 电动汽车储能能力

为评估电动汽车集群的储能能力,根据式(8)~(10),在集群不参与平抑控制的情况下,3个集群的储能容量及 SOC 值如附录图 A3 所示,3个集群的输出功率及其上、下限如图 4 所示。

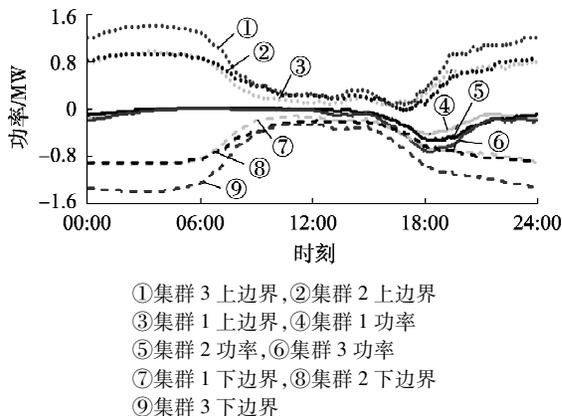


图 4 电动汽车集群的输出功率及其上下限

Fig.4 Power outputs and power output limitations of EV aggregators

由图 A3 和图 4 可以看出,由于各负荷区域中电动汽车类型不同,出行时段的分布规律不同,3个电动汽车集群的储能容量、输出功率及其上下限约束在时间分布规律上存在差异性。由图 A2 可知,在白天 08:00—16:00 的时间段内,3 种类型的电动汽车处于外出状态的概率较高,HBW 和 HBO 型车辆尤为明显,因此该时段各电动汽车集群响应能力较小;因此,虽然集群 1 和集群 2 在一天中接入电动汽车数量相同,但该时段内集群 1 的响应能力明显低于集群 2,而其他时段差异性较小;集群 2 在一天中接入的电动汽车数量少于集群 3,但该时段内集群 2 的响应能力与集群 3 相差较少,而其他时段差异较大。由于在 16:00—21:00 时段电动汽车入网的概率较大,各电动汽车集群的充电负荷峰值出现在该时段内,并随着电动汽车的不断接入电网,充电负荷不断增加,其有功响应能力增大,而由于刚接入的电动汽车 SOC 较低,集群的等效 SOC 较低;00:00—06:00 时段内,大部分电动汽车充电完成,电动汽车处于空闲状态,此时储能容量和有功响应能力均较大;而在 06:00—08:00 时段内,随着电动汽车逐渐离开充电地点出行,其储能容量及响应能力均大幅减小。

4.3 平抑控制效果

在 3.2 节的步骤 1 中,提出了 2 种方法,先以方法 1 为例,联络线功率的平抑控制效果如图 5 所示,平抑控制前后的波动率如图 6 所示。由图可以看

出,电动汽车集群通过调整其输出功率,从而实现联络线功率的平抑控制,平抑后的功率波动性明显降低,实际平抑功率能够较好地追踪目标功率;而图 5(b)中 14:00—17:00 时段,实际平抑功率不能完全追踪目标功率,此时波动率明显超过所设的阈值 10%。为说明产生这一现象的原因,图 7 给出了 3 个集群在平抑控制前后总输出功率及其上下边界的对比图,可以看出,在 14:00—17:00 时段内,响应能力有明显的下降,集群总输出功率受到其上下限的约束,造成实际平抑功率不能完全追踪目标功率。

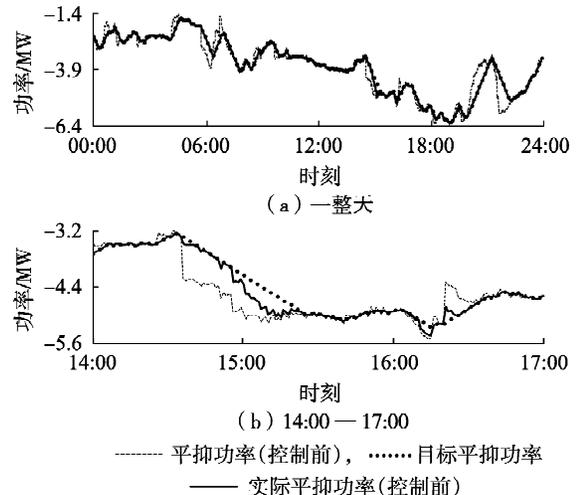


图 5 联络线功率平抑控制效果(方法 1)

