

# 面向大规模电动汽车集群的建模与控制方法

安海云<sup>1</sup>, 王明深<sup>1</sup>, 王伟亮<sup>2</sup>, 董晓红<sup>3</sup>, 孟健<sup>4</sup>, 黄成<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211100;

3. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130;

4. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

**摘要:** 可再生能源的广泛接入对系统源荷平衡产生了深刻的影响, 大规模接入电网的电动汽车(EV)集群具有快速可观的可调节潜力, 能够为系统源荷平衡提供功率调节支撑。已有的大规模EV集群建模和控制方法需要模拟各独立EV的响应特性以及开发独立的控制信号, 模型复杂度高且计算量大; 同时大量的控制信号会加大实时通信压力, 对通信设施要求高。为了解决上述问题, 提出了一种面向大规模EV集群的简化建模和控制方法。首先, 充分分析了单辆EV的响应特性, 提出了3种接入状态和4种响应方式; 然后, 利用有限状态子区间描述大规模EV集群的状态分布, 评估EV集群的输出功率和可调节容量, 通过改变EV在子区间内的状态分布, 实现4种响应方式; 最后, 设计了由2个概率值构成的控制信号, 降低了控制方法的复杂度, 且控制所有EV接收相同的概率信号降低了对通信的要求。算例仿真结果验证了所提建模和控制方法的有效性。

**关键词:** 电动汽车集群; 建模; 控制方法; 概率控制; 响应特性

**中图分类号:** U 469.72

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202111004

## 0 引言

近年来, 随着以风电、光伏为代表的可再生能源规模化发展, 风、光输出功率所具有的随机性和间歇性特点给可再生能源并网带来了严重的挑战, 由此引发的源荷不平衡问题愈发突出<sup>[1]</sup>。针对上述问题, 一种有效的解决方法是配置一定规模的储能资源, 如电池储能、超级电容储能等<sup>[2]</sup>, 然而目前储能设施的投资和运行成本较高<sup>[3]</sup>, 大规模配置储能资源将会降低风电接入电网的经济性。

基于交通低碳化的发展要求, 电动汽车EV (Electric Vehicle) 以其节能减排的优势, 成为汽车领域发展的新形式。EV以电池储能为动力, 出行结束后需要接入电网充电, 大规模EV的充电负荷对电网的运行产生了深刻的影响<sup>[4]</sup>。由于入网EV的充电功率能够在时间尺度上进行改变, 甚至能向电网反馈电能, 大规模EV能够为电网提供有效的支撑<sup>[5]</sup>。

目前, 已有学者针对大规模EV集群的建模方法进行了一系列的研究: 文献[6]根据交通数据的分布规律, 利用蒙特卡洛抽样算法建立了EV集群的统计学模型, 以评估EV集群的充电负荷; 文献[7]利用出

行链和“原点-终点”矩阵模拟每辆EV的出行和充电过程, 进而构建了考虑用户心理需求的EV集群负荷预测模型; 文献[8]模拟用户路径选择对EV接入电网行为的影响, 建立了EV集群模型, 进而评估了EV充电负荷的时空分布特征, 分析了EV动态接入对电网的影响; 文献[9]充分分析了用户对充电需求的差异性, 在保证用户用能需求的基础上, 建立了EV集群模型; 文献[10]研究了充电和放电2种功率交换方式, 建立了EV集群模型来获取集群在不同时刻的可调节容量。已有的EV集群建模方法需要充分分析EV的各种影响因素, 从而模拟各EV的入网过程, 最终通过求和方式获取EV集群的响应能力。然而, 对于大规模EV集群而言, 已有建模方法存在模型复杂度高以及计算量大的问题。

目前, 也已有学者针对大规模EV集群的控制方法进行了研究: 文献[11]为了提高光伏在电网中的渗透率, 提出了用于限制光伏功率波动的EV集群有序充放电方法; 文献[12]建立了利用EV集群跟踪光伏功率的凸优化模型, 提出了EV集群参与平抑光伏功率波动的实时调度方法; 文献[13]考虑EV入网后荷电状态(SOC)的差异性, 提出了一种功率分配方法用于确定调频过程中各EV的目标控制功率; 文献[14]提出了针对EV集群控制中心的不确定性控制方法, 要求将调频功率分配给集群内的各辆EV, 并通过实时修正保证用户的出行需求。已有研究要求集群控制中心能够考虑EV运行状态的差异性, 在集群控制过程中能够针对不同状态的EV产生不同的控制信号。然而, 对于大规模EV集群而言, 已有控

**收稿日期:** 2021-02-02; **修回日期:** 2021-09-14

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(52107099); 中国博士后科学基金面上资助项目(2021M690810)

Project supported by the Youth Science Foundation of National Natural Science Foundation of China(52107099) and the General Program of China Postdoctoral Science Foundation(2021M690810)

制方法需要产生大量独立的控制信号,并需通过独立的通信通道将控制信号传输给各 EV,会造成计算量和实时通信压力均较大以及对通信设施质量要求高的问题。

为了解决上述问题,本文针对大规模 EV 集群,提出了一种简化建模方法,利用有限的状态子区间描述 EV 集群的状态分布,评估 EV 集群的可调节容量,有效地降低了 EV 集群建模方法的复杂度;同时,基于简化的 EV 模型,提出了概率控制信号,用 2 个概率值取代原有的大规模独立控制信号,降低了控制方法的复杂度、控制实现过程中的通信压力以及对通信设施的质量要求。

## 1 单辆 EV 模型

EV 出行结束后需要接入电网充电,按照 EV 与电网交换功率的方向,本文定义了 3 种 EV 接入状态:①充电状态 CS(Charging State),即 EV 以额定有功功率从电网获取电能;②空闲状态 IS(Idle State),即 EV 与电网之间没有有功功率交换;③放电状态 DS(Discharging State),即 EV 以额定有功功率向电网反馈电能。结合上述 3 种 EV 接入状态,EV 入网后的状态模型可表示为:

$$\dot{s}_i(t) = \begin{cases} \frac{p_{i,cs}\eta_{i,cs}}{q_i} & \text{CS} \\ 0 & \text{IS} \\ -\frac{p_{i,ds}}{\eta_{i,ds}q_i} & \text{DS} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{s}_i(t)$ 为  $t$  时刻第  $i$  辆 EV 电池 SOC  $s_i(t)$  的变化率; $q_i$  为第  $i$  辆 EV 电池的容量; $p_{i,cs}$ 、 $p_{i,ds}$  分别为第  $i$  辆 EV 的额定充电、放电功率; $\eta_{i,cs}$ 、 $\eta_{i,ds}$  分别为第  $i$  辆 EV 的充电、放电效率。

