

电动汽车智能充放电控制与应用综述

贺瑜环¹, 杨秀媛¹, 陈麒宇², 卜思齐³, 徐智蔷⁴, 肖天颖^{5,6}

- (1. 北京信息科技大学自动化学院, 北京市 海淀区 100192; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192; 3. 香港理工大学电机工程学系, 香港 九龙区 999077; 4. 英国南安普顿大学物理工程学院, 英国 南安普顿 SO17 1BJ; 5. 中国科学院电工研究所, 北京市 海淀区 100190; 6. 中国科学院大学, 北京市 海淀区 100049)

Review of Intelligent Charging and Discharging Control and Application of Electric Vehicles

HE Yuhuan¹, YANG Xiuyuan¹, CHEN Qiyu², BU Siqi³, XU Zhiqiang⁴, XIAO Tianying^{5,6}

- (1. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Haidian District, Beijing 100192, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 3. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon District, Hong Kong 999077, China; 4. School of Physical Sciences and Engineering, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK; 5. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100049, China)

摘要: 随着电动汽车规模的增大, 电动汽车接入电网对电力系统运行与控制的影响不容忽视。电动汽车作为一种可控负荷, 对其进行充放电控制可以有效削弱充电负荷带来的不利影响, 同时还能起到削峰填谷、促进新能源消纳的作用, 这将成为电力系统运行控制的一种重要手段。给出了充电负荷建模需要考虑的因素, 总结了建立电动汽车负荷预测模型的方法。归纳了电动汽车参与电网调度的可行方法, 并分析了不同方法的特点。同时, 为了提高电动汽车参与调度的积极性, 介绍了用区块链完成电动汽车电力交易的架构与方法。最后, 对尚未解决的问题和可能的研究方向进行了讨论。

关键词: 电动汽车; 充电负荷; 智能控制; 区块链; 电力系统

ABSTRACT: With the increasing integration scale of electric vehicles, their impact on the operation and control of the power system cannot be ignored. As a controllable load, the charging and discharging control of electric vehicles can effectively weaken the adverse effects brought by the charging load, and can also play a role of peak-shaving and valley-filling, and promote the consumption of new energy, which will become an important means of

power system operation control. The factors to be considered in charging load modeling were firstly given, and the methods for establishing electric vehicle load forecasting models were summarized. Then, the feasible methods of electric vehicle participating in power grid dispatching were reviewed, and the characteristics of different methods were revealed. At the same time, in order to promote the willingness of electric vehicles to participate in dispatching, the architecture and methods of using blockchain to complete electric vehicle power trading were introduced. Finally, the unsolved problems and possible research directions were discussed.

KEY WORDS: electric vehicle; charging load; intelligent control; blockchain; power system

0 引言

近几十年以来, 全球经济的迅猛发展消耗了大量的能源, 特别是以煤炭、石油等为主的传统能源, 造成了大量的污染气体排放, 使得环境问题越来越严重^[1-3]。能源消耗与环境污染已经成为各国不容忽视的问题。传统燃料汽车作为石油消耗方面的重要组成部分, 其所产生的大量尾气已经成为空气污染的主要来源之一。因此, 解决传统汽车造成的污染问题是十分迫切的。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377011)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377011).

电动汽车作为一种新兴的交通工具，以电能作为燃料，其二氧化氮、二氧化硫等污染气体的排放均为零，这对于节能减排方面的工作有着巨大的促进意义。汽车工业的竞争焦点已经向大力研究电动汽车新技术以及如何利用电动汽车促进国家及社会产业发展的方向转变。为了促进并鼓励电动汽车行业的大力发展，各国相继出台了相关政策：美国方面，为提高电动汽车的普及率，由政府拨款、能源部牵头部署，推出了大力建设充电桩等措施；日本方面，为推动电动汽车的发展，推行了减免车辆购置税、对电动汽车充电站进行财政补贴等政策；欧洲方面，特别是德法意三国，为提高电动汽车行业的发展，实施了高补贴、低车辆税、高尾气排放标准等措施；中国政府同样出台了经济扶持、政策优惠、法规标准等相关政策推动电动汽车的发展。

电动汽车对电网运行的影响越来越显著^[4-5]。随着电动汽车在汽车总量中占比的增加，其充电需求在配电网负荷中的占比会越来越大，这将会对电力系统的运行与控制产生不可忽视的影响。由于电动汽车的使用具有较高的同时性，其充电时间也具有较高的同时性，这将会造成电网负荷“峰上加峰”的现象^[6-8]。同时，电动汽车车主的用车习惯会直接影响到负荷充电需求的时空分布，使电动汽车的入网时间、充电功率等都具有随机性，这会使电网的控制更加困难^[9]。

电动汽车的智能控制有利于电网运行。与传统的电力负荷不同，电动汽车具有可中断性和可灵活调度性，可以视为一种新型的可控负荷^[10]。特别是现在出现了电动汽车入网技术(vehicle to grid, V2G)，能够将电动汽车的电能反向回馈给电网，让电动汽车成为一种新型的储能装置。目前关于V2G的技术研究已经有很多，如：文献[11-15]分析了V2G对电网运行的积极影响；文献[16]从经济层面剖析了V2G技术的出现给电网以及用户带来的经济收益；文献[17-19]研究了V2G参与电网调度的控制策略。相较于有序充电，V2G实现了电动汽车与电网之间的能量双向传输，是有序充电的进一步扩展延伸。电动汽车通过参与智能控制进行充放电，在降低车主用电成本的同