Fig.5 Control effect of tie-line power smoothing (Method 1)

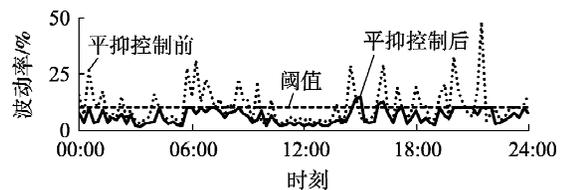


图 6 平抑前后波动率对比(方法 1)

Fig.6 Comparison of power fluctuation rate without and with smoothing control (Method 1)

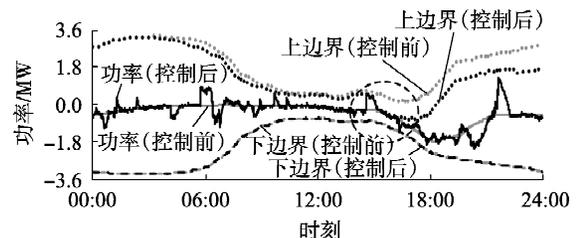


图 7 电动汽车集群总输出功率(方法 1)

Fig.7 Total power output of EV aggregators (Method 1)

由图 5(b)可知,联络线的功率波动在 14:00—17:00 时段不能完全由电动汽车来平抑,不能平抑的部分需要由电池储能来实现,考虑电池储能后,联络线功率的平抑控制效果如附录图 A4 所示。电池储能作为后备资源,实际平抑功率能够完全追踪到目标功率,保证平抑后的功率波动率能够满足阈值要求。

以集群 1 为例,图 8 给出了集群 1 中各入网后的电动汽车在参与平抑控制后的 SOC 变化曲线。可以看出,电动汽车的 SOC 在高于 0.4 的时候,才会参与平抑控制;而电动汽车在离开电网前,强制充电过程会保证 SOC 满足用户出行需求;以图中椭圆标记的区域为例,由于 SOC 曲线斜率与电动汽车输出功率成正比,在平抑控制过程中,针对一个正值的功率波动,根据 SOC 自适应算法,集群中 SOC 较低的电动汽车将提供更多的功率变化;而针对一个负值的功率波动,根据 SOC 自适应算法,集群中 SOC 较高的电动汽车将提供更多的功率变化。该方法有效利用了基于电力电子装置的充电桩对电动汽车入网过程中有功功率的连续调节能力。

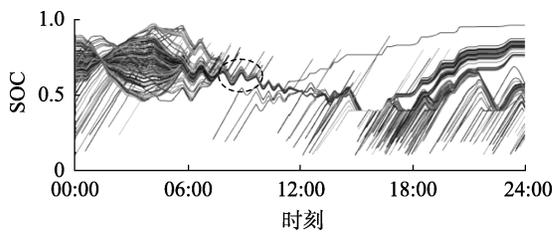


图 8 集群 1 中电动汽车 SOC 变化(方法 1)

Fig.8 SOC variations of EVs in Aggregator 1(Method 1)

为比较步骤 1 中方法 1 和方法 2 对平抑控制效果的差异性,2 种方法的平抑控制效果如图 9 和图 10 所示。可以看出,采用方法 2,实际平抑功率能够更好地追踪目标平抑功率,能够更有效地降低联络线的功率波动率;其主要原因是由于电动汽车出行前需要满足用户需求,进入强制充电过程的电动汽车无响应能力,造成电动汽车集群响应能力下降,如图 7 中标记的时段所示,而采用方法 2 后,由于电动汽车放电过程受到一定程度的抑制,降低了电动汽车进入强制充电过程的概率,从而提高了电动汽车

