

# 基于优先权的电动汽车集群充放电优化 控制策略

张 谦<sup>1</sup> 蔡家佳<sup>1</sup> 刘 超<sup>1 2</sup> 李春燕<sup>1</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学) 重庆 400044  
2. 华润置地(重庆)有限公司 重庆 400050)

**摘要** 为实现电动汽车代理商与电动汽车之间的互动策略,针对目前电动汽车与电网互动存在的问题,计及电动汽车用户用车便利性,建立了基于优先权的电动汽车集群充放电优化模型。论文分析了电动汽车各项申报信息对代理商制定策略的影响,建立电动汽车评价指标体系,以电动汽车申报容量和时段、诚信度及电池损耗为评价指标,基于熵权法确定电动汽车调度优先权。电动汽车代理商根据调度机构制定的调度计划,确定所辖区域电动汽车具体优化调度方案。通过算例仿真,表明该方法能够综合考虑电动汽车多项指标对调度策略的影响,可有效实现调度机构为代理商拟定的调度计划。

**关键词:** 电动汽车代理商与电动汽车互动 调度优先权 最优充放电计划 控制策略

**中图分类号:** TM714

## Optimal Control Strategy of Cluster Charging and Discharging of Electric Vehicles Based on the Priority

Zhang Qian<sup>1</sup> Cai Jiajia<sup>1</sup> Liu Chao<sup>1 2</sup> Li Chunyan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology  
(Chongqing University) Chongqing 400044 China  
2. China Resources Land (Chongqing) Company Limited Chongqing 400050 China)

**Abstract** Considering the problems of (vehicle-to-grid) V2G scheduling and electric vehicle users' convenience, an optimization model of cluster charging and discharging of electric vehicles based on the priority is presented to achieve the interactive strategies of vehicle-to-aggregator (V2A). This paper analyzes the influence of declaring information on aggregator's strategies and establishes the evaluation index system for electric vehicles, which takes reporting capacity, time, battery depletion and integrity as the indices. Then the scheduling priority of electric vehicles based on the entropy method is determined. Aggregator can determine the local optimized scheduling scheme according to the schedule plan made by the scheduling organization. The simulation results show that the impact of multiple indices of electric vehicles on scheduling strategy are considered and the scheduling plan provided by the scheduling organization for the aggregator can be obtained through the proposed method.

**Keywords:** Vehicle-to-aggregator, scheduling priority, optimal charge and discharge plan, control strategy

国家高技术研究发展(863)计划(2011AA05A110)、国家自然科学基金(51247006)和中央高校基本科研业务费专项资金(CDJZR13150075, CDJXS12151105)资助项目。

收稿日期 2014-12-07 改稿日期 2015-04-03

## 0 引言

电动汽车规模化应用并接入电网必将对电网的运行和控制带来新的机遇和挑战。对汽车行驶行为模式的研究表明,大多数家用汽车全年 96% 左右的时间处于停驶状态<sup>[1]</sup>。因此,可通过电动汽车与电网互动 (Vehicle-to-Grid, V2G) 技术<sup>[2]</sup> 来实现电动汽车与电网双向互动。

为了解决电动汽车分布分散、数量大和管理困难等特点,文献[3]提出了电动汽车集群 (Electric Vehicle Aggregator) 的概念,也叫电动汽车代理商。它是指一定数量的电动汽车的聚集体,具有一定规模的可调度负荷和储能容量,将成为电动汽车充电控制和参与电力市场的重要形式。至此,V2G 调度逐渐由电网直接调度向分级调度转换,其示意图如图 1 所示。其中一级调度中心实现电动汽车代理商与电网 (Aggregator-to-Grid, A2G) 之间的调度,二级调度中心实现电动汽车与电动汽车代理商 (Vehicle-to-Aggregator, V2A) 之间的调度。

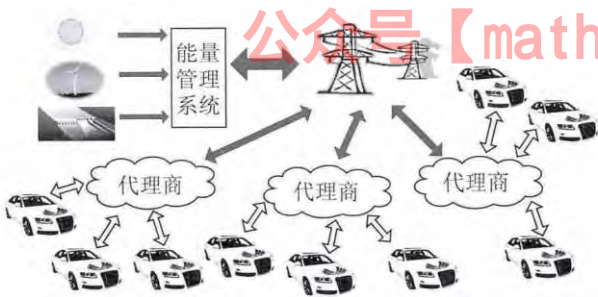


图 1 电动汽车与电网互动分级调度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the V2G hierarchical scheduling