基于 3 种 EV 接入状态,本文定义了 4 种 EV 响应方式(即从一种接入状态切换到另一种接入状态):①CS→IS,②IS→CS,③IS→DS,④DS→IS。

EV 入网后的运行约束如图 1 所示。图中, $t_{i,sa}$ 、 $t_{i,fe}$  分别为第  $i$  辆 EV 接入、离开电网的时刻; $s_{i,min}$ 、 $s_{i,max}$  分别为第  $i$  辆 EV 所允许的 SOC 最小值、最大值; $s_{i,sa}$ 、 $s_{i,de}$  分别为第  $i$  辆 EV 的入网初始 SOC、出行需求 SOC;阴影区域为受出行时间和用能需求约束的运行区域; $A-B-C$  为运行区域上边界,表示 EV 接入电网后立即以额定功率充电( $A-B$  段),直到 SOC 达到  $s_{i,max}$  并保持到离开电网时刻( $B-C$  段); $A-D-E-F$  为运行区域下边界,表示 EV 接入电网后立即以额定功率放电( $A-D$  段),直到 SOC 达到  $s_{i,min}$  并保持到强制充电时刻( $D-E$  段),离开电网前 EV 进入强制充电过程以保证离开电网时电池 SOC 达到  $s_{i,de}$  ( $E-F$  段)。

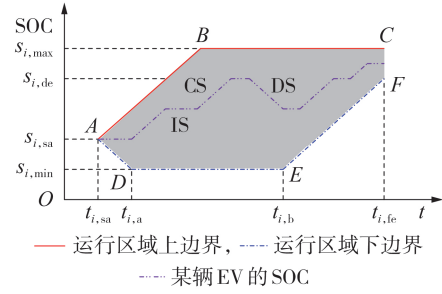


图 1 EV 入网后的运行约束

Fig.1 Operation constraint of EV after grid-connection

## 2 大规模 EV 集群模型

定义  $t$  时刻 EV 集群内 SOC 为  $s$  且处于 CS 的 EV 数量为  $X_{cs}(s, t)$ , 类比液体流量,将 EV 看作大小均匀的颗粒,将  $[s_{min}, s_{max}]$  看作管道长度 ( $s_{max}$ 、 $s_{min}$  分别为 EV 电池 SOC 的上、下限),  $X_{cs}(s, t)$  即为  $t$  时刻位于截面  $s$  上的 EV 颗粒数量。随着时间变化,可以看作 EV 颗粒在管道中流动,流速即为其 SOC 的平均变化速度,用  $\dot{s}_{cs}$  表示。定义  $t$  时刻穿过截面  $s$  的 EV 流量为  $F_{cs}(s, t)$ , 其为关于变量  $s$  与  $t$  的函数,则  $F_{cs}(s, t)$  与  $X_{cs}(s, t)$  之间的关系可表示为:

$$F_{cs}(s, t) = X_{cs}(s, t) \dot{s}_{cs}(t) \quad (2)$$

式中: $\dot{s}_{cs}(t)$  为  $t$  时刻 EV 集群内处于 CS 的 EV 的 SOC 平均变化速度。

基于式(1),  $\dot{s}_{cs}(t)$  的计算公式为:

$$\dot{s}_{cs}(t) = \frac{p_{cs}\eta_{cs}}{q} \quad (3)$$

$$p_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ev}} p_{i,cs}}{N_{ev}}, \quad \eta_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ev}} \eta_{i,cs}}{N_{ev}}, \quad q = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ev}} q_i}{N_{ev}} \quad (4)$$

式中: $p_{cs}$ 、 $\eta_{cs}$ 、 $q$  分别为 EV 集群的平均额定充电功率、充电效率、电池容量; $N_{ev}$  为 EV 集群内的 EV 数量。

基于式(3),对式(2)进行进一步推导可得:

$$F_{cs}(s, t) = X_{cs}(s, t) \frac{p_{cs}\eta_{cs}}{q} \quad (5)$$

无限小 SOC 区间内 EV 流量的变化情况如图 2 所示。对于无限小的 SOC 区间  $[s, s+ds]$ , 该区间内的 EV 颗粒数量为  $X_{cs}(s, t)$ ,  $X_{cs}(s, t)$  对  $t$  的偏导数即为

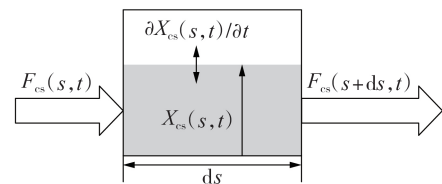


图 2 无限小 SOC 区间内 EV 流量的变化情况

Fig.2 Change of EV flow within an infinitesimal SOC interval

该区间内EV流量的变化率,结合式(2),可得进入和离开该区间的EV流量差值与区间长度的比值 $\partial X_{cs}(s,t)/\partial t$ ,如式(6)所示。

$$\frac{\partial X_{cs}(s,t)}{\partial t} = \lim_{ds \rightarrow 0} \frac{F_{cs}(s,t) - F_{cs}(s+ds,t)}{ds} = -\frac{\partial F_{cs}(s,t)}{\partial s} = -a_{cs} \frac{\partial X_{cs}(s,t)}{\partial s} \quad (6)$$

$$a_{cs} = \frac{p_{cs} \eta_{cs}}{q}$$

定义 $t$ 时刻EV集群内SOC为 $s$ 且处于IS的EV数量为 $X_{is}(s,t)$ , $X_{is}(s,t)$ 为关于变量 $s$ 与 $t$ 的函数,由于处于IS的EV的SOC不随着时间 $t$ 而发生变化,则 $X_{is}(s,t)$ 随时间 $t$ 的变化率 $\partial X_{is}(s,t)/\partial t$ 如式(7)所示。

$$\frac{\partial X_{is}(s,t)}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