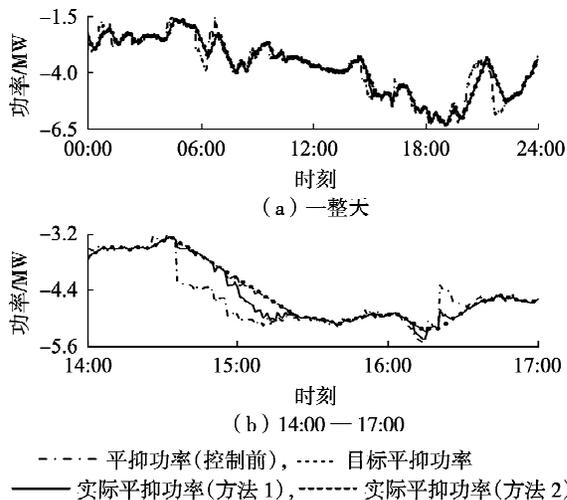


图 9 方法 1 和方法 2 的联络线功率平抑控制效果

Fig.9 Control effect of tie-line power smoothing with Method 1 and Method 2

在该时段的响应能力。通过对比方法 1 和方法 2 易知,合理的控制策略能够更为有效地利用电动汽车集群响应能力的时间分布特性。

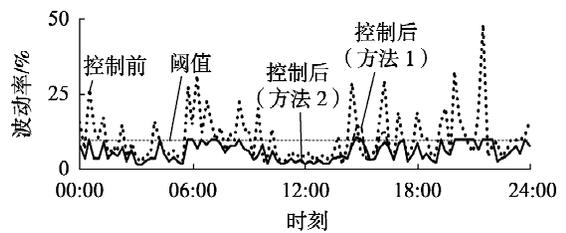


图 10 平抑前后波动率对比(方法 1 与方法 2)

Fig.10 Comparison of power fluctuation rate without and with smoothing control(Method 1 and Method 2)

为了对比分析方法 1 和方法 2 的电动汽车集群总放电功率的差异性,附录中图 A5 给出了各时刻电动汽车放电功率的大小,图 11 则给出了不同方法下电动汽车集群的总放电量。可以看出,采用方法 2 能够有效减少电动汽车的放电过程。

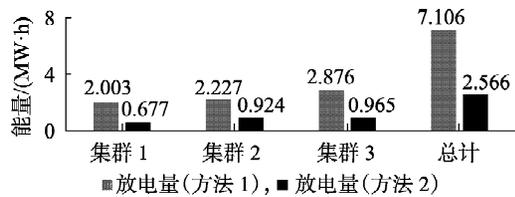


图 11 电动汽车集群总放电量(方法 1 与方法 2)

Fig.11 Discharged energy of EV aggregators (Method 1 and Method 2)

为对比分析无平抑控制策略、基于方法 1 的平抑控制策略、基于方法 2 的平抑控制策略这 3 种情况,为达到平抑的目标要求,表 2 给出了 3 种情况下对电池储能系统的参数要求,可以看出,有效利用电动汽车的储能能力,能够在保证对风电消纳吸收的基础上,减少风电接入对电池储能系统的配置要求,而方法 2 更为有效地利用了电动汽车的储能能力。

表 2 电池储能系统的参数要求

Table 2 Required parameters for battery energy storage system

电池参数	无平抑控制策略	平抑控制(方法 1)	平抑控制(方法 2)
电池容量/(MW·h)	0.612	0.161	0.017
电池功率/MW	1.763	0.500	0.339

