

DOI: 10.7667/PSPC180300

# 基于多代理系统的电动汽车充放电分布式协同调度策略

于娜<sup>1</sup>, 于飞<sup>1,2</sup>, 黄大为<sup>1</sup>, 陈厚合<sup>1</sup>, 张鹏宇<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司, 山西 太原 030001; 3. 国网吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 大规模电动汽车(Electric Vehicles, EV)无序充电行为将增加电力系统运行的安全隐患, 而数量庞大的电动汽车充放电优化控制为电力系统能量管控提出了新的挑战。提出一种改进的基于多代理系统(Multi-Agent System, MAS)的电动汽车充放电分布式协同调度方法。该方法以负荷填谷为目标, 在虚拟电价协同机制框架下, 综合考虑了配电网三相负荷平衡、变压器容量约束和节点电压约束, 与 MAS 信息交互机制相结合, 通过采用迭代修正虚拟电价的方法, 实现 EV 有序的智能充放电。以 IEEE33 节点系统为例进行仿真分析, 验证了所提方法的特点和有效性。

**关键词:** 电动汽车; 分布式充放电; 多代理系统; 节点电压; 配电网

## Multi-agent system based charging and discharging of electric vehicles distributed coordination dispatch strategy

YU Na<sup>1</sup>, YU Fei<sup>1,2</sup>, HUANG Dawei<sup>1</sup>, CHEN Houhe<sup>1</sup>, ZHANG Pengyu<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Shanxi Electric Power Survey and Design Co., Ltd., Energy Construction Group of China, Taiyuan 030001, China; 3. State Grid Jilin Electric Power Company Limited, Changchun 130021, China)

**Abstract:** The large-scale Electric Vehicles (EV) uncontrolled charging behavior will increase the safety hazard of the power system operation, and a large number of EV charging and discharging control brings new challenge to energy management of the power system. In this paper, an improved EV charging and discharging distributed coordination dispatch control strategy based on Multi-Agent System (MAS) is proposed. It aims at the valley-filling, under the framework of the virtual price coordination mechanism, considers the distribution network three-phase balance, transformer capacity and node voltage constraint, and combining with MAS information interaction mechanism, adopts iterative correction of virtual price to achieve the intelligent charging and discharging of EV. Taking IEEE33 node system as an example, simulation and analysis verify the characteristics and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307019, No. 51377016, and No. 51477027).

**Key words:** electric vehicle; distributed charging and discharging; multi-agent system; node voltage; distribution network

## 0 引言

大规模 EV 接入电网进行无序充电, 将会对电力系统运行产生诸如负荷峰值增大、节点电压越限、

变压器过载以及三相负荷不平衡等负面影响<sup>[1-2]</sup>。借助车联网(Vehicle to Grid, V2G)技术, 通过制定合理的 EV 充放电策略, 可实现对电网负荷的削峰填谷, 改善电能质量<sup>[3]</sup>。

对此, 国内外学者开展了较为广泛的研究。现有充放电优化调控策略主要分为集中式和分布式控制两类。其优化目标包括配电网网损最小、负荷填谷、负荷方差最小以及电压水平改善等。文献[4]提出了一种 EV 充电实时在线优化方法, 对 EV 群充电过

**基金项目:** 长江学者和创新团队发展计划项目资助 (IRT1114); 国家自然科学基金项目资助 (51307019, 51377016, 51477027); 吉林省科技发展计划资助项目资助 (20130102026JC, 20140101210JC)

程进行优化,以降低配电网网损,但未对 EV 充电需求进行细化。文献[5]以网络负荷填谷为目标,提出一种计及 EV 充电预测的实时充电优化方法,用以解决未入网 EV 的接入对充电优化带来的影响,实现理论上的最优填谷。文献[6]研究了集中充电站、充换电站以及配送站的特性,以综合充电成本最小为目标,合理制定充电计划的同时为系统提供调频辅助服务。文献[7]建立了以网损最小为目标的优化模型,通过协调 EV 充放电降低网损,并证明了优化配电网的网损在一定程度上等价于对负荷方差或负荷率的优化。文献[8]以 EV 充电成本和网损总费用最小为目标,提出一种 EV 充电负荷管理方法,实现网损最小和改善节点电压水平。文献[9]以 EV 聚合商利润最大为目标,通过 V2G 技术实现对 EV 充电功率的优化调度,并通过向电网提供辅助服务获取收益。文献[10]对比了 EV 无序充电、充电量总和最大以及用户充电成本最小三种调度策略,研究了不同控制策略下 EV 功率需求以及网络节点电压变化问题。以上关于 EV 充放电负荷与调度控制策略均为集中式管理,其弊端是在 EV 规模庞大时,优化问题变得异常复杂,难以实现。相较 EV 集中式管理模式,分布式充放电调度策略可以将集中式优化计算问题进行分解,降级为求解其子问题,使优化问题简单化,从而提高问题求解效率,与“即插即用”的管控理念更加契合。为此,国内外学者提出了多种 EV 分布式充放电优化调度策略<sup>[11]</sup>,用于改善 EV 的协同调度。基于平均场博弈(Mean-field Game, MFG)理论与纳什确定性准则(Nash Certainly Equivalence Principle, NCEP)的分布式协同方法得到广泛应用。这类方法均属于基于虚拟价格的交互式控制策略,且这种信息的交互需要网侧和用户间进行多次协调,以达到一定的控制目标。文献[12]将 EV 的充电行为描述为 MFG 问题,从而有效控制 EV 充电速率以减少充电费用。文献[13]提出一种基于纳什均衡的分布式协同方法,改变 EV 充电时段实现夜间负荷填谷。文献[14]基于 MFG 理论给出虚拟价格的形成机制,并提出网侧与用户侧信息交互方式,实现 EV 充电的分布式优化管理;文献[15]在此基础上建立了基于 MAS 的分布式控制的 EV 充放电优化模型,并结合新能源发电入网提高 EV 在配电网中的渗透率。上述分布式协同优化方法均建立了体现网络负荷变化的虚拟电价机制,实现了负荷填谷,但均未考虑配电网安全约束的问题,在优化过程中可能会出现因三相 EV 充放电导致的负荷不平衡以及配网中特殊节点变压器过载和节点电压过低的现象。