目前,国内外对 V2G 调度问题的研究,几乎都是针对一级调度,且主要集中在以下 3 方面: ① 计及 V2G 的机组组合研究。R. J. Bessa 等<sup>[3]</sup> 探讨了现有体系结构下电动汽车并网问题,并初步分析了 V2G 控制下的系统规划问题; A. Y. Saber 等<sup>[4]</sup> 构建了计及电动汽车充放电行为的机组组合模型,以实现系统的运行成本和碳排放成本最低,并进一步研究了风电和太阳能发电等新能源发电对调度的影响<sup>[1,5]</sup>; 张舒等<sup>[6]</sup> 将电动汽车换电站引入传统机组组合问题中,计及了换电站的充放电效率、电量平衡和满足日换电需求的最小储能等约束,提出换电站与电网互动的机组组合模型。② 计及 V2G 的辅助服务研究。传统电力系统通过调节发电机出力,提供调频、调峰及备用等辅助服务,而通过 V2G 控制也可达到相同效果,甚至更优<sup>[7,8]</sup>。③ V2G 与可再生能源协同调度研究。通过充电控制,实现充电负荷对可再生能源出力变化的跟

踪,平抑可再生能源波动并促进电网对其的消纳<sup>[5,9,10]</sup>。H. Lund 等<sup>[11]</sup> 认为利用 V2G 技术可灵活地安排电动汽车的充电时间,使其与风能和太阳能等洁净能源供电的随机性对应,以此避免洁净能源的浪费。

上述研究仅给出电动汽车总体的充放电安排,尚未将控制分解到每辆电动汽车<sup>[12]</sup>。实际上,每辆电动汽车申报的可调度时段和容量不尽相同,如不采取适当控制策略,可能出现部分电动汽车在可调度时段并未参与调度,或电动汽车在部分时段集中调度,而其他时段出现供不应求的现象。故必须进一步研究电动汽车集群的充放电优先级问题,确定各电动汽车最优充放电时段,使电动汽车可用容量得到更加充分合理的利用,才能有效实现 V2G 调度。

此外,目前的研究通常主观假定调度模型中 V2G 的可用容量为固定值,并能够满足调度需求<sup>[13,14]</sup>,且大多是以对电动汽车的直接调度为基本假设,认为调度人员在电动汽车申报可调度时段内可完全控制其充放电过程,未考虑电动汽车的随机性。考虑到电动汽车作为交通工具的主要特性,即电动汽车用户可能违背申报计划,突然接入或脱离电网,这将影响可调度容量,甚至导致调度计划无法实现,而目前的调度模型均未考虑该问题。

本文在文献[15]所建一级调度模型的基础上,计及电动汽车用户用车便利性,建立基于优先权的电动汽车集群充放电优化模型。通过分析电动汽车各项申报信息对代理商制定策略的影响,建立电动汽车评价指标体系,以电动汽车申报容量和时段、诚信度及电池损耗为评价指标,基于熵权法确定电动汽车调度优先权,从而得到电动汽车代理商所辖区域电动汽车集群充放电的优化控制策略。最后,通过微电网系统进行仿真计算,对本论文提出的方法进行验证。

## 1 调度策略分析

### 1.1 影响调度的因素

电动汽车用户申报互动计划时,需要设定接入及离开电网的时间、离开电网时电池 SOC 上下限和申报状态及相应时段。理论上,电动汽车在任意时段可能既申报充电计划,也申报放电计划。但实际上电动汽车是根据电网需求申报计划,而在某一时段,电网仅需要参与互动的电动汽车群充电或者放电。因此,本文假设单辆电动汽车在每个时段的申报状态只能是充电或放电中一种,但在接入电网的整个时间段内可申报不同状态,且不要求每个时段均申报互动计划。计及电动汽车用户用车便利性,电动汽车可出现多次接

入和离开电网的情况,申报计划时需设定每次的互动信息。

根据以上信息,可得到该电动汽车的可调度时段和可调度容量(对于充电计划,为用户设定电量上限与剩余电量的差值;对于放电计划,为剩余电量与用户设定电量下限的差值)。其中,电量上下限可根据电动汽车用户所设定的离开电网时电池SOC上下限及电动汽车的电池容量计算得到。电动汽车代理商接收的信息还应包括电动汽车电池损耗(与电池寿命相关,随着电池损耗增加,可调度电量降低)。在申报可调度时段内,用户需接入电网以供调度。电动汽车代理商应建立每辆电动汽车的历史互动数据库,包含每辆电动汽车的历史申报可调度时段、可调度容量及历史实际被调度情况。