定义 $t$ 时刻EV集群内SOC为 $s$ 且处于DS的EV数量为 $X_{ds}(s,t)$ , $X_{ds}(s,t)$ 为关于变量 $s$ 与 $t$ 的函数, $X_{ds}(s,t)$ 随时间 $t$ 的变化率 $\partial X_{ds}(s,t)/\partial t$ 如式(8)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial X_{ds}(s,t)}{\partial t} = -a_{ds} \frac{\partial X_{ds}(s,t)}{\partial s} \\ a_{ds} = -\frac{p_{ds}}{\eta_{ds} q} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$p_{ds} = \frac{1}{N_{ev}} \sum_{i=1}^{N_{ev}} p_{i,ds}, \quad \eta_{ds} = \frac{1}{N_{ev}} \sum_{i=1}^{N_{ev}} \eta_{i,ds} \quad (9)$$

式中: $p_{ds}$ 、 $\eta_{ds}$ 分别为EV集群的平均额定放电功率、放电效率。

EV集群的SOC区间和流量变化情况如图3所示。横向将EV的SOC变化范围 $[s_{min}, s_{max}]$ 离散化为 $N(N \ll N_{ev})$ 个状态子区间,每个状态子区间的长度为 $\Delta s$ ,纵向考虑EV的CS、IS、DS这3种接入状态,集群内的各辆EV可以根据当前时刻的接入状态和SOC,找到其所在的状态子区间,最终可用 $3N$ 个状态子区间描述集群内EV的状态分布以及在相邻子区间之间EV的流量变化和方向,如图中箭头所示。图3中, $X_1(t) - X_N(t)$ 、 $X_{N+1}(t) - X_{2N}(t)$ 、 $X_{2N+1}(t) - X_{3N}(t)$ 分别为相应子区间内处于CS、IS、DS的EV数

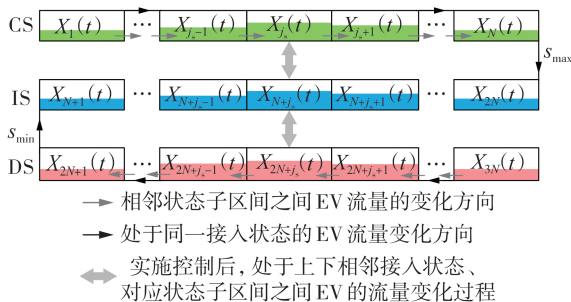


图3 EV集群的SOC区间和流量变化情况  
Fig.3 Change of SOC interval and flow of EV clusters

量。设整数变量 $j \in \{1, 2, \dots, 3N\}$ 为状态子区间编号,则集群内处于状态子区间 $j$ 的EV数量 $X_j(t)$ 可表示为:

$$X_j(t) = N_{j,EV}(t) \quad (10)$$

式中: $N_{j,EV}(t)$ 为 $t$ 时刻集群内EV接入状态和SOC处于状态子区间 $j$ 的EV数量。

结合式(6)~(8),可以用式(11)描述集群内EV在各状态子区间之间的流量变化。

$$\dot{X}_j(t) = \begin{cases} -\alpha_{cs} X_j(t) & j=1 \\ -\alpha_{cs} (X_j(t) - X_{j-1}(t)) & j=2, 3, \dots, N \\ 0 & j=N+1, N+2, \dots, 2N \\ -\alpha_{ds} (X_{j+1}(t) - X_j(t)) & j=2N+1, 2N+2, \dots, 3N-1 \\ \alpha_{ds} X_j(t) & j=3N \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\dot{X}_j(t)$ 为处于状态子区间 $j$ 的EV数量 $X_j(t)$ 的变化率; $\alpha_{cs} = a_{cs}/\Delta s$ ; $\alpha_{ds} = a_{ds}/\Delta s$ 。

式(11)的矩阵形式为:

$$\dot{X}(t) = AX(t) \quad (12)$$

式中: $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_{3N}(t)]^T$ ; $A$ 为 $3N \times 3N$ 阶的稀疏矩阵,如附录A式(A1)所示。

EV动态接入和离开电网会影响集群内EV的数量,从而影响各时刻每个状态子区间内的EV数量,定义 $X_p(t)$ 为 $t$ 时刻接入和离开电网的EV状态分布矩阵,如式(13)所示。

$$X_p(t) = N_{in} f_{in}(t) X_{in} - N_{out} f_{out}(t) X_{out} \quad (13)$$

式中: $f_{in}(t)$ 、 $f_{out}(t)$ 分别为 $t$ 时刻EV动态接入、离开电网的概率密度函数; $N_{in}$ 、 $N_{out}$ 分别为一天内接入、离开电网的EV数量; $X_{in}$ 、 $X_{out}$ 均为 $3N \times 1$ 阶的向量,分别表示接入、离开电网的EV在各状态子区间内所占比例。

考虑EV动态接入和离开电网后,EV集群的模型如式(14)所示。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + X_p(t) \quad (14)$$

### 3 大规模EV集群的控制方法

#### 3.1 EV集群控制实现过程

1) CS→IS和IS→CS这2种响应方式会改变EV在图3中各状态子区间之间的流量变化情况,例如:处于状态子区间1内的充电EV,可以通过CS→IS响应方式增加状态子区间 $N+1$ 内空闲EV数量;而处于状态子区间 $N+1$ 内的空闲EV,可以通过IS→CS响应方式增加状态子区间1内的充电EV数量。

对于处于CS的EV而言,根据式(11),经CS→IS和IS→CS这2种响应方式后,各状态子区间内EV数量可表示为:

$$\dot{X}_j(t) = \begin{cases} -\alpha_{cs} X_j(t) - v_j(t) X_j(t) + \\ w_j(t) X_{j+N}(t) & j=1 \\ -\alpha_{cs} (X_j(t) - X_{j-1}(t)) - v_j(t) X_j(t) + \\ w_j(t) X_{j+N}(t) & j=2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $v_j(t)$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) 为从状态子区间  $j$  转移到状态子区间  $j+N$  的 EV 数量与  $X_j(t)$  的比值,  $0 \leq v_j(t) \leq 1$ ;  $w_j(t)$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) 为从状态子区间  $j+N$  转移到状态子区间  $j$  的 EV 数量与  $X_{j+N}(t)$  的比值,  $0 \leq w_j(t) \leq 1$ 。