多代理系统(Multi-Agent System, MAS)具有自治性、社会性、反应性和主动性,被广泛应用于电力需求响应领域<sup>[16]</sup>。MAS 由多个层级子代理系统构成,不同 Agent 性能有所不同,如通信辅助 Agent 或向系统提供调峰调频辅助服务的 Agent 等。文献[17]设计了一种协调 EV 充电的 MAS,利用分时电价机制,以负荷峰谷差最小为目标对 EV 充电行为进行分布式控制。文献[18]提出了一种基于多代理系统的虚拟价格迭代交互机制,实现负荷率最大。文献[19]利用 MAS 协调 EV 充电行为,结合网络电压约束,实现用户充电成本最小。

基于以上研究,本文提出一种基于 MAS 技术的 EV 充放电分布式协同调度策略,通过建立信息交互机制,将集中式充放电优化问题分解为交互式的分布式充放电优化问题,即将 EV 集群充放电优化计算转化为单个用户的优化计算,规避 EV 集中式充放电优化计算量大的缺点。所提控制策略依据纳什确定性等价原理,通过在单个 EV 充放电优化问题的目标函数中增加惩罚项,解决三相负荷不平衡问题;并利用相邻两次迭代 EV 功率的收敛特性,对变压器容量约束与节点电压约束进行近似处理,从而将集中式优化中的耦合约束转化为弱耦合约束,并将该约束应用于单个 EV 充放电过程中,保证电网安全运行的前提下,实现 EV 充放电的负荷填谷。通过算例分析,验证了文中提出 EV 充放电策略的特点与有效性。

## 1 集中式充放电优化

### 1.1 目标函数

区域内 EV 接入电网后接受区域调控中心的集中式充放电管控,其初始时刻的荷电状态(State of Charge, SOC)、离网时间等基本参数信息由区域调控中心获取,区域调控中心在一个调度周期内以系统负荷填谷为目标对 EV 进行充放电控制。所构建模型可应用于 EV 日前充放电优化调度或 EV 实时滚动控制的开环充放电优化<sup>[20]</sup>,模型的目标函数表示为

$$\min f = \sum_{t=1}^T U \left( \sum_{i=1}^N (P_c(i,t) - P_d(i,t)) + D(t) \right) = \sum_{t=1}^T \left( \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^N (P_c(i,t) - P_d(i,t)) + D(t) \right) \right)^2 \quad (1)$$

式中:  $T$  为所研究周期的时段数;  $N$  为充电汽车数;  $P_c(i,t)$  为第  $i$  辆 EV 在  $t$  时段的充电功率;  $P_d(i,t)$  为第  $i$  辆 EV 在  $t$  时段的放电功率;  $D(t)$  为配电系统  $t$  时段的常规负荷。式(1)可确保 EV 充放电实现负荷填

谷的目标。

## 1.2 约束条件

### 1) 充放电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_c(i, t) \leq P_{\max}(i) \\ 0 \leq P_d(i, t) \leq P_{\max}(i) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P_{\max}(i)$  为第  $i$  辆 EV 充放电功率的最大值。

### 2) 电量需求约束

$$\sum_{t=1}^{T_i-1} \left( P_c(i, t) \eta(i) - \frac{P_d(i, t)}{\eta(i)} \right) - W_{\text{trip}}(i) \geq 0 \quad (3)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  辆 EV 的离网时段;  $\eta(i)$  为第  $i$  辆 EV 的充放电效率;  $W_{\text{trip}}(i)$  为第  $i$  辆 EV 一天中行驶电量需求。式(3)能够确保接入系统的每辆 EV 在最后时段电池充满电。

### 3) 充放电逻辑约束

$$P_c(i, t) \cdot P_d(i, t) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_c(i, t) = 0 \\ P_d(i, t) = 0 \end{cases} \quad T_i \leq t \leq T \quad (5)$$

约束式(4)确保 EV 在某一时段不可同时进行充电和放电; 式(5)表示第  $i$  辆 EV 在时段  $[T_i, T]$  内不受控, 即充放电功率均为零。

### 4) 用户提供 V2G 服务约束

$$\sum_{t=1}^{T_i-1} \frac{P_d(i, t)}{\eta(i)} - \rho(i) \cdot c_{\text{bat}}(i) \leq 0 \quad (6)$$

式中:  $\rho(i)$  为用户选择提供放电服务电量占电池的百分数;  $c_{\text{bat}}(i)$  为电池容量。EV 可提供的放电量受电池允许的放电深度限制<sup>[21-22]</sup>, 用户通过约束式(6)限定放电量, 从而减少对电池寿命的损耗。

### 5) 充电 SOC 约束

$$SOC(i, t) + \frac{P_c(i, t) \cdot \eta(i)}{c_{\text{bat}}(i)} - 1 \leq 0 \quad 0 \leq t < T_i \quad (7)$$

式中,  $SOC(i, t)$  为第  $i$  辆 EV 在时段  $t$  电池荷电状态。

### 6) 放电 SOC 约束

$$\lambda - SOC(i, t) + \frac{P_d(i, t)}{\eta(i) \cdot c_{\text{bat}}(i)} \leq 0 \quad 0 \leq t < T_i \quad (8)$$

式中,  $\lambda$  为电池最低荷电状态, 用以保证电池寿命。

### 7) 网络三相负荷平衡约束

配电网中三相负荷平衡常用负序电压与正序电压的比值表述, 但为了使约束条件线性化, 本文采用各相负荷与三相负荷平均值定义三相不平衡度。

$$\frac{\left| P_{\phi}(t) - \frac{1}{3}(P_A(t) + P_B(t) + P_C(t)) \right|}{\frac{1}{3}(P_A(t) + P_B(t) + P_C(t))} \leq \zeta \quad (9)$$