针对电动汽车用户用车便利性问题,本文中基于模糊数学理论,将“诚信度”引入可调度容量计算,定义电动汽车用户参与调度的“诚信”为其模糊集, $\delta(x)$ 表示其隶属函数。若电动汽车按申报计划接入和离开电网,则电动汽车诚信隶属度(以下简称诚信度)为1;若电动汽车在计划外突然接入或突然脱离电网,设定其隶属函数 $\delta(x)$ 为申报容量与计划外容量(脱离电网缺失的可用容量)之差与其申报容量的比值。定义用户诚信度为

$$\delta = \frac{\bar{S}_b - \bar{S}_w}{\bar{S}_b} \quad (1)$$

式中: $\bar{S}_b$ 为历史平均申报容量; $\bar{S}_w$ 为历史平均计划外容量,表示脱离电网时带走的剩余申报容量。

根据电动汽车诚信度,将电动汽车申报容量按照一定的规则计入电动汽车代理商的可用容量,如图2所示,其中 $\rho$ 为用户诚信度。诚信度很高时(大于 $\rho_2$ ),申报容量全部计入可用容量;诚信度过低时(小于 $\rho_1$ ),申报容量不计入可用容量;其他情况下(诚信度位于区间 $[\rho_1, \rho_2]$ ),申报容量按诚信度比例计入可用容量。

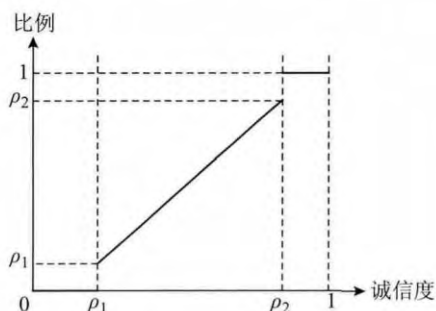


图2 用户申报容量计入可用容量规则

Fig. 2 Estimated principles of available capacity

## 1.2 电动汽车集群调度策略

对于某一时段而言,每辆电动汽车只能实现负荷或出力中一种状态。电动汽车代理商统计分析用户信息后,根据电动汽车诚信度、可调度时段、可调度容量和电池损耗等确定各电动汽车的调度优先权,并据此将电动汽车分为优先调度、备用调度和不调度3类,如图3所示。电动汽车代理商向优先调度类电动汽车发送调度指令,制定电动汽车最优充放电计划,容量需求不足时调用备用调度的电动汽车,而优先权较低的电动汽车暂不参与调度。

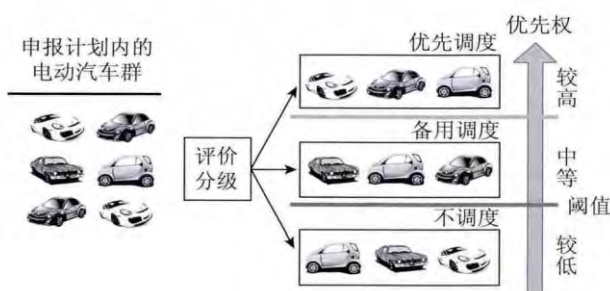


图3 电动汽车优先权调度方案

Fig. 3 Priority scheduling scheme for electric vehicles

电动汽车调度优先权与该电动汽车的剩余调度容量及剩余可调度时段相关,因此对于多时段而言,某时段的调度计划将会影响电动汽车下一时段的调度优先权。一级调度仍采用文献[15]中的前提条件及方法,将电动汽车成本分成可调度容量补偿成本、实际调度电量补偿成本和电池损耗补偿成本3部分。综合以上信息,二级调度策略即为:根据电动汽车调度优先权排序,以一定裕度将调度优先权高的列入调度计划,电动汽车代理商从中选取足够数量的电动汽车参与互动计划。

这里考虑电动汽车调度容量裕度,是为了防止出现电动汽车用户因故用车而违背计划,造成调度容量不足的情况。容量裕度的取值要适当,过大将造成容量补偿成本较高;过小可能造成容量不足而导致调度计划无法实施。其值的设定主要与电动汽车用户整体诚信度相关,当用户整体诚信度较高时,容量裕度可取较低值;当用户整体诚信度较低时,可取较高值。本文容量裕度取值范围为10%~30%,可根据实际情况进行调整。

## 2 调度优先权的确定

### 2.1 优先权评价指标标准化处理方法

在评价电动汽车调度优先权之前,需要对电动汽车用户申报信息进行标准化处理。常用的统计数据标准化处理方法<sup>[16]</sup>可分为直线型(极值法和标准差标准



化法)、折线型和曲线型(半升Γ型分布和半正态型分布)几类。通常为了遵循简单易行原则,尽量使用直线型标准化处理公式,常用公式为

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \text{ 或 } d_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

式中:  $x_{ij}$  为第  $i$  个对象(本文指各电动汽车)第  $j$  项指标;  $\max$  和  $\min$  为所有对象同一指标的最大值和最小值;  $d_{ij}$  为标准化处理后的指标。前者适用于正向指标,后者则适用于逆向指标,逆向指标也可转换为正向指标。

## 2.2 优先权评价指标体系的建立

需要标准化处理的指标包括用户诚信度、电动汽车可用容量、可用时段及电池损耗。用户初始申报可用容量应不高于申报可调度时段内最大可用容量(即申报时段内额定功率下的容量)。