5 结论

本文提出了考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略,利用算例验证了所提出的电动汽车储能能力模型和平抑控制策略的有效性,具体研究结论如下:

a. 采用本文提出的平抑控制策略,能够利用电动汽车的储能能力,有效降低联络线的功率波动,降低风电接入对电网的影响;

b. 本文所提出的单体电动汽车精细化储能模型,能够结合并网时段有效评估电动汽车在不同 SOC 下的储能容量,同时考虑了储能容量对电动汽车有功功率的约束,使电动汽车集群储能模型更加精确;

c. 基于 SOC 自适应算法的平抑控制策略,能够根据自身 SOC 水平确定各电动汽车的输出功率,有效利用了电动汽车输出功率的连续调节能力;

d. 通过对比方法 1 和方法 2,方法 2 能够有效减少电动汽车的放电过程,降低了电动汽车在控制过程中进入强制充电过程的可能性,在一定程度上提升了电动汽车的响应能力,具有更好的平抑效果;

e. 利用电动汽车的储能能力,电池储能系统仅作为后备资源,有效降低了风电并网对电池储能系统配置参数的要求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] World Wind Energy Association. Wind energy around the world [R]. [2017-07-11]. http://www.wwindea.org/wwea_bulletin_issue_1_2016/.
- [2] PARSON B, MILLIGAN M, ZAVADIL B, et al. Grid impacts of wind power; a summary of recent studies in the united states [J]. Wind Energy, 2004, 7(2) : 87-108.
- [3] 丰颖, 负志皓, 周琼, 等. 考虑风电接入的在线风险评估和预防控制 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2) : 61-68.
FENG Ying, YUN Zhihao, ZHOU Qiong, et al. Online risk assessment and preventive control considering wind-power integration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2) : 61-68.
- [4] 杨建, 张利, 王明强, 等. 计及出力水平影响与自相关性的风电预测误差模拟方法 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9) : 96-102.
YANG Jian, ZHANG Li, WANG Mingqiang, et al. Wind-power forecasting error simulation considering output level and self-correlation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9) : 96-102.
- [5] 李本新, 韩学山, 刘国静, 等. 风电与储能系统互补下的火电机组合 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7) : 31-37.
LI Benxin, HAN Xueshan, LIU Guojing, et al. Thermal unit commitment with complementary wind power and energy storage system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7) : 31-37.
- [6] LUO G, LI Y, TANG W, et al. Wind curtailment of China's wind power operation: evolution, causes and solutions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1190-1201.
- [7] ZHANG Y, TANG N, NIU Y, et al. Wind energy rejection in China: current status, reasons and perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 66: 322-344.
- [8] 雷筵, 欧阳曾恺, 李征, 等. 平抑风能波动的储能电池 SOC 与滤波协调控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7) : 126-131.
LEI Ting, OUYANG Zengkai, LI Zheng, et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7) : 126-131.
- [9] 颜伟, 吕冰, 赵霞, 等. 含高渗透率风电配网中电池储能系统和开关的协调规划 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3) : 6-11.
YAN Wei, LÜ Bing, ZHAO Xia, et al. Coordinated allocation of BESS and controllable switches in distribution system with high penetration of wind power [J]. Electric Power Automation Equip-
- ment, 2015, 35(3) : 6-11.
- [10] 熊倩. 含飞轮储能永磁直驱风力发电系统功率平滑控制策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
XIONG Qian. A thesis submitted to chongqing university in partial fulfillment of the requirement for the degree of master of engineering [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [11] 刘世林, 文劲宇, 高文根, 等. 基于飞轮储能的并网风电功率综合调控策略 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12) : 34-39.
LIU Shilin, WEN Jinyu, GAO Wengen, et al. FESS-based comprehensive control of grid-connecting wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12) : 34-39.
- [12] WEE K, CHOI S, VILATHGAMUWA D. Design of a least-cost battery-supercapacitor energy storage system for realizing dispatchable wind power [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3) : 786-796.
- [13] BAI L, LI F, HU Q, et al. Application of battery-supercapacitor energy storage system for smoothing wind power output: an optimal coordinated control strategy [C] // Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston, MA, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [14] AWAD A S A, FULLER J D, EL-FOULY T H M, et al. Impact of energy storage systems on electricity market equilibrium [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3) : 875-885.
- [15] MENG J, MU Y, JIA H, et al. Dynamic frequency response from electric vehicles considering travelling behavior in the Great Britain power system [J]. Applied Energy, 2016, 162: 966-979.
- [16] WANG M, ZENG P, MU Y, et al. An efficient power plant model of electric vehicles considering the travel behaviors of EV users [C] // Proceedings of International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 3322-3327.
- [17] 王明深. 含大规模电动汽车的广域源荷互动优化调控技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
WANG Mingshen. Research on optimal regulation for the interaction of wide area source and load with large-scale electric vehicles [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [18] CHENG L, CHANG Y, HUANG R. Mitigating voltage problem in distribution system with distributed solar generation using electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2) : 1475-1484.
- [19] MU Y, WU J, JENKINS N, et al. A spatial-temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles [J]. Applied Energy, 2014, 114: 456-465.
- [20] IZADKHAHAST S, GARCIA-GONZALEZ P, FRÍAS P. An aggregate model of plug-in electric vehicles for primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3) : 1475-1482.
- [21] MU Y, WU J, EKANAYAKE J, et al. Primary frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2) : 1142-1150.
- [22] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 含新能源接入的电动汽车有序充电分层控制策略 [J]. 电网技术, 2016, 40(12) : 3689-3695.
ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Electric vehicle coordinated charging hierarchical control strategy considering renewable energy generation integration [J]. Power System Technology, 2016, 40(12) : 3689-3695.
- [23] 侯建朝, 胡群丰, 谭忠富, 等. 计及需求响应的风电-电动汽车协同调度多目标优化模型 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7) : 22-27.
HOU Jianchao, HU Qunfeng, TAN Zhongfu, et al. Multi-objective optimization model of collaborative WP-EV dispatch considering de-