式中:  $P_{\phi}(t) = D_{\phi}(t) + P_{c\phi}(t) - P_{d\phi}(t)$ , 其中  $\phi \in \{A, B, C\}$ ,

$D_{\phi}(t)$  表示时段  $t$  的某单相常规负荷,  $P_{c\phi}(t)$  表示时段  $t$  的某一相 EV 充电负荷,  $P_{d\phi}(t)$  表示时段  $t$  的某一相 EV 放电负荷;  $\zeta$  为三相负荷最大不平衡度。

### 8) 变压器容量约束

为了确保配电网安全稳定运行, 应避免网络中变压器发生过载<sup>[23]</sup>。配网中第  $n$  个节点变压器最大视在功率应满足式(10)。

$$\left( P_n^l(t) + P_n^{\text{EV}}(t) \right)^2 + \left( Q_n^l(t) + Q_n^{\text{EV}}(t) \right)^2 \leq \left( S_n^{\max} \right)^2 \quad (10)$$

式中:  $P_n^l(t)$  和  $Q_n^l(t)$  分别为  $n$  节点变压器  $t$  时段的常规有功负荷与无功负荷;  $P_n^{\text{EV}}(t)$  为节点  $n$  接入的 EV 在  $t$  时段总充电功率;  $Q_n^{\text{EV}}(t)$  为节点  $n$  接入智能充电设备  $t$  时段发出的无功功率;  $S_n^{\max}$  为节点  $n$  变压器的最大视在功率。

### 9) 节点电压约束

配电网中大量 EV 无序充电可能导致节点电压下降越限, 影响电能质量。节点电压应满足如下约束。

$$V_n^{\min} \leq V_n(t) \leq V_n^{\max} \quad (11)$$

式中:  $V_n(t)$  为  $t$  时段节点  $n$  电压有效值;  $V_n^{\min}$  和  $V_n^{\max}$  分别为节点  $n$  的最小最大电压有效值限值。

网络节点电压对节点功率的灵敏度描述了节点功率变化对节点电压的影响<sup>[24]</sup>,  $t$  时段节点  $n$  电压  $V_n(t)$  大小近似表达如下。

$$V_n(t) \approx V_n^{\text{base}}(t) + \sum_m \left( \mu_{n,m}^P(t) \Delta P_m(t) + \mu_{n,m}^Q(t) \Delta Q_m(t) \right) \quad (12)$$

式中:  $\mu_{n,m}^P(t)$  和  $\mu_{n,m}^Q(t)$  分别为节点  $n$  电压对节点  $m$  注入有功功率和无功功率的灵敏度;  $V_n^{\text{base}}(t)$  为仅有常规负荷下  $t$  时段节点  $n$  的电压;  $\Delta P_m(t)$  和  $\Delta Q_m(t)$  分别为  $t$  时段节点  $m$  的有功无功功率变化量, 此处特指节点  $m$  的 EV 充放电功率。

由 EV 的集中式充放电优化模型可知, 约束条件 1)~6) 为相对独立的 EV 充放电约束, 而约束条件 7)~9) 则是具有一定耦合关系的网络约束。EV 的分布式充放电管控策略的关键就是如何处理这些具有耦合关系的约束条件。网络约束除了以上不等式约束外, 区域调控中心还需考虑各时段节点功率平衡约束, 具体如下。

### 10) 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_n(t) = V_n(t) \sum_j V_j(t) (G_{nj} \cos \theta_{nj}(t) + B_{nj} \sin \theta_{nj}(t)) \\ Q_n(t) = V_n(t) \sum_j V_j(t) (G_{nj} \sin \theta_{nj}(t) - B_{nj} \cos \theta_{nj}(t)) \end{cases} \quad (13)$$

式中： $j$  为与节点  $n$  存在相连支路的节点； $P_n(t)$ 、 $Q_n(t)$ 、 $V_n(t)$  分别为  $t$  时段节点  $n$  的注入有功功率、无功功率和电压幅值； $G_{nj}$  和  $B_{nj}$  分别为互导纳的实部和虚部； $\theta_{nj}(t)$  为  $t$  时段支路首末端相角差。

## 2 分布式充放电优化

### 2.1 配网中 EV 充放电的 MAS 管控结构

分层的 EV 充放电管控结构如图 1 所示，MAS 由三个层级的 Agent 构成，分别为电网 Agent、区域 Agent、用户 Agent，它们具备各自相对独立的功能，在一定的信息交互机制下，实现对 EV 充放电的分布式管理。

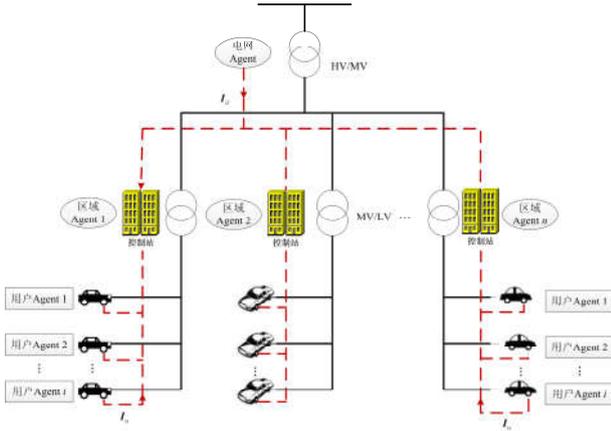


图 1 MAS 结构框图

Fig. 1 Structure block diagram of multi-agent system

图中实线表示设备间的拓扑，虚线则表示信息传递。其中： $I_d$  表示电网 Agent 传递给用户的信息集合， $I_d = \{I_d^S, I_d^R\}$  由所有用户的共享信息  $I_d^S$  和用户局部信息  $I_d^R$  组成； $I_u$  表示用户 Agent 上传信息集合，主要包括常规负荷信息、EV 初始荷电状态 (SOC)、基本参数以及每次迭代的充放电功率数据。电网 Agent 的作用是收集每次迭代的 EV 充放电功率数据，按照一定规则计算虚拟电价、三相负荷不平衡量等单个 EV 充放电优化所需参数，并将此信息通过区域 Agent 传递给用户 Agent；同时依据相邻两次虚拟价格信息计算交互迭代的收敛性判据。区域 Agent 的作用主要是辅助通信作用，一方面接收电网 Agent 制定的虚拟电价信号等信息，并将其发送给用户 Agent；同时，收集本区域(台区内 EV 充放电功率)信息，将其上传给电网 Agent；用户 Agent 的作用则是根据电网 Agent 提供的虚拟电价等信息，优化自身用电需求，实现虚拟价格下的“充电成本”最小化，并将本次信息交互下的充放电功率经区域 Agent 上传给电网 Agent。