对于电动汽车诚信度指标,如果从调度机构方便性的角度考虑,诚信度越高越优先调度,可避免多次修改调度计划。不过随之产生的问题也不容忽视,假如诚信度较高的电动汽车在调度周期前面部分时段集中调度,势必造成其他时段可能出现诚信度总体偏低情况,这将增加电动汽车代理商无法顺利完成调度计划的风险。这里给出两种处理方式:

1) 申报计划内电动汽车规模较小时,为了调度策略稳定性,确保可调度容量足够大,用户诚信度为逆向指标,越小越好。

2) 当申报计划内电动汽车数量足够多时,为了代理商控制便利性,用户诚信度为正向指标。

对于电动汽车电池损耗参数,由于电池损耗越大对实际可调度的容量影响越大,对电能传输效率也有影响,因而电池损耗越小越好。

对于电动汽车可用容量和时段,不能直接采用上述公式进行处理,原因如下:假定有两辆电动汽车,A车申报容量可供调度5个时段,且申报可调度时段数为5;B车申报容量可供调度1个时段,且申报可调度时段数为1;若直接采用式(2)处理这两项指标,在不考虑其他指标的情况下,则会造成两车的调度优先权相差较大。而实际上,以资源充分利用为原则,两车被调度的迫切程度相等,调度优先权也应该相等。显然,这两项指标有一定联系,因此对这两个指标需要先进行一定转换。

定义1 可用容量比  $\varphi_s$  为电动汽车剩余可用容量与剩余可调度时段内至多调用容量的比值,反映了电动汽车剩余可用电能可在剩余申报时段内被调用的迫切程度。当剩余可用容量比剩余时段至多调度容量大时,可调度容量比取值1,可表示为

$$\varphi_s = \min \left( \frac{S_0 - S_1}{(H_0 - H_1)P}, 1 \right) \quad (3)$$

式中:  $S_0$  和  $H_0$  分别为电动汽车初始可用容量和时段数;  $S_1$  和  $H_1$  分别为电动汽车已被调用容量和已过去时段数;  $P$  为电动汽车充/放功率。

定义2 可用时段比  $\varphi_T$  为电动汽车剩余可调度时段数与剩余可调度容量至多调用时段数的比值,反映了电动汽车剩余申报时段内完成剩余申报容量的程度,且可用时段比取值不小于1,即

$$\varphi_T = \max \left( \frac{H_0 - H_1}{(S_0 - S_1)/P}, 1 \right) \quad (4)$$

可以看出,  $\varphi_s$  和  $\varphi_T$  呈反比关系,因此只需要关心其中一项即可,本文以可用容量比为指标。可用容量比越大电动汽车调度优先权越高。

综上所述,建立如下优先权评价指标体系:电池损耗程度为逆向指标,即电池损耗程度越小越优先调度;可用容量比为正向指标,即可用容量比越大越优先调度;可用时段比为逆向指标,即可用时段比越小越优先调度;用户诚信度为正向指标,即诚信度越大越优先调度。

## 2.3 优先权综合评价方法的确定

电动汽车调度优先权是多指标综合评价的结果,多指标综合评价问题的关键是如何确定各指标的权重。本文在数据标准化处理后,采用熵权法确定各指标的权重。第  $j$  项指标的信息熵  $E_j$  为

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, \quad j=1, 2, \dots, K \quad (5)$$

式中:  $n$  为电动汽车数量;  $K$  为评价指标数;  $p_{ij}$  为各指标出现的概率,且有  $p_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}}$ , 如果  $p_{ij} = 0$ , 定义

$$\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0。$$

计算各项指标的权重  $w_j$  为

$$w_j = \frac{1 - E_j}{K - \sum_{j=1}^K E_j} \quad (6)$$

对各电动汽车调度优先权进行综合评价,计算公式为

$$V_j = \sum_{i=1}^K w_j d_{ij} \quad (7)$$

## 3 电动汽车集群充放电计划优化模型

### 3.1 目标函数

为了能够满足电网调度机构给定的调度计划,电

电动汽车代理商通过控制所管辖区域电动汽车充放电状态,使其实际负荷/出力匹配调度机构给定的计划。因此,模型目标函数为各电动汽车代理商管辖区域电动汽车在各时段总充放电功率与调度机构给定调度计划的最小差方和。对于第  $m$  个电动汽车代理商,其目标函数可表示为

$$\min f = \min \sum_{t=1}^H \left( \sum_{n=1}^{N_{k,m}} P_{m,n}(t) - P_{v,m}(t) \right)^2 \quad (8)$$

式中:  $P_{m,n}(t)$  为时段  $t$  电动汽车代理商  $m$  下第  $n$  辆电动汽车的实际功率;  $N_{k,m}(t)$  为未考虑容量裕度时代理商  $m$  时段  $t$  调度电动汽车总数;  $P_{v,m}(t)$  为调度机构给定的时段  $t$  时第  $m$  个代理商的调度计划。