对于处于 DS 的 EV 而言, 基于式(11), 经 DS→IS 和 IS→DS 这 2 种响应方式后, 各状态子区间内 EV 数量可表示为:

$$\dot{X}_j(t) = \begin{cases} -\alpha_{ds} (X_{j+1}(t) - X_j(t)) + v_{j-N}(t) X_{j-N}(t) - \\ w_{j-N}(t) X_j(t) & j=2N+1, 2N+2, \dots, 3N-1 \\ \alpha_{ds} X_j(t) + v_{2N}(t) X_{2N}(t) - w_{2N}(t) X_j(t) \\ & j=3N \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $v_{j-N}(t)$  ( $j=2N+1, 2N+2, \dots, 3N$ ) 为从状态子区间  $j-N$  转移到状态子区间  $j$  的 EV 数量与  $X_{j-N}(t)$  的比值,  $0 \leq v_{j-N}(t) \leq 1$ ;  $w_{j-N}(t)$  ( $j=2N+1, 2N+2, \dots, 3N$ ) 为从状态子区间  $j$  转移到状态子区间  $j-N$  的 EV 数量与  $X_j(t)$  的比值,  $0 \leq w_{j-N}(t) \leq 1$ 。

对于处于 IS 的 EV 而言, 基于式(11), 经 CS→IS、IS→CS、DS→IS、IS→DS 这 4 种响应方式后, 各状态子区间内 EV 数量可表示为:

$$\dot{X}_j(t) = \begin{cases} -\alpha_{ds} X_{N+j}(t) + v_1(t) X_1(t) - w_1(t) X_j(t) - \\ v_j(t) X_j(t) + w_j(t) X_j(t) & j=N+1 \\ v_{j-N}(t) X_{j-N}(t) - w_{j-N}(t) X_j(t) - v_j(t) X_j(t) + \\ w_j(t) X_{N+j}(t) & j=N+2, N+3, \dots, 2N-1 \\ \alpha_{cs} X_N(t) + v_N(t) X_N(t) - w_N(t) X_j(t) - \\ v_j(t) X_j(t) + w_j(t) X_{3N}(t) & j=2N \end{cases} \quad (17)$$

定义向量  $V(t) = [v_1(t) X_1(t), v_2(t) X_2(t), \dots, v_{2N}(t) X_{2N}(t)]^T$ ,  $W(t) = [w_1(t) X_{N+1}(t), w_2(t) X_{N+2}(t), \dots, w_{2N}(t) X_{3N}(t)]^T$ , 则式(15)~(17)的矩阵形式可以表示为:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B(V(t) - W(t)) + X_p(t) \quad (18)$$

式中:  $B$  为  $3N \times 2N$  阶矩阵, 如附录 A 式(A2)所示。

$V(t)$  用于实现 CS→IS 和 IS→DS 响应方式, 目的是增加 EV 集群的输出功率,  $W(t)$  用于实现 IS→CS 和 DS→IS 响应方式, 目的是减少 EV 集群的输出功率。考虑到在实际运行中增加和减少 EV 集群的输出功率不会同时发生, 因此可以对式(18)进行进一步简化, 令  $U(t) = V(t) - W(t)$ , 则有:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + X_p(t) \quad (19)$$

考虑到式(19)是一个线性的时不变系统, 对其进行离散化可得:

$$X(t + \Delta t) = (A\Delta t + I)X(t) + BU(t)\Delta t + X_p(t)\Delta t \quad (20)$$

式中:  $\Delta t$  为离散化的时间间隔;  $I$  为  $3N \times 3N$  阶的单位矩阵。

$X(t)$  的元素为各状态子区间内的 EV 数量, 基于  $X(t)$  可以求取 EV 集群的输出功率以及在各响应方式下的响应容量, 如式(21)所示。

$$\begin{cases} P_{eva}(t) = DX(t) \\ P_{c2i}(t) = D_{c2i}X(t) \\ P_{i2d}(t) = D_{i2d}X(t) \\ P_{d2i}(t) = D_{d2i}X(t) \\ P_{i2c}(t) = D_{i2c}X(t) \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $P_{eva}(t)$  为  $t$  时刻 EV 集群的输出功率;  $P_{c2i}(t)$ 、 $P_{i2d}(t)$ 、 $P_{d2i}(t)$ 、 $P_{i2c}(t)$  分别为 EV 集群在 CS→IS、IS→DS、DS→IS、IS→CS 响应方式下的可调节容量;  $D$ 、 $D_{c2i}$ 、 $D_{i2d}$ 、 $D_{d2i}$ 、 $D_{i2c}$  为常数矩阵, 如附录 A 式(A3)所示。

由式(20)可以看出, 计算过程中主要为矩阵的乘法和加法运算, 而式(20)中主要为  $3N \times 3N$  和  $3N \times 1$  阶矩阵, 对于大规模 EV 集群而言,  $N$  的数值远小于 EV 数量, 所以计算复杂度大幅降低。

### 3.2 EV 集群概率控制信号

令  $P^*(t)$  为 EV 集群的目标调节功率, 为了实现该目标, 本文设计了概率控制信号  $R(t) = [r_1(t), r_2(t)]^T$ , 其仅由 2 个概率值 (即  $0 \leq r_1(t) \leq 1, 0 \leq r_2(t) \leq 1$ ) 组成。采用 2 个概率值构成的控制信号主要是考虑到放电对电池循环寿命的影响较大<sup>[14-15]</sup>, EV 切换到 DS 会作为功率调节的备选手段, 所以信号中  $r_1(t)$  用于实现 CS→IS 和 IS→CS 响应方式,  $r_2(t)$  用于实现 IS→DS 和 DS→IS 响应方式。控制信号的计算方法如下。