### 2.2 纳什确定性准则在 EV 充放电中的应用

纳什均衡通常又被称为非合作博弈均衡，是一种策略组合，使得同一时间内每个代理的策略是对其他代理策略的最优反应。文献[25]将 NCEP 应用于弱耦合随机控制系统中，研究了各主体之间的博弈行为，其中单个用户的成本受其他个体成本平均值的影响，所建立的纳什均衡使每个代理针对自身状态和所有代理平均轨迹做出最佳反应。图 1 中，各用户 Agent 间的充电行为就是 NCEP 的一种体现，其中单个用户 Agent 充电功率曲线的变化将通过虚拟电价影响其他 Agent 的充电轨迹，通过用户 Agent 的互相博弈并借助电网 Agent、区域 Agent 的相互协调最终达到动态平衡，在该平衡下各用户 Agent 的充放电功率曲线将不再变化，并依据该功率曲线对电动汽车的充放电功率进行调控。

### 2.3 Agent 的数学模型

#### 2.3.1 电网 Agent

电网 Agent 在获取常规负荷的基础上，要实现将 EV 充电时段最大限度地引导至用电低谷时期；而在系统用电高峰时期，通过一定的激励机制，引导 EV 向电网放电，从而平滑负荷，确保系统安全稳定运行。其中，以负荷填谷为目标的数学模型如式(1)所示。由于单个 EV 的充放电功率对系统负荷的影响甚微，可将各辆 EV 的充放电行为看作 MFG 下的博弈行为，基于 NCEP 可通过反映负荷变化的虚拟电价来构建 EV 充放电的均衡策略<sup>[15]</sup>。

电网 Agent 根据自身的控制目标制定全局共享信息  $I_d^S$  和局部信息  $I_d^R$ ，以此作为控制信号来指导用户 Agent 的充放电行为。其中  $I_d^S$  为虚拟价格信号， $t$  时段的虚拟电价  $p$  具体表达式为

$$p\left(t, D(t), \sum_{i=1}^N P_c(i, t), \sum_{i=1}^N P_d(i, t)\right) = \gamma \cdot \nabla U \left( D(t) + \sum_{i=1}^N P_c(i, t) - \sum_{i=1}^N P_d(i, t) \right) \quad (14)$$

式中：系数  $\gamma$  的取值范围是  $0 < \gamma \leq 1/N\beta$ ， $\beta$  是利普希茨常数，从而确保分布式充放电优化过程收敛。虚拟价格随常规负荷与 EV 充放电发生变化，负荷需求大时，价格信号较高。

局部信息  $I_d^R = \{\sigma^k, P_{n,-i}^k, V^{base}, \mu\}$ 。 $\sigma^k$  表示第  $k$  次迭代中传递给不同 EV 不同时间段的三相负荷不平衡修正量信息； $P_{n,-i}^k$  表示第  $k$  次迭代中传递给与第  $i$  辆 EV 处于同一节点的其他 EV 充放电功率信息，下标  $n$  表示节点， $-i$  表示除第  $i$  辆 EV 以外的其他 EV； $V^{base}$  表示由电网 Agent 传递给各区域 Agent 和用户 Agent 的节点电压信息，节点  $n$  的电压基值

仅依据常规负荷数据通过潮流计算获得;  $\mu$  表示节点电压对功率灵敏度参数。

EV 接入电网进行充放电的过程中, 要考虑接入各相 EV 数量不同时产生的三相负荷不平衡问题。分布式控制过程中, 需要对三相负荷平衡约束作进一步处理, 根据式(9), 三相负荷不平衡度  $\zeta = 0$  时, 可得出任意一相因 EV 充放电导致的不平衡量为  $\frac{1}{2} \sum_{\delta} P_{\delta}^{k-1}(t) - P_{\phi}^{k-1}(t)$ , 其中各相上任意一台 EV 需要承担由于充放电导致的三相负荷不平衡量近似表达式为

$$\sigma^k(i, t) = \frac{\frac{1}{2} \sum_{\delta} P_{\delta}^{k-1}(t) - P_{\phi_i}^{k-1}(t)}{N_{\phi_i}} \quad (15)$$

式中:  $\sigma^k(i, t)$  为第  $i$  辆 EV 在时段  $t$  第  $k$  次迭代所计及的三相负荷不平衡修正量;  $P_{\phi_i}^{k-1}(t)$  为第  $i$  辆 EV 所在相在时段  $t$  第  $k-1$  次迭代时的负荷;  $P_{\delta}^{k-1}(t)$  为其余相在时段  $t$  第  $k-1$  次迭代时的负荷;  $N_{\phi_i}$  为第  $i$  辆 EV 所接入相的 EV 数量, 其中  $\phi_i \in s = \{A, B, C\}$ ;  $\delta = \phi_i$ 。

$P_{n,-i}^k$  中各元素的具体表达为

$$P_{n,-i}^k(t) = \sum_{j \in n, j \neq i} [P_c^{k-1}(j, t) - P_d^{k-1}(j, t)] \quad (16)$$

式中:  $j \in n$  表示接入节点为  $n$  的 EV;  $P_c^{k-1}(j, t)$  和  $P_d^{k-1}(j, t)$  分别为第  $k-1$  次迭代、第  $j$  辆 EV 在  $t$  时段的充电功率和放电功率。