除了满足电网调度机构为代理商制定的计划外,应当在计及电动汽车备用裕度后,调度可靠性(即为电动汽车代理商调度计划成功实施的概率)最高,因此,除了式(8)外,目标函数还应有

$$\max f_{\text{reliability}}(t) =$$

$$\max \left\{ \prod_{i_0=1}^{N_{r,m}(t)} (1 - p_{i_0}) + \sum_{i_1=1}^{N_{r,m}(t)} \left( \prod_{i_0=1}^{N_{r,m}(t)} (1 - p_{i_0}) / (1 - p_{i_1}) \right) + \sum_{i_1, i_2} \left( \prod_{i_0=1}^{N_{r,m}(t)} (1 - p_{i_0}) / [(1 - p_{i_1})(1 - p_{i_2})] \right) + \cdots + \sum_{i_1, i_2, \dots, i_q} \left( \prod_{i_0=1}^{N_{r,m}(t)} (1 - p_{i_0}) / [(1 - p_{i_1}) \cdots (1 - p_{i_q})] \right) \right\} \quad (9)$$

式中:  $N_{r,m}(t)$  为考虑调度裕度时代理商  $m$  时段  $t$  的电动汽车需求量;  $i_1, i_2, \dots, i_q$  为集合  $\{1, 2, \dots, nv(t)\}$  中  $q$  个元素的组合,  $nv(t)$  为时段  $t$  含备用调度电动汽车的数量;  $p_{i_0}, p_{i_1}, \dots, p_{i_q}$  分别为编号  $i_1, i_2, \dots, i_q$  的电动汽车用户诚信度,且  $q = N_{r,m}(t) - N_{k,m}(t)$ 。

### 3.2 约束条件

#### 1) 充/放电数量约束。

由于电动汽车在每个时段的申报状态只能是充电或放电中一种,每个代理商所辖区域申报充电计划或放电计划的电动汽车总数量一定。电动汽车代理商实际需要调度的电动汽车数量与申报计划的电动汽车数量满足如下关系

$$\begin{cases} n_{c,m}(t) \leq n_{c,m}^{\max}(t) \\ n_{dc,m}(t) \leq n_{dc,m}^{\max}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $n_{c,m}(t)$  和  $n_{dc,m}(t)$  分别为时段  $t$  电动汽车代理商  $m$  下制定充电和放电计划的电动汽车数量;  $n_{c,m}^{\max}(t)$  和  $n_{dc,m}^{\max}(t)$  分别为时段  $t$  电动汽车代理商  $m$  下申报充电和放电计划的电动汽车数量。

#### 2) 容量约束。

每个电动汽车代理商所辖区域可调度的电动汽车容量也有限,因此

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^{n_{c,m}(t)} p_{m,n}^c(t) \leq \sum_{n=1}^{n_{c,m}^{\max}(t)} p_{m,n}^c(t) \\ \sum_{n=1}^{n_{dc,m}(t)} p_{m,n}^{dc}(t) \leq \sum_{n=1}^{n_{dc,m}^{\max}(t)} p_{m,n}^{dc}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $p_{m,n}^c(t)$  和  $p_{m,n}^{dc}(t)$  分别为时段  $t$  代理商  $m$  下第  $n$  辆电动汽车的充电功率和放电功率。

#### 3) 可调度总量约束。

由于代理商所辖区域的电动汽车总量也有限,每个代理商所能调度的电动汽车总量有上限,即

$$n_{c,m}^{\max}(t) + n_{dc,m}^{\max}(t) \leq N_{m,t}^{\max} \quad (12)$$

式中  $N_{m,t}^{\max}$  为时段  $t$  电动汽车代理商  $m$  下电动汽车总量。

考虑裕度时电动汽车数量为

$$n_{rc,m}(t) = \gamma n_{c,m}(t), n_{rdc,m}(t) = \gamma n_{dc,m}(t) \quad (13)$$

式中:  $n_{rc,m}(t)$  和  $n_{rdc,m}(t)$  分别为考虑裕度时时段  $t$  电动汽车代理商  $m$  下制定充电计划和放电计划的电动汽车需求量;  $\gamma$  为裕度。

## 4 算例分析

以4节点2机组系统为例,系统的拓扑结构及相关参数见附录。各节点有功负荷如附表4所示,各节点无功负荷分别为0.199 Mvar、0.235 Mvar、0.194 Mvar和0.158 Mvar。假设参与互动的电动汽车总数为150辆,可以在节点2和节点3所代表的电动汽车代理商所辖区域充放电,且每个代理商的电动汽车数量不超过总量的70%。