- mand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7):22-27.
- [24] 王明深,于汀,穆云飞,等. 电动汽车能效电厂价格响应模[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(12): 1320-1329.
WANG Mingshen, YU Ting, MU Yunfei, et al. A price response model for efficient power plant of electric vehicles[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(12): 1320-1329.
- [25] 王明深,于汀,穆云飞,等. 考虑用户参与度的电动汽车能效电厂模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11):201-210.
WANG Mingshen, YU Ting, MU Yunfei, et al. Model of E-EPP considering participation factor of EV users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11):201-210.
- [26] WANG M, MU Y, JIA H, et al. A preventive control strategy for static voltage stability based on an efficient power plant model of electric vehicles[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1):103-113.
- [27] WANG M, MU Y, JIA H, et al. Active power regulation for large-scale wind farms through an efficient power plant model of electric vehicles[J]. Applied Energy, 2017, 185, 1673-1683.
- [28] ZHANG H, HU Z, XU Z, et al. Evaluation of achievable vehicle-to-grid capacity using aggregate PEV model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1):784-794.
- [29] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. A practical scheme to involve degradation cost of lithium-ion batteries in vehicle-to-grid applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4):1730-1738.

作者简介:



王明深

王明深(1990—),男,河北沧州人,博士研究生,主要研究方向为电动汽车入网与优化调控、电力需求侧资源响应控制技术(**E-mail**: wangmingshen@tju.edu.cn);

穆云飞(1984—),男,河北石家庄人,副教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力需求侧响应、电力系统安全稳定性及新能源应用等(**E-mail**: yunfeimu@tju.edu.cn);

贾宏杰(1973—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统稳定性、综合能源系统等(**E-mail**: hjjia@tju.edu.cn)。

Smoothing control strategy considering energy storage capability of electric vehicle aggregators and wind power integration

WANG Mingshen¹, MU Yunfei¹, JIA Hongjie¹, QI Yan², YU Jiancheng², QI Wenjin³

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300384, China;

3. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: To promote the penetration of wind power, a smoothing control strategy is developed considering the energy storage capability of EV (Electric Vehicle) aggregators and the wind power integration. Firstly, based on the energy storage model of an individual EV considering the impact of energy storage capacity on active power limitations of the EVs under different SOC (State Of Charge) levels, the energy storage capability evaluation model for EV aggregator is established. Then a smoothing control strategy for the tie-line power fluctuations is proposed to realize the coordinated control of different EV aggregators with different energy storage capability. Based on the proposed SOC-adaptive algorithm and the power output limitations of EVs, the power outputs of EVs with different SOC levels are determined respectively, which helps to fully utilize the continuous power adjustment of the plug-in EVs. Meanwhile, two different control methods for EVs' power outputs are developed in the smoothing control strategy, and the differences between them in decreasing discharging process are studied. At last, the energy storage capacity of all EV aggregators is used to smooth the tie-line power fluctuations in the case studies, and the simulative results validate the effectiveness of the energy storage capability evaluation model for EV aggregator and the proposed smoothing control strategy.

Key words: electric vehicles; aggregator; wind power; energy storage capability; smoothing control; SOC; SOC-adaptive algorithm

附录

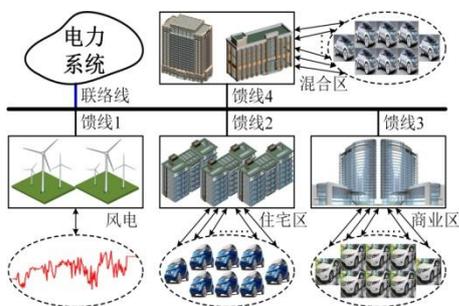


图 A1 算例场景示意图

Fig.A1 Diagram of case scenario

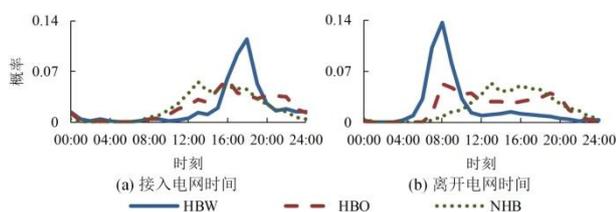


图 A2 电动汽车接入及离开电网时间概率分布

Fig.A2 Probability distribution of plug-in and plug-out time of EVs

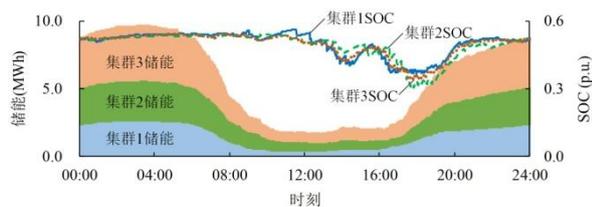


图 A3 电动汽车集群的储能容量及 SOC 值

Fig.A3 Energy storage capacity and SOC of EV aggregators

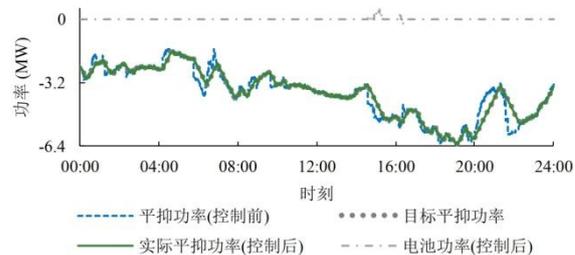


图 A4 考虑电池储能的联络线功率平抑控制效果(方法 1)

Fig.A4 Control effect of tie-line power smoothing with battery storage(Method 1)

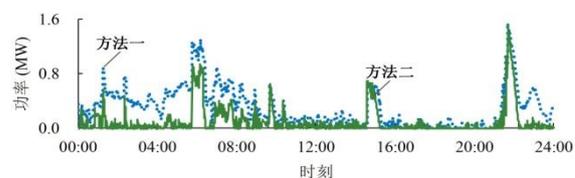


图 A5 电动汽车集群总放电功率(方法 1 与方法 2)

Fig.A5 Discharging power of EV aggregators(Method 1 and Method 2)