### 2.3.2 用户 Agent

用户 Agent 根据每次迭代电网 Agent 经区域 Agent 下达的虚拟价格控制信号, 在满足 EV 充放电约束条件下优化自身充放电行为, 实现自身充放电费用最小。这一子优化问题关键需要处理如集中优化中如式(9)一式(11)的耦合约束。

首先通过在目标函数中增加惩罚项处理三相平衡约束, 用户 Agent 充放电优化模型的目标函数为

$$\begin{aligned} \min \{ & J_i^k [t, p^k(t), P_c^k(i, t), P_d^k(i, t), P_c^{k-1}(i, t), P_d^{k-1}(i, t), \sigma^k(i, t)] \} = \\ & \min \sum_{t=1}^T \{ p^k(t) \cdot [P_c^k(i, t) - P_d^k(i, t)] + \\ & \frac{1}{2} [P_c^k(i, t) - P_d^k(i, t) - (P_c^{k-1}(i, t) - P_d^{k-1}(i, t) + \sigma^k(i, t))]^2 \} \end{aligned} \quad (17)$$

式中:  $J_i^k(\cdot)$  为第  $i$  辆 EV 第  $k$  次迭代过程中的充放电优化目标函数;  $p^k(t)$  为在时段  $t$  第  $k$  次迭代的充放电电价;  $P_c^k(i, t)$  和  $P_d^k(i, t)$  分别为第  $i$  辆 EV 在时段  $t$  第  $k$  次迭代的充电功率和放电功率。

式(16)中第一部分表示虚拟电价下的充放电成本, 第二部分表示对前后两次优化充放电功率以及三相不平衡的惩罚项, 该惩罚项一方面加强了交互迭代的收敛性, 另一方面将集中优化中的三相负荷平衡约束以罚函数的形式在分布式优化中加以考虑。在三相负荷均衡的情况下, 不平衡修正量  $\sigma^k(i, t)$  为零, 否则根据不平衡量对前一次充放电功率进行修正, 进而改变当前次充放电功率。当  $\sigma^k(i, t) = 0$  且同一时段前后两次充放电功率相等时, 惩罚项将不产生作用。相较文献[15], 目标函数中增加不平衡惩罚项后, 其仍然为凸函数, 满足采用基于 NCEP 的虚拟价格理论构建 EV 充放电均衡策略的条件, 当  $\gamma$  的取值范围为  $0 < \gamma \leq 1/N\beta$  时, 分布式优化是收敛的, 详细证明见文献[15]的附录。

子优化模型中约束条件分为 EV 用户自身约束和配电系统网络约束。其中用户电力需求约束同式(2)一式(8)。网络约束主要考虑节点变压器容量约束和节点电压约束, 本文只考虑有功功率的变化, 不计充电桩发出的无功功率, 其中节点电压约束根据电压对功率灵敏度关系进行表述。

网络中某节点所接 EV 进行智能充放电时, 在迭代优化的过程中, 各时段充放电功率随着迭代次数的增加趋于收敛, 由此, 根据约束式(10), 定义网络中某节点第  $i$  辆 EV 在时段  $t$  的充放电约束表达式为

$$P_c^k(i, t) - P_d^k(i, t) + P_{n,-i}^k(t) + P_n^l(t) \leq P_n^{\max} \quad i \in n \quad (18)$$

式中:  $P_n^{\max}$  为节点  $n$  处变压器的最大有功功率;  $P_n^l(t)$  为节点  $n$  处  $t$  时段常规有功负荷。由式(18)可知, 对于第  $i$  辆 EV 在  $k$  次迭代的子优化问题, 近似用  $k-1$  次迭代的其他 EV 充放电功率替代第  $k$  次迭代的功率, 对于该子优化问题, 约束式中只有  $P_c^k(i, t)$  与  $P_d^k(i, t)$  为决策变量。

根据节点电压对有功功率灵敏度定义, 结合约束式(12)及式(16), 节点  $n$  第  $i$  辆 EV 在时段  $t$  的节点电压约束如下所示。

$$V_n^k(t) \approx V_n^{\text{base}}(t) + \sum_m \mu_{n,m}^P (P_c^k(i, t) - P_d^k(i, t) + P_{n,-i}^k(t)) \quad (19)$$

网络中节点电压大小应满足如下条件。

$$V_n^{\min} \leq V_n^k \leq V_n^{\max} \quad (20)$$

式中,  $V_n^k(t)$  为第  $k$  次迭代  $t$  时段节点  $n$  的电压有效值。

## 3 仿真流程

电动汽车分布式充放电管控结构中各级 Agent 的工作过程如下所示:

1) 设第一次迭代 EV 充放电功率均为零, 电网 Agent 根据电网常规负荷与 EV 基本参数按照式(13)一式(15)计算并生成信息集  $I_d$ , 并将该信息经区域 Agent 发送至用户 Agent。

2) 用户 Agent 根据信息集  $I_d$  依据式(17)一式(20)及如式(2)一式(8)所述的充放电约束, 对自身用电行为进行优化, 从而生成本次交互迭代的充放电功率信息。

3) 电网 Agent 根据常规负荷数据和 EV 各时段总的充放电功率进行常规潮流计算, 求取各个负荷节点电压并制定新的电价  $p_\phi^{k+1}$  和  $\sigma_\phi^{k+1}$ , 并判断是否满足收敛判据:  $|p_\phi^{k+1} - p_\phi^k| < \varepsilon$ 、 $\sigma_\phi^{k+1} < \varepsilon'$  以及  $\Delta V_n^k < \varepsilon''$ 。

4) 否则进行下一次迭代, 重复步骤 1)—3)。

电网 Agent 与用户 Agent 之间的交互行为是一个反复迭代的过程, 在此过程中, 电网 Agent 制定的虚拟价格信号随着迭代次数的增加趋于收敛, 同时, 该虚拟价格信号收敛会促进 EV 充放电负荷趋于收敛。迭代过程结束后, 按照优化结果对 EV 进行充放电管理。