以节点2为例,通过文献[15]中的模型,可计算得到代理商2的调度优化结果如表1所示。

表1 节点2一级调度优化结果

Tab. 1 First model optimal result of the 2 bus system

时段	1	2	3	4	5	6
$P/\text{kW}$	-71.22	-162.31	-171.44	-182.88	0.00	0.00
时段	7	8	9	10	11	12
$P/\text{kW}$	0.00	0.00	72.31	49.03	11.45	0.00

选取时段9~时段11三个负荷高峰时段,采用本文提出的控制策略进行二级调度优化。假设代理商2

所辖区内申报供电的电动汽车总数量为 20 辆, 其申报信息及历史互动数据如表 2 所示。

表 2 电动汽车申报信息及历史互动数据

Tab. 2 Declaring information and historical interactive data of electric vehicles

EV 编号	申报容量/kW	申报时段	$\bar{S}_w(\bar{S}_b)$ /kW	电池损耗程度(%)
1	7	9	2.1(6.3)	12
2	7	9	3.1(5.6)	5
3	7	9	5.5(6.8)	16
4	7	9	2.5(7.0)	12
5	7	10	5.2(7.2)	21
6	7	9, 10	2.6(9.8)	8
7	7	9, 10	3.6(5.9)	14
8	7	9, 10	2.1(6.2)	6
9	7	10, 11	3.9(8.2)	23
10	7	9, 10, 11	6.5(12.6)	14
11	7	9, 10, 11	1.1(12.9)	2
12	7	9, 10, 11	1.1(6.9)	3
13	14	9, 10	5.5(12.3)	11
14	14	9, 10	1.8(8.9)	4
15	14	10, 11	4.4(8.2)	13
16	14	10, 11	2.0(8.1)	5
17	14	9, 10, 11	1.4(9.2)	14
18	14	9, 10, 11	5.9(11.3)	4
19	21	9, 10, 11	5.7(8.8)	12
20	21	9, 10, 11	4.6(13.5)	3

根据表 2 中数据及式 (2) ~ 式 (4) 可以得到各电动汽车指标, 其中  $F_1$  为可用容量比,  $F_2$  为诚信度,  $F_3$  为电池损耗。时段 9 电动汽车指标数值如表 3 所示, 其中 “—” 表示未申报计划。时段 10 和时段 11 的指标数值也可用同样方法获得。

表 3 时段 9 各电动汽车指标

Tab. 3 Electric vehicles indices

EV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_1$	1	1	1	1	—	0.5	0.5	0.5	—	0.33
$F_2$	0.67	0.45	0.19	0.64	—	0.74	0.39	0.66	—	0.48
$F_3$	0.12	0.05	0.16	0.12	—	0.08	0.14	0.06	—	0.14
EV	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$F_1$	0.33	0.33	1	1	—	—	0.67	0.67	1	1
$F_2$	0.92	0.84	0.55	0.80	—	—	0.85	0.48	0.35	0.66
$F_3$	0.02	0.03	0.11	0.04	—	—	0.14	0.04	0.02	0.03

对于每个时段, 仅对计划内 (申报了该时段互动计划且有剩余可调度容量) 的电动汽车确定调度优先权, 各电动汽车指标根据式 (2) 标准化之后的决策矩阵结果见表 4, 其中 “—” 表示未在计划内。

表 4 时段 9 初始决策矩阵标准化结果表

Tab. 4 The initial decision matrix standardized results

EV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_1$	1	1	1	1	—	0.25	0.25	0.25	—	0
$F_2$	0.66	0.35	0	0.62	—	0.75	0.28	0.65	—	0.41
$F_3$	0.05	0.31	0	0.05	—	0.14	0.02	0.24	—	0.02
EV	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$F_1$	0	0	1	1	—	—	0.5	0.5	1	1
$F_2$	1	0.90	0.5	0.84	—	—	0.91	0.40	0.22	0.65
$F_3$	1	0.62	0.07	0.43	—	—	0.02	0.43	1	0.62

根据式 (5) 和式 (6) 得到各指标信息熵  $E_j$  和权重  $w_j$  如表 5 所示。

表 5 时段 9 各指标信息熵和权重

Tab. 5  $E_j$  and  $w_j$  of each index

指标	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$E_j$	0.833 8	0.892 9	0.751 3
$w_j$	0.318 5	0.205 1	0.476 4

根据式 (7) 即可得到各电动汽车优先调度权并排序, 各时段根据优先权由高到低依次调度, 代理商各电动汽车优先权及排序如表 6 所示。用前述调度策略进行调度, 当不考虑备用时, 只需根据目标函数式 (8) 的结果确定调度计划具体控制电动汽车的充放电行为, 9、10、11 三个时段电动汽车调度计划见表 7。其中 1 表示被调度, 0 表示未被调度, “—” 表示未申报该时段调度计划, T1、T2 和 T3 分别代表 9、10、11 三个时段。