1) 如果  $P^*(t) = 0$ , 则  $R(t) = [0, 0]^T$ 。

2) 如果  $P^*(t) > 0$ , 则需要集群内的 EV 参与 CS→IS 和 IS→DS 响应方式, 有:

$$r_1(t) = \begin{cases} \min \left\{ \frac{P^*(t)}{P_{c2i}(t)}, 1 \right\} & P_{c2i}(t) > 0 \\ 0 & P_{c2i}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$r_2(t) = \begin{cases} \min \left\{ \frac{\max \{P^*(t) - P_{c2i}(t), 0\}}{P_{i2d}(t)}, 1 \right\} & P_{i2d}(t) > 0 \\ 0 & P_{i2d}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

3) 如果  $P^*(t) < 0$ , 则需要集群内的 EV 参与 DS→IS 和 IS→CS 响应方式, 有:

$$r_2(t) = \begin{cases} \max \left\{ -\frac{P^*(t)}{P_{d2i}(t)}, -1 \right\} & P_{d2i}(t) < 0 \\ 0 & P_{d2i}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$r_1(t) = \begin{cases} \max \left\{ -\frac{\min \{ P^*(t) - P_{d2i}(t), 0 \}}{P_{i2c}(t)}, -1 \right\} & P_{i2c}(t) < 0 \\ 0 & P_{i2c}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (25)$$

根据所得控制信号  $\mathbf{R}(t)$ , 可以确定 EV 集群模型中的  $\mathbf{V}(t)$ 、 $\mathbf{W}(t)$ , 其元素分别如式 (26) 和式 (27) 所示, 进而根据  $\mathbf{U}(t) = \mathbf{V}(t) - \mathbf{W}(t)$  可得  $\mathbf{U}(t)$ 。

$$v_j(t) = \begin{cases} r_1(t) & j = 1, 2, \dots, N \\ r_2(t) \frac{X_j(t) + X_{j-N}(t)}{X_j(t)} & j = N+1, N+2, \dots, 2N \end{cases} \quad (26)$$

$$w_j(t) = \begin{cases} -r_1(t) \frac{X_j(t) + X_{j+N}(t)}{X_j(t)} & j = 1, 2, \dots, N \\ -r_2(t) & j = N+1, N+2, \dots, 2N \end{cases} \quad (27)$$

在实际应用中, 集群控制中心将控制信号  $\mathbf{R}(t)$  广播给集群内的所有 EV, EV 根据如下规则进行状态切换。

1) 如果  $r_1(t) + r_2(t) > 0$  且  $r_1(t) \geq 0$  以及  $r_2(t) \geq 0$ , 则对于处于 CS 的 EV 而言, 其根据接收到的  $r_1(t)$  决定切换概率  $\theta_i$ , 即  $\theta_i = r_1(t)$ , 同时终端控制器会产生一个服从均匀分布  $U(0, 1)$  的随机数  $\lambda_i$ , 若  $\lambda_i \geq |\theta_i|$  则第  $i$  辆 EV 不切换状态, 若  $\lambda_i < |\theta_i|$  则第  $i$  辆 EV 切换到 IS, 之后该 EV 会作为处于 IS 的 EV 继续执行控制信号; 对于处于 IS 的 EV 而言, 其根据接收到的  $r_2(t)$  决定切换概率  $\theta_i$ , 即  $\theta_i = r_2(t)$ , 同时终端控制器会产生一个服从  $U(0, 1)$  的随机数  $\lambda_i$ , 若  $\lambda_i \geq |\theta_i|$  则第  $i$  辆 EV 不切换状态, 若  $\lambda_i < |\theta_i|$  则第  $i$  辆 EV 切换到 DS。

2) 如果  $r_1(t) + r_2(t) < 0$  且  $r_1(t) \leq 0$  以及  $r_2(t) \leq 0$ , 对于处于 DS 的 EV 而言, 其根据接收到的  $r_2(t)$  决定切换概率  $\theta_i$ , 即  $\theta_i = |r_2(t)|$ , 同时终端控制器会产生一个服从  $U(0, 1)$  的随机数  $\lambda_i$ , 若  $\lambda_i \geq |\theta_i|$  则第  $i$  辆 EV 不切换状态, 若  $\lambda_i < |\theta_i|$  则第  $i$  辆 EV 切换到 IS, 之后该 EV 会作为处于 IS 的 EV 继续执行控制信号; 对于处于 IS 的 EV 而言, 其根据接收到的  $r_1(t)$  决定切换概率  $\theta_i$ , 即  $\theta_i = |r_1(t)|$ , 同时终端控制器会产生一个服从  $U(0, 1)$  的随机数  $\lambda_i$ , 若  $\lambda_i \geq |\theta_i|$  则第  $i$  辆 EV 不切换状态, 若  $\lambda_i < |\theta_i|$  则第  $i$  辆 EV 切换到 CS。

上述设计的概率控制信号不是针对单辆 EV 的控制信号, 接收到控制信号的单辆 EV 会按照上述规

则从一种接入状态切换到另一种接入状态, 而对于 EV 集群而言, 由于 EV 数量较大, 概率控制的误差能被保持在较低的水平。

## 4 算例仿真与分析

### 4.1 算例场景

EV 电池的参数如附录 B 表 B1 所示<sup>[16-18]</sup>, EV 出行参数如附录 B 表 B2 所示<sup>[19]</sup>, 设置 EV 状态子区间数量为 15。根据 EV 电池参数和出行参数的分布规律, 结合本文所提 EV 集群模型, 对 EV 集群的输出功率以及各响应方式下的可调节容量进行评估, 并根据系统所需的目标调节功率, 计算集群的概率控制信号, 更新集群模型的向量参数。

为了验证本文所提 EV 集群建模方法的有效性, 将其与文献 [13-14] 中基于独立建模方法的 EV 集群模型 (下文简称为独立建模方法) 进行对比。EV 集群在 00:00—01:00 时段的目标调节功率如附录 B 图 B1 所示。集群内的 EV 数量为 8000 辆, 根据目标调节功率可以计算集群的概率控制信号, 进而可以根据独立建模方法获得控制后 EV 集群的实际调节功率, 进而对比目标调节功率和实际输出功率。