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

采用 IEEE33 节点系统, 对本文中提出的 EV 分布式充放电优化策略进行验证。假设配网内共有 205 辆 EV, 相对均匀地分布在各个节点, 其中 80 辆 EV 一天行驶电量需求  $W_{\text{trip}} = 55\%$ , 选择提供放电服务电量占电池的百分数  $\rho = 20\%$ , 80 辆 EV 一天行驶电量需求  $W_{\text{trip}} = 65\%$ , 选择提供放电服务电量占电池的百分数  $\rho = 15\%$ , 45 辆 EV 一天行驶电量需求  $W_{\text{trip}} = 70\%$ , 选择提供放电服务电量占电池的百分数  $\rho = 10\%$ 。

从 0 时刻对已入网的 EV 进行有序充放电优化, 用户的离网时间设定为 7—24 h 间的均匀分布随机数, 其电池容量均为 21 kWh, 充放电功率最大值为 3 kW, 智能充电机电能量转换效率为 0.85, EV 初始荷电状态取 0.2~0.6 间均匀分布的随机数, 最低荷电状态为 0.2。设系统在日负荷高峰时, 总负荷为 3715 kW+j2300 kvar, 功率基准值取 10 MVA, 电压基准值取 12.66 kV, 其中 17 节点负荷为 90 kW+j40 kvar; 每户居民平均用电功率为 4 kW, 总用户数为 929 户, 为验证相应的容量约束, 设系统中 1—3 时段 17 节点常规负荷接近变压器额定容量, 其余时段与网络常规负荷相同。

### 4.2 仿真结果分析

根据文中提出的控制策略, 考虑用户自身用电需求约束以及网络安全约束, 以负荷填谷为目标, 研究 EV 充放电对系统运行产生的影响。文中虚拟价格收敛条件为  $\varepsilon = 0.001$ , 为能够保证 EV 分布式充放电优化过程的收敛特性,  $\gamma$  按照  $0 < \gamma \leq 1/N\beta$  的基本原则取值<sup>[14]</sup>, 对于不同充放电负荷水平其取值不同, 本文设置虚拟电价系数  $\gamma = 0.045$ 。三相负荷不平衡度收敛条件为  $\varepsilon' = 0.045$ 。

#### 4.2.1 集中式与分布式优化结果对比

根据集中式优化模型和本文所提的基于 MAS 技术的分布式优化策略, 分别对接入系统的 EV 充放电进行优化调度, 所得充放电功率曲线分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

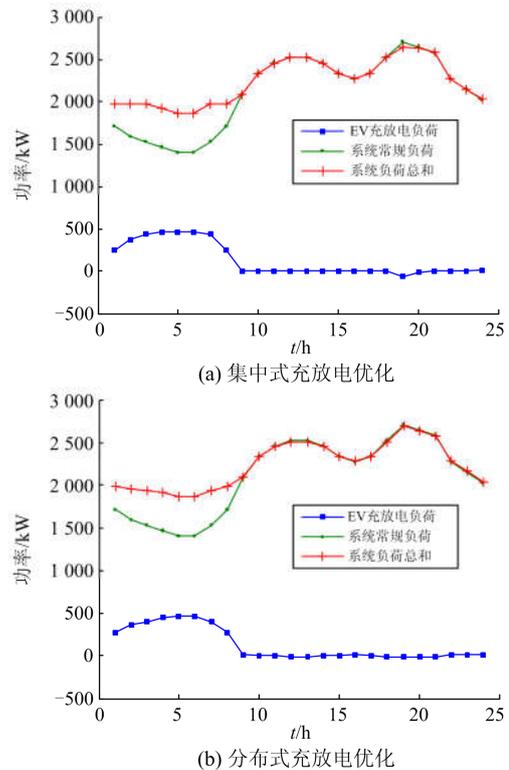


图 2 两种优化策略下系统负荷变化曲线

Fig. 2 Demand profile of the IEEE33 system of two optimization strategies

由图 2 可知, 两种方法所得 EV 充放电方案均能反映负荷填谷的优化目标; 分布式优化所得 EV 充放电功率曲线总体趋势与集中优化结果相近, 这种差别主要是由于本文所提分布式优化方法对耦合约束的近似处理所导致的。但理论上, 即使不考虑诸如三相功率平衡等系统耦合性约束, 根据 NCEP, 也只有在 EV 数量足够多(趋于无穷)且  $\varepsilon \rightarrow 0$  的情

况下两者调度结果才会完全相同<sup>[13]</sup>。

两种优化调度策略下,系统三相负荷不平衡度变化情况如图 3(a)和图 3(b)所示。

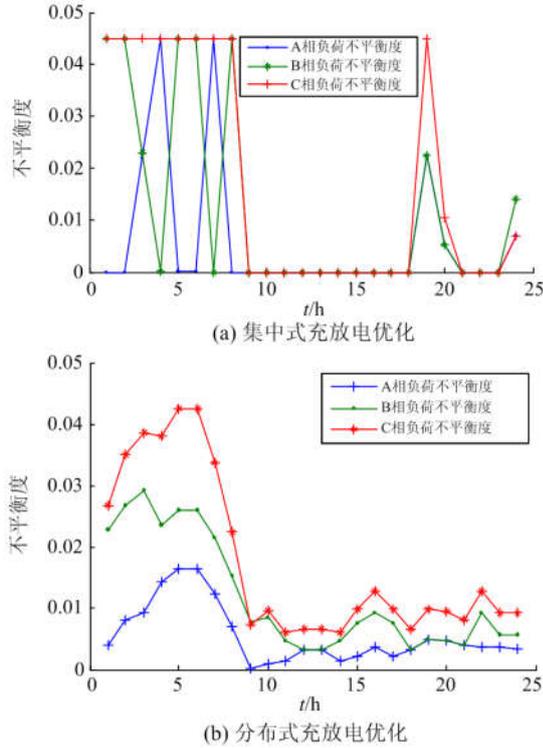


图 3 两种优化策略下三相负荷不平衡度变化曲线  
Fig. 3 Profiles of three-phase load unbalance degree of two optimization strategies