表 8 分析了各电动汽车的申报容量及被调度情况, 其中  $S_0$  为申报容量,  $S_1$  为调度容量。

对比表 2 中电动汽车申报信息, 可发现完全未被调用的电动汽车 (编号为 3、5、7、9、10) 至少有两项指标偏低, 且除电动汽车 9 外, 其余诚信度均未超过 0.5, 电池损耗均在 10% 以上; 未完全被调用的电动汽车 (编号为 15、17、18、19) 有一项或以上指标较差, 影响了综合评价价值; 完全被调用的电动汽车各项指标较好且较为均衡。因此, 调度结果较好地反映了用户申报信息的情况, 可实现电动汽车集群的充放电优化控制策略。

在考虑备用时, 需要同时考虑目标函数一和目标函数二。假设电动汽车遵守计划的概率服从正态分布

$N(0.85 \ 0.1^2)$ , 考虑电动汽车裕度为 10% 时, 含备用 的调度结果如表 9 所示。

表 6 各电动汽车优先调度权及排序

Tab. 6 EVs scheduling priority and order

	EV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T1	$V_j$	0.54	0.59	0.39	0.54	—	0.46	0.32	0.48	—	0.30	0.82	0.64	0.52	0.73	—	—	0.49	0.55	0.84	0.77
	排序	8	6	14	9	—	13	15	12	—	16	2	5	10	4	—	—	11	7	1	3
T2	$V_j$	—	—	—	—	0.25	0.61	0.35	0.60	0.11	0.11	—	—	0.47	0.76	0.40	0.69	0.34	0.25	0.68	0.74
	排序	—	—	—	—	11	5	9	6	13	14	—	—	7	1	8	3	10	12	4	2
T3	$V_j$	—	—	—	—	—	—	—	—	0.37	0.37	—	—	—	—	0.36	0.67	0.62	0.52	0.66	0.72
	排序	—	—	—	—	—	—	—	—	6	7	—	—	—	—	8	2	4	5	3	1

表 7 3 个时段电动汽车调度计划

Tab. 7 EVs scheduling plan during 3 hours

EV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T1	1	1	0	1	—	0	0	0	—	0	1	1	1	1	—	—	1	1	1	1
T2	—	—	—	—	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
T3	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	0	—	—	0	1	0	0	0	1

表 8 各时段电动汽车容量调度情况

Tab. 8 Utilization of EVs declared capacity each time

单位: kW

EV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$S_0$	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	14	14	14	14	14	14	21	21
$S_1$	7	7	0	7	0	7	0	7	0	0	7	7	14	14	7	14	7	7	14	21

表 9 含裕度为 10% 的调度计划

Tab. 9 EVs scheduling plan with 10% standby

EV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T1	1	1	1	1	—	1	0	1	—	0	1	1	1	1	—	—	1	1	1	1
T2	—	—	—	—	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
T3	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0	0	—	—	0	1	0	0	1	1

考虑电动汽车裕度分别为 0%、10%、20% 和 30% 时, 各时段调度计划可靠性如表 10 所示。对比 4 种情形可发现, 当不考虑裕度时, 各时段代理商调度可靠性非常低, 随着备用调度的电动汽车规模增加, 代理商调度可靠性也随之增加, 该算例中当备用达到 30% 时, 各时段调度可靠性均超过 90%。4 种备用情形下, 时段 11 的拟调度电动汽车数量均为 3 辆, 故可靠性没有变化。

表 10 4 种情况下的调度可靠性

Tab. 10 Scheduling reliability in four cases

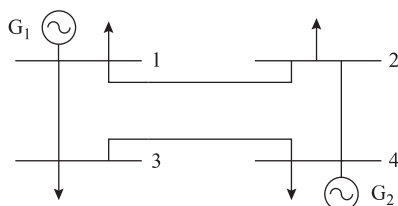
时段	0% 裕度	10% 裕度	20% 裕度	30% 裕度
9	16.11%	68.12%	84.60%	93.39%
10	26.51%	58.91%	81.27%	92.61%
11	71.77%	93.68%	93.67%	93.72%

当数量达到一定规模时, 考虑一定裕度更加适合

各代理商制定调度计划。当电动汽车规模较大时, 由于调度需求较大, 备用的电动汽车数量相对较多, 更加利于改善调度可靠性。

## 5 结论

本文针对电动汽车集群的充放电控制策略, 以多指标综合评价法中的熵权法为基础, 建立基于电动汽车优先调度权的最优充放电调度模型。该模型充分考虑了电动汽车用户的申报容量、申报时段、电池损耗及历史互动情况, 分析了各项指标对调度优先权的影响, 并建立电动汽车调度优先权评价指标体系, 根据熵权法计算各项指标的客观权重及调度优先权。最后通过算例, 对 V2G 调度模型进行分析验证, 对比调度结果可看出, 该模型可有效为电动汽车代理商制定合适的充放电控制计划, 验证了本文提出的电动汽车集群充放电优化模型的可行性和有效性。