本文基于 MATLAB 仿真软件进行算例仿真, 电脑配置为 Intel Core i5-4440 CPU@3.10 GHz, 8.0 GB RAM。

### 4.2 算例结果与分析

EV 集群响应目标调节功率后的实际输出功率及其可调节容量上下限如图 4 所示。利用本文所提建模方法预测 EV 集群是否能够在其可调节容量范围内追踪目标调节功率, 同时产生概率控制信号; 利用独立建模方法模拟 EV 接收概率控制信号的过程, 然后获取 EV 集群的实际输出功率及其可调节容量上下限范围。由图 4 可以看出, 采用独立建模方法时 EV 集群的实际输出功率能够很好地追踪本文所提建模方法下的目标调节功率, 验证了本文所提建模方法的有效性。

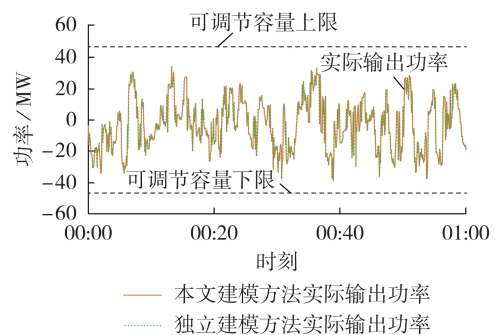


图4 EV 集群输出功率及其可调节容量上下限范围  
Fig.4 Output power and upper and lower limits of adjustable capacity of EV clusters

2种建模方法之间的响应误差如图5所示,响应误差为实际输出功率和目标调节功率的差值与初始时刻上调容量(可调节容量上限与初始时刻EV集群输出功率的差值)的比值。由图5可以看出,响应误差低于5%,但是随着时间的增加,响应误差呈现增长趋势,这是因为概率控制会产生一定的控制误差,本文所提建模方法无法实时更新EV数量矩阵 $X(t)$ ,造成的误差会随着时间的增加被稀疏矩阵 $A$ 不断放大。

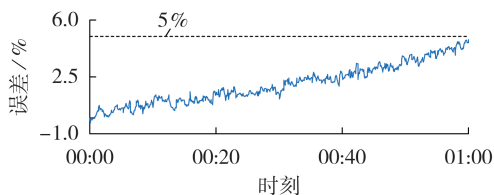


图5 EV集群的响应误差

Fig.5 Responding errors of EV clusters

在参与实际电力市场时, EV集群需要追踪自动发电控制(AGC)信号,响应误差大小直接影响EV的市场收益,虽然不同电力市场针对响应误差的收益结算函数不同,但是响应误差越大则收益越低在各市场中均成立<sup>[20]</sup>。因此,在实际应用中,一定的响应误差已满足实际需求,但是需要关注长时间控制所带来的高响应误差问题。控制过程不断改变 $X(t)$ ,根据式(20)和式(21)可知,响应误差主要来自 $X(t)$ , $X(t)$ 反映EV集群的状态分布,因此可以采用更新 $X(t)$ 的方式来降低响应误差。设 $\Delta T$ 为更新 $X(t)$ 的时间间隔,且有 $\Delta T \gg \Delta t$ 。由于不需要在各控制时刻采集EV的功率、SOC等状态数据信息,本文所提建模方法大幅降低了数据采集量;同时 $X(t)$ 仅反映EV集群整体的状态分布,只需要各终端设备同时采集EV的状态数据,即可更新并得到采集时刻的 $X(t)$ ,并根据模型对未来时刻的 $X(t)$ 进行预测。因此,更新 $X(t)$ 对数据采集实时性的要求不高,一定的延时并不影响对 $X(t)$ 的更新结果,对通信设施的要求也较低。

EV集群在各时刻的概率控制信号如附录B图B2所示。本文所设计的概率控制信号由2个概率值组成,该概率控制信号更适合实际应用,更易于集群控制中心将其广播给所有EV,降低了对通信设施的要求。为了进一步说明本文所设计概率控制信号的优势,将其与传统建模方法下的独立控制信号进行比较,结果如表1所示。由表中数据可以看出,概率控制信号大幅减少了组成控制信号的数值数量,可以采用广播的通信方式将信号传输给各辆EV,而独立控制信号要求对各辆EV建立独立的通信通道,可

见本文方法简化了控制信号,降低了对通信设施的要求,有效地减少了实时通信的成本并且缓解了通信压力。

表1 概率控制信号与独立控制信号的对比

Table 1 Comparison between probabilistic control signal and individual control signal

信号类型	数值数量	通信方式
概率控制信号	2	广播通信
独立控制信号	8000	独立通信通道

当EV集群包含不同数量的EV时,2种建模方法的平均仿真时长如表2所示。可以看出,本文建模方法所需的仿真时长远远少于独立建模方法,并且随着EV数量的增加,本文建模方法的仿真时长没有明显的变化,而独立建模方法的仿真时长随着EV数量的增加大幅增长,可见本文建模方法能够极大地降低EV集群模型的复杂度。同时, EV作为一种快速响应资源,仿真时长会增加控制过程中的延时,从而弱化其响应快速的优势。在实际应用中,不同应用场景对延时的要求不同,当EV作为主要调频资源时,秒级的延时会增加调频失稳的风险;而当EV参与电力市场时,市场对延时没有要求,但延时会增加追踪AGC信号的误差,误差过大会降低市场收益。可见,减少仿真时长在实际应用中具有重要的意义。

表2 不同EV数量下2种建模方法的仿真时长

Table 2 Simulation times of two modeling methods under different numbers of EVs

EV数量/辆	仿真时长/s	
	本文建模方法	独立建模方法
8000	0.0059	7.3922
16000	0.0060	14.9144
32000	0.0059	27.9744

## 5 结论

本文提出了针对大规模EV集群的建模和控制方法,仿真结果验证了所提建模和控制方法的有效性,所得主要结论如下:

1)所提EV集群模型用有限的状态子区间来描述EV集群的状态分布,评估EV集群的输出功率和可调节容量,能够极大地降低模型的复杂度;

2)所提针对大规模EV集群的概率控制信号无需针对各EV产生独立的控制信号,降低了控制方法的复杂度;