由图 3 可知,两种方法所得的不平衡度指标曲线有较大差异,但均满足不平衡度约束条件。由于分布式优化方法将三相负荷平衡约束以惩罚项的形式附加于单个 EV 的充放电优化模型中,在有限的迭代过程中各相的充放电功率是通过虚拟价格间接协调的,这将导致两种方法所计算的各相 EV 充放电功率的差异。由于分布式优化中单个 EV 充放电功率调整均采用如式(14)的不平衡修正量计算方法,图 3(b)中的 A、B、C 三相负荷不平衡度曲线具有相似的变化规律。

#### 4.2.2 网络约束对 17 节点负荷变化的影响

1) 无网络约束的情况下系统中 17 节点负荷变化。

在假设系统中 1—3 时段 17 节点常规负荷接近变压器额定容量的前提下,如果不考虑节点变压器容量约束,仍然按照虚拟价格机制对 EV 充放电进行管控,将导致 17 节点在 1—3 时段变压器出现短暂过载现象。

2) 有网络约束的情况下系统中 17 节点负荷变化。负荷曲线如图 4(a)和图 4(b)所示。

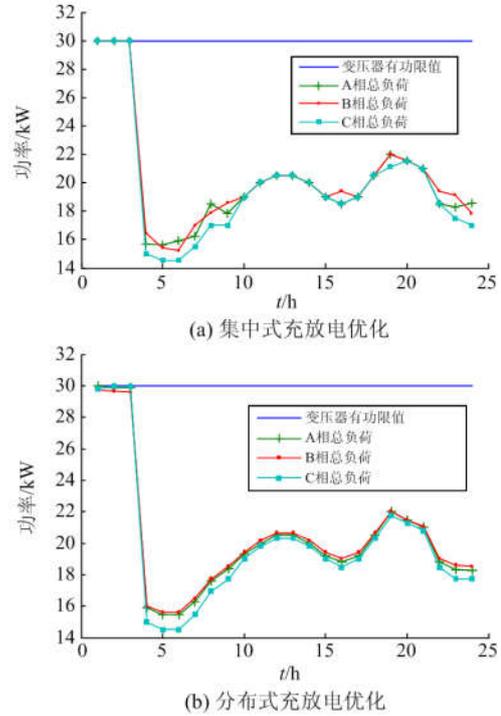


图 4 两种优化策略下系统中 17 节点三相负荷变化曲线  
Fig. 4 17th node three-phase load profiles of IEEE33 system of two optimization strategies

由图 4(a)可知, EV 集中式充放电优化时,由于增加了节点变压器容量约束,所以 17 节点在 1—3 时段节点负荷降至变压器额定容量范围之内,从而提高系统运行安全;图 4(b)中, EV 分布式充放电优化也因增加节点变压器容量约束,得到与图 4(a)相近的优化结果,即节点负荷均处于变压器额定容量范围之内。

#### 4.2.3 集中优化与分布式优化计算时间对比

本文仿真用计算机配置为: Intel(R) Core(TM) i7-6700 CPU @ 3.40 GHz RAM: 16 GB。两种优化方法计算时间如图 5 所示。

由图 5 可知,集中式优化时,随着电动汽车数量的增加,优化计算时间随之延长,这是由于此时需要处理的优化变量和约束条件增加所致。而分布式优化计算时间约为 210 s,这种差别主要是由于本文所提分布式优化方法将电动汽车集群进行分区分单元处理,将复杂的集中式优化计算转化为单个用户单元的并行计算问题。分布式优化迭代一次的时间约为 10 s,其中单个用户单元优化计算时间为 0.3 s,聚合商与电动汽车间的通信时间约为 9 s<sup>[18]</sup>。

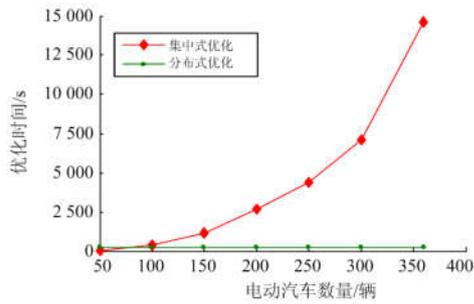


图5 两种优化方法计算时间对比

Fig. 5 Comparison of computation time of two optimization methods

为了便于对比分析, 根据网络约束将 EV 充放电策略分为以下 4 种场景。场景 1: 考虑网络约束时 EV 集中式优化; 场景 2: 考虑网络约束时 EV 分布式优化; 场景 3: 不考虑网络约束时 EV 集中式优化; 场景 4: 不考虑网络约束时 EV 分布式优化。不同情形下优化结果见表 1 所示。

表 1 不同场景下优化结果对比

Table 1 Comparison of optimized results with different scenarios

场景	峰谷	不平衡度	节点有功	节点电压下降
	差率/%	最大值/%	负荷峰值/kW	最大值/%
1	29.4	4.5	90	0.89
2	31.2	4.43	89.4	0.87
3	27.7	23.8	95.2	1.31
4	28.2	7.1	96.9	0.95

表中峰谷差率含义为峰谷负荷差值与峰荷的比值。由表 1 可知: 场景 2 较场景 1 峰谷差率高 1.8%, 已十分接近集中式优化的结果; 计及网络约束的情况下, 三相负荷不平衡度值小于本文设定的 4.5%; 变压器运行在额定容量范围内, 从节点电压下降最大值占比上看, 分布式优化与集中优化结果相近。场景 4 较场景 3 峰谷差率高 0.5%, 分布式优化效果与集中式优化相近; 在优化过程中未考虑网络约束, 导致三相负荷不平衡度值较大, 并且 17 节点变压器出现过载现象, 严重时超过有功限值的 7.6%, 场景 4 根据虚拟电价进行充放电, 节点电压波动略小于场景 3。场景 1 和场景 2 的峰谷差率均高于场景 3 和场景 4, 但在三相负荷平衡、节点变压器容量以及节点电压下降方面均优于场景 3 和场景 4, 与实际情况相符。