附图 1 4 节点系统拓扑结构图

App. Fig. 1 Topologic structure of the 4-bus system

附表 1 4 节点系统线路参数

App. Tab. 1 Line parameters of the 4-bus system

支路编号	首节点	末节点	阻抗( pu)	电抗( pu)	电纳( pu)	潮流上限/MW
1	1	2	0.010 08	0.050 4	0.102 5	5
2	1	3	0.007 44	0.037 2	0.077 5	6
3	2	4	0.007 44	0.037 2	0.077 5	8
4	3	4	0.012 72	0.063 6	0.127 5	7

附表 2 4 节点系统负荷及电压参数

App. Tab. 2 Load and voltage parameters of the 4-bus system

节点编号	1	2	3	4
电压上限( pu)	1.1	1.1	1.1	1.1
电压下限( pu)	0.9	0.9	0.9	0.9

附表 3 4 节点系统发电机参数

App. Tab. 3 Generator parameters of the 4-bus system

机组编号	初始有功/MW	初始无功/Mvar	$P_{\min}$ /MW	$P_{\max}$ /MW	$Q_{\min}$ /Mvar	$Q_{\max}$ /Mvar
$G_1$	10	0	0.5	2.5	-2	2
$G_2$	17	0	0.3	1.5	-1.5	1.5

附表 4 4 节点系统各时段节点负荷数据

App. Tab. 4 Load data of the 4-bus system

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
节点 1 负荷/kW	300	200	300	200	300	400	300	400	500	600	600	400
节点 2 负荷/kW	600	400	300	400	400	600	800	800	1 000	1 100	1 200	900
节点 3 负荷/kW	500	500	400	400	500	700	900	1 100	1 300	1 400	1 500	1 200
节点 4 负荷/kW	200	300	300	300	400	300	300	200	200	300	300	300

## 参考文献

- [1] Saber A Y, Venayagamoorthy G. K. Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with renewables and plug-in vehicles[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 103-109.
- [2] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.  
Liu Xiaofei, Zhang Qianfan, Cui Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [3] Bessa R J, Matos M A. Economic and technical



- management of an aggregation agent for electric vehicles: a literature survey[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2012, 22(3): 334-350.
- [4] Saber A Y, Venayagamoorthy G K. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid-A cost emission optimization[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(3): 898-911.
- [5] Saber A Y, Venayagamoorthy G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [6] 张舒, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车换电站与电网互动的机组组合问题研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(10): 49-55.
- Zhang Shu, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Research on unit commitment considering interaction between battery swapping station and power grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(10): 49-55.
- [7] Kempton W, Tomic J, Letendre S, et al. Vehicle-to-grid power: battery, hybrid, and fuel cell vehicles as resources for distributed electric power in California[EB/OL]. 2001 [2013-10-23]. <http://www.udel.edu/V2G/docs/V2G-Cal-2001.pdf>.
- [8] Gage T B. Development and evaluation of a plug-in HEV with vehicle-to-grid power flow[R]. Sacramento: CA. AC Propulsion, 2003.
- [9] Liu C, Wang J, Botterud A, et al. Assessment of impacts of PHEV charging patterns on wind-thermal scheduling by stochastic unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(2): 675-683.
- [10] Khodayar M E, Wu L, Shahidehpour M. Hourly coordination of electric vehicle operation and volatile wind power generation in SCUC[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1271-1279.
- [11] Lund H, Kempton W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(9): 3578-3587.
- [12] 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.
- [13] 刘文霞, 赵天阳, 邱威, 等. 规模化 EV 充电与风力/火电发电系统协调运行 [J]. *电工技术学报*, 2013, 28(5): 49-57.
- Liu Wenxia, Zhao Tianyang, Qiu Wei, et al. Coordinated operation of large scale electric vehicles charging with wind-thermal power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(5): 49-57.
- [14] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 15-25.
- Xiang Ding, Song Yonghua, Hu Zechun, et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 15-25.
- [15] 张谦, 刘超, 周林, 等. 计及可入网电动汽车最优时空分布的双层经济调度模型 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(20): 40-45.
- Zhang Qian, Liu Chao, Zhou Lin, et al. A bi-level economy dispatch model considering temporal and spatial optimal distribution of electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(20): 40-45.
- [16] 张立军, 袁能文. 线性综合评价模型中指标标准化方法的比较与选择 [J]. *统计与信息论坛*, 2010, 25(8): 10-15.
- Zhang Lijun, Yuan Nengwen. Comparison and selection of index standardization method in linear comprehensive evaluation model [J]. *Statistics & Information Forum*, 2010, 25(8): 10-15.

#### 作者简介

张 谦 女, 1980 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力市场与电力系统安全经济运行、电动汽车与电网互动技术。

蔡家佳 男, 1991 年生, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车与电网互动技术。