3)所提概率控制信号仅由2个概率值组成,集群控制中心仅需要将这2个概率值广播给所有的EV,降低了通信的压力以及对通信设施的质量要求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 刘增训,游沛羽,周勤勇. 适用高比例新能源系统广域消纳的输电技术研究综述[J]. 电力工程技术,2020,39(5):59-70.  
LIU Zengxun, YOU Peiyu, ZHOU Qinyong. Transmission technologies adapting to power systems with widely-consumed high-proportion renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 59-70.
- [2] WEE K W, CHOI S S, VILATHGAMUWA D M. 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.
- [3] 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.
- [4] 李丹奇,郑建勇,史明明,等. 电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术,2019,38(1):75-83.  
LI Danqi, ZHENG Jianyong, SHI Mingming, et al. Prediction of time and space distribution of electric vehicle charging load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 75-83.
- [5] 王毅,陈进,麻秀,等. 采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):77-85.  
WANG Yi, CHEN Jin, MA Xiu, et al. Interactive scheduling strategy between electric vehicles and power grid based on group optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 77-85.
- [6] 陈丽丹,张尧, Antonio Figueiredo. 融合多源信息的电动汽车充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 1-10.  
CHEN Lidan, ZHANG Yao, FIGUEIREDO A. Charging load forecasting of electric vehicles based on multi-source information fusion and its influence on distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 1-10.
- [7] 龙雪梅,杨军,吴赋章,等. 考虑路网-电网交互和用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力系统自动化,2020,44(14): 86-93.  
LONG Xuemei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Prediction of electric vehicle charging load considering interaction between road network and power grid and user's psychology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 86-93.
- [8] 李晓辉,李磊,刘伟东,等. 基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(1): 117-125.  
LI Xiaohui, LI Lei, LIU Weidong, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicles based on dynamic traffic information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 117-125.
- [9] 张美霞,蔡雅慧,杨秀,等. 考虑用户充电差异性的家用电动汽车充电需求分布分析方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(2): 154-163.  
ZHANG Meixia, CAI Yahui, YANG Xiu, et al. Charging demand distribution analysis method of household electric vehicles considering users' charging difference[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 154-163.
- [10] DONADEE J, SHAW R, GARNETT O, et al. Potential benefits of vehicle-to-grid technology in California: high value for capabilities beyond one-way managed charging[J]. IEEE Electrification Magazine, 2019, 7(2): 40-45.
- [11] 谢小英,李文军,宣文华,等. 一种平抑光伏和负荷波动的电动汽车有序充电策略[J]. 燕山大学学报,2015,39(4): 352-356.  
XIE Xiaoying, LI Wenjun, XUAN Wenhua, et al. A method of smoothing PV and load fluctuation by organized charging/discharging for electric vehicles[J]. Journal of Yanshan University, 2015, 39(4): 352-356.
- [12] 胡俊杰,周华嫣然,李阳. 集群电动汽车平抑光伏波动实时调度策略[J]. 电网技术,2019,43(7):2552-2560.  
HU Junjie, ZHOU Huayanran, LI Yang. Real-time dispatching strategy for aggregated electric vehicles to smooth power fluctuation of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2552-2560.
- [13] LI J Z, AI X, HU J J. Supplementary frequency regulation strategy considering electric vehicles[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Beijing, China: IEEE, 2018: 1-9.
- [14] LIU H, QI J J, WANG J H, et al. EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3763-3772.
- [15] 王明深,穆云飞,贾宏杰,等. 考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(5): 211-219.  
WANG Mingshen, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Smoothing control strategy considering energy storage capability of electric vehicle aggregators of and wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 211-219.
- [16] MUKHERJEE J C, GUPTA A. Distributed charge scheduling of plug-in electric vehicles using inter-aggregator collaboration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 331-341.
- [17] GUO Y P, LIU W J, WEN F S, et al. Bidding strategy for aggregators of electric vehicles in day-ahead electricity markets[J]. Energies, 2017, 10(1): 144-163.
- [18] YAO W, ZHAO J, WEN F, et al. A hierarchical decomposition approach for coordinated dispatch of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2768-2778.
- [19] 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.
- [20] SADEGHI-MOBARAKEH A, MOHSENIAN-RAD H. Performance accuracy scores in CAISO and MISO regulation markets: a comparison based on real data and mathematical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3196-3198.

### 作者简介:



安海云

安海云(1981—),女,河北石家庄人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统仿真、技术线损(E-mail: haiyun\_229@163.com);

王明深(1990—),男,河北沧州人,工程师,博士,通信作者,主要研究方向为群体电动汽车充电规划、优化调控与市场机制(E-mail: wmshtju@outlook.com);

董晓红(1989—),女,河北石家庄人,讲师,博士,主要研究方向为电动汽车充电规划与控制(E-mail: dxh@hebut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

(下转第84页 continued on page 84)

## Prediction method of output power long-term fluctuation characteristic for multiple wind farms after aggregation based on improved KDE method and GA-SVM

XIAO Bai<sup>1</sup>, XING Shiheng<sup>2</sup>, WANG Maochun<sup>3</sup>, YANG Senlin<sup>3</sup>, GOU Xiaokan<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Yanbian Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Supply Co., Ltd., Yanji 133000, China;

3. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that there exists new-added wind power installed capacity during the planning period but its corresponding measured wind power output data is lacked, which causes the long-term fluctuation characteristic of output power of multiple wind farms after aggregation in the planning target year is difficult to be accurately grasped and described, a prediction method for long-term fluctuation characteristic of output power of multiple wind farms after aggregation is proposed based on improved KDE (Kernel Density Estimation) method and GA-SVM (Support Vector Machine optimized by Genetic Algorithm). The long-term fluctuation characteristic of output power of wind power is described, and the relationship between installed capacity and wind power is analyzed during the aggregation process of multiple wind farms. The improved KDE method is used to generate the probability density curves of output power during the aggregation process of multiple wind farms with different installed capacities. GA-SVM is adopted to establish the probability density varying model of output power after aggregation of multiple wind farms. According to the corresponding relationship between probability distribution and duration power curve, the predicted probability density curve of output power for multiple wind farms after aggregation in the planning target year is inversed so that the duration power curve which can describe the long-term fluctuation characteristic of output power in the planning target year is obtained. Engineering project verifies the practicability and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** multiple wind farms; wind power fluctuation characteristic; kernel density estimation; support vector machine

(上接第62页 continued from page 62)

## Modeling and control method for large-scale electric vehicle clusters

AN Haiyun<sup>1</sup>, WANG Mingshen<sup>1</sup>, WANG Weiliang<sup>2</sup>, DONG Xiaohong<sup>3</sup>, MENG Jian<sup>4</sup>, HUANG Cheng<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

3. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,  
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

4. State Grid Economic and Technology Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** The extensive access of renewable energy has a profound impact on the system source-load balance. The large-scale grid-connected EV (Electric Vehicle) clusters have rapid and considerable adjustable potential, which can provide power regulation support for the system source-load balance. The existing modeling and control methods of large-scale EV clusters need to simulate the response characteristics of each independent EV and develop independent control signals, and the model complexity is high and the computation is large. At the same time, a large number of control signals will increase the real-time communication pressure and have high requirements for communication facilities. To solve the above problems, a simplified modeling and control method for large-scale EV clusters is proposed. Firstly, the response characteristics of a single EV are fully analyzed, and three access states and four response modes are proposed. Then, finite state sub-intervals are used to describe the state distribution of large-scale EV clusters, and the output power and adjustable capacity of EV clusters are evaluated. By changing the state distribution of EVs in sub-intervals, four response modes are realized. Finally, a control signal composed of two probability values is designed to reduce the complexity of the control method, and the requirement for communication is reduced by controlling all EVs to receive the same probability signals. Simulative results of an example verify the effectiveness of the proposed modeling and control method.

**Key words:** electric vehicle clusters; modeling; control method; probabilistic control; response characteristics



## 附录 A

$$\mathbf{A} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc}
 -\alpha_{cs} & & & & & \\
 \alpha_{cs} & -\alpha_{cs} & & & & \\
 \dots & \dots & & & & \\
 \alpha_{cs} & & -\alpha_{cs} & & & \\
 \hline
 & & & & & \\
 \hline
 & & & & & \\
 & & & & \alpha_{ds} & -\alpha_{ds} \\
 & & & & \dots & \dots \\
 & & & & \alpha_{ds} & -\alpha_{ds} \\
 & & & & \dots & \dots \\
 & & & & \alpha_{ds} & -\alpha_{ds}
 \end{array} \right] \tag{A1}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\mathbf{I}_{N \times N} & \mathbf{O}_{N \times N} \\ \mathbf{I}_{N \times N} & -\mathbf{I}_{N \times N} \\ \mathbf{O}_{N \times N} & \mathbf{I}_{N \times N} \end{bmatrix} \tag{A2}$$

式中： $\mathbf{I}_{N \times N}$  和  $\mathbf{O}_{N \times N}$  分别为  $N \times N$  阶的单位矩阵和零矩阵。

$$\begin{cases} \mathbf{D} = [p_{cs} \mathbf{E}_{1 \times N} & \mathbf{O}_{1 \times N} & -p_{ds} \mathbf{E}_{1 \times N}] \\ \mathbf{D}_{c2i} = [p_{cs} \mathbf{E}_{1 \times N} & \mathbf{O}_{1 \times N} & \mathbf{O}_{1 \times N}] \\ \mathbf{D}_{i2d} = [p_{ds} \mathbf{E}_{1 \times N} & p_{ds} \mathbf{E}_{1 \times N} & \mathbf{O}_{1 \times N}] \\ \mathbf{D}_{d2i} = [\mathbf{O}_{1 \times N} & \mathbf{O}_{1 \times N} & -p_{ds} \mathbf{E}_{1 \times N}] \\ \mathbf{D}_{i2c} = [\mathbf{O}_{1 \times N} & -p_{cs} \mathbf{E}_{1 \times N} & -p_{cs} \mathbf{E}_{1 \times N}] \\ \mathbf{E}_{1 \times N} = [1, 1, \dots, 1] \end{cases} \tag{A3}$$

# 附录 B

表 B1 EV 电池参数

Table B1 Battery parameters of EVs

参数	服从分布
额定充电功率 $p_{i,cs}$ , 额定放电功率 $p_{i,ds}$	U(5.00, 7.00)
充电效率 $\eta_{i,cs}$ , 放电效率 $\eta_{i,ds}$	U(0.88, 0.95)
电池容量 $q_i$	U(20.00, 30.00)

注:  $U(\alpha, \beta)$  表示  $[\alpha, \beta]$  范围内的均匀分布。

表 B2 EV 出行参数

Table B2 Traveling parameters of EVs

参数	服从分布
入网的初始 SOC $s_{i,sa}$	$N(0.3, 0.05) \in [0.2, 0.4]$
出行需求 SOC $s_{i,de}$	$N(0.8, 0.03) \in [0.7, 0.9]$
开始充电时间 $t_{i,sa}$	$N(-6.5, 3.4) \in [0, 5.5]$ , $N(17.5, 3.4) \in [5.5, 24.0]$
结束充电时间 $t_{i,fe}$	$N(8.9, 3.4) \in [0, 20.9]$ , $N(32.9, 3.4) \in [20.9, 24.0]$
最小/最大 SOC $s_{i,min} / s_{i,max}$	0/1.0

注:  $N(\mu, \sigma)$  表示平均值为  $\mu$ 、标准差为  $\sigma$  的正态分布。

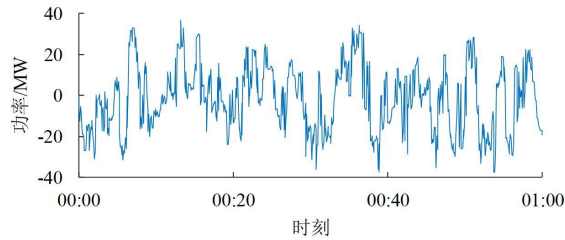


图 B1 目标调节功率曲线

Fig.B1 Target regulation power curve

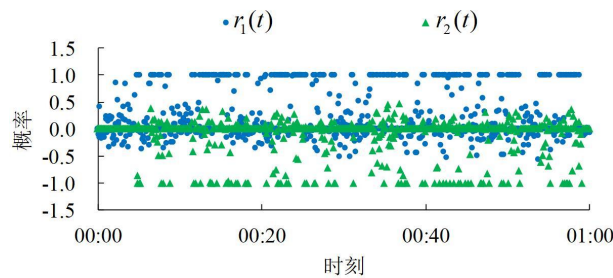


图 B2 EV 集群的概率控制信号

Fig.B2 Probabilistic control signals of EV clusters