## 5 结论

本文提出一种基于 MAS 技术的 EV 分布式充放电协同调度策略, 以负荷填谷为目标, 实现了 EV 充放电的分布式电管理。以 IEEE33 节点系统为例

进行分析, 验证了所提方法的有效性和特点, 可得到以下结论:

1) 通过建立信息交互机制实现对 EV 进行分布式充放电控制, 引导电动汽车在负荷低谷时期充电, 在负荷高峰时期向系统放电, 进而平滑系统负荷, 最终实现系统负荷削峰填谷。

2) 通过在用户充电成本函数中增加三相负荷平衡的惩罚项, 解决因 EV 充放电行为带来的系统负荷不平衡问题。

3) 借助迭代优化过程中 EV 充放电功率的收敛特性增加节点变压器容量约束和节点电压约束, 避免优化过程中出现变压器过载现象, 保证配网安全运行。

4) 相较集中式优化, 分布式优化可减少计算时间, 提高电动汽车调度效率。

本文仅考虑了 EV 日前充放电调度, 因常规负荷预测和用户接入情况预测或多或少会出现误差, 会导致充放电优化结果具有差异性, 在未来的研究过程中, 可考虑实时调度控制, 从而提高优化的精确性, 还可研究 EV 充放电对网损的影响。

## 参考文献

- [1] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [2] 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.
- [3] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 129-137.  
WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging/discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 129-137.
- [4] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28.  
HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.
- [5] 李正烁, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 计及电动汽车充电预测的实时充电优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 60-68.  
LI Zhengshuo, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Real-time charging optimization method considering vehicle

- charging prediction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 60-68.
- [6] 姚伟锋, 赵俊华, 文福栓, 等. 集中充电模式下的调度汽车调频策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 69-76. YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Frequency regulation strategy for electric vehicles with centralized charging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 69-76.
- [7] 徐浩, 夏鑫珏, 李辉, 等. 计及充电请求预测补偿的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 74-81. XU Hao, XIA Xinjue, LI Hui, et al. An ordered charging strategy for electric vehicles accounting the compensation of predicted charging requests[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 74-81.
- [8] DEILAMI S, MASOUM A S, MOSES P S, et al. Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grid to minimize power losses and improve voltage profile[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 456-467.
- [9] SORTOMME E, EI-SHARKAWI M. Optimal charging strategies for unidirectional vehicle to grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 456-467.
- [10] HOOG J D, ALPCAN T, BRAZIL M, et al. Optimal charging of electric vehicles taking distribution network constraints into account[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 365-375.
- [11] HU JUNJIE, MORAIS H, SOUSA T, et al. Electric vehicle fleet management in smart grids: a review of services, optimization and control aspects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 1207-1226.
- [12] ZHU Z M, LAMBOTHARAN S, CHIN W H, et al. A mean field game theoretic approach to electric vehicles charging[J]. IEEE Access, 2016, 4: 3501-3510.
- [13] MA Z, CALLAWAY D, HISKENS I. Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(1): 67-78.
- [14] GAN L, TOPCU U, LOW S H. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 940-951.
- [15] KARFOPOULOS E L, HATZIARGYRIOU N D. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 329-338.
- [16] 于娜, 于乐征, 李国庆. 智能电网环境下基于多代理的商业用户可控负荷管理策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 1-9. YU Na, YU Lezheng, LI Guoqing. Controllable load management strategy for commercial users based on multi-agent in smart grid environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 1-9.
- [17] 辛昊, 严正, 许少伦. 基于多代理系统的电动汽车协调充电策略[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 48-54. XIN Hao, YAN Zheng, XU Shaolun. Multi-Agent system based coordinated charging strategy for electric vehicles[J]. Power Supply Technology, 2015, 39(1): 48-54.
- [18] KARFOPOULOS E L, HATZIARGYRIOU N D. A multi-agent system for controlled charging of a large population of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1196-1204.
- [19] PAPAPOPOULOS P, JENKINS N, CIPCIGAN L M, et al. Coordination of the charging of electric vehicles using a multi-agent system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1802-1809.
- [20] 李佩杰, 林颂晨, 白晓清, 等. 计及配电网三相模型的电动汽车充电滚动时域控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4533-4542. LI Peijie, LIN Songchen, BAI Xiaoqing, et al. Receding-horizon-control-based charging method of electric vehicle considering three-phase model of distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4533-4542.
- [21] 闫志杰, 张蕊萍, 董海鹰, 等. 基于需求响应的电动汽车充放电电价与时段研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 16-22. YAN Zhijie, ZHANG Ruiping, DONG Haiying, et al. Price and period research of electric vehicles charging and discharging based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 16-22.
- [22] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 127-134. YAN Jun, YAN Feng. An orderly charging and discharging strategy for residential electric vehicles based on peak-valley[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 127-134.
- [23] WECKX S, D'HULST R, CLAESSENS B, et al. Multi-agent charging of electric vehicles respecting distribution transformer loading and voltage limits[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2857-2867.
- [24] RICHARDSON P, FLYNN D, KEANE A. Local versus centralized charging strategies for electric vehicles in low voltage distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (2): 1020-1028.
- [25] HUANG M, MALHAME R, CAINES P. Nash certainty equivalence in large population stochastic dynamic games: connections with the physics of interacting particle systems[C] // 45th IEEE International Conference Decision and Control, December 13-15, 2006, San Diego, CA, USA: 4921-4926.

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-05-28

作者简介:

于娜(1977—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力需求响应; E-mail: yuna0616@163.com

于飞(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力需求响应; E-mail: yufei0925@163.com

黄大为(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统经济与发电企业决策。E-mail: hdw76@163.com

(编辑 葛艳娜)