时，也会降低电力运营成本，改善电网负荷特性。

电动汽车的充电协议不灵活、充电过程不透明的因素限制了电动汽车用户参与调度的积极性。针对这些问题，专家学者将区块链技术引入了电动汽车的电力交易中。其核心思想是利用区块链的智能合约以及分布式账本技术实现电动汽车电力交易的透明化和可信任化。国外已经在一些智能电网试点中将区块链应用于电动汽车点对点(peer-to-peer, P2P)交易中。德国莱茵集团 RWE 与 Slock.it 合作研发出基于区块链技术的电动汽车 P2P 充电项目，该项目推出了一个基于区块链技术的支付系统 Block Charge，用户直接与机器，而非与人或公司签订合同。日本中部电力有限公司、Nayuta、infoteria 公司一起开展了电动及混合动力车区块链充电试验。国内的专家学者对区块链技术在电动汽车电力交易领域的应用分析同样取得了有效的研究成果。文献[20]提出了基于区块链的充电权交易机制与模型，将区块链引入了充电站充电权的交易中，构建基于区块链的充电权多边交易技术，实现了充电站分布式、去信任化的 P2P 数字资产交易。文献[21]建立了多充电运营商、公用供电公司之间互联互通的交易网络与通道，通过使用拜占庭容错共识算法给出电动汽车充电交易验证方式，并使用智能合约完成电动汽车账户在交易通道上的转账、评价和查询过程。

基于上述背景，本文以电动汽车充电负荷的相关研究为基础，从电动汽车充电负荷的特性与建模、充放电控制策略、电动汽车电力交易等方面展开研究，并指出存在的问题以及可能的研究方向。

1 电动汽车充电负荷

1.1 主要影响因素

电动汽车入网对电网运行的影响取决于充电负荷的需求量以及充电时间。电动汽车的充电负荷主要受电动汽车规模、电池特性、用户充电行为特性以及电动汽车电能补给方式这 4 个方面的影响^[22]。

1.1.1 电动汽车规模

较小规模的电动汽车接入电网时,其充电负荷对电网产生的影响可以忽略不计,但随着电动汽车规模的增加,电动汽车集中充电会给电网带来较大的冲击,增加电网承载负荷的压力。电动汽车的发展规模受多方面因素的影响,其中最大的影响因素是电动汽车/成本的降低及其本身技术的成熟,特别是动力电池成本的降低及其性能指标的提升,将会极大地推动电动汽车的发展与推广。同时,政府部门的政策导向对电动汽车的普及也极为重要。

1.1.2 电池特性

动力电池是电动汽车最主要的部件之一,当前可用于电动汽车的动力电池类型较多,不同类型电池性能对比如表1所示。通过对不同类型电池的比能量、循环寿命、荷电保持状态等方面的对比可以看出,锂离子电池的综合性能最佳。

表1 不同类型电池性能对比
Tab. 1 Performance comparison of different types of batteries

性能	锂离子电池	镍镉电池	镍氢电池
工作电压/V	3.7	1.2	1.2
电池容量	高	低	中
质量比能量/(W·h/kg)	100~160	45	60
体积比能量/(W·h/L)	280	160	210
循环寿命/次	500~1 000	300~700	200~600
放电率/(%/月)	2~5	15~30	25~35
低温性能	较差	优	优
高温性能	优	一般	差
记忆效应	无	有	无

不同类型电动汽车因电池性能不同而差异较大,其性能对比如表2所示。

表2 不同类型电动汽车性能对比
Tab. 2 Performance comparison of different types of electric vehicles

性能	比亚迪 E6	荣威 Ei5	宝马 i3	Model X
最大功率/kW	120	85	125	487
电池容量/(kW·h)	82.0	52.5	42.2	100.0
快充时间/h	1.50	0.67	0.70	1.00
慢充时间/h	8.0	8.5	4.9	10.0
续航里程/km	400	420	340	575
最大扭矩/(N·m)	450	255	250	404

1.1.3 用户充电行为特性

对于用户充电行为特性,不同的用户除了有不同的充电起始时刻以外,其出行链、对电池电量的期望值、日行驶里程等其他用车习惯都具有差异,这增加了电动汽车充电负荷的不确定性和预测难度。电动汽车用户的日行驶里程决定了电动汽车充电负荷的需求量,并且在充电功率一定的条件下,日行驶里程还决定了负荷的充电时长。充电负荷的起始时刻影响着电网负荷的波动性,当大量电动汽车集中充电时,会增大等效负荷波动,此时电网运行的稳定性也较差。

1.1.4 电动汽车电能补给方式

目前,电动汽车的电池主要通过充电和换电2种方式进行能量补给。充电方式下电动汽车电池通过充电接口入网充电,根据充电功率不同可以分为快充和慢充^[23]。充电方式的建设成本低,但充电时间较长,且在电动汽车充电时间较集中时,会对电网产生较大的冲击,不利于电网的运行与控制。换电方式相较于充电方式更为方便快捷,电动汽车无需停留等待电池充满,只需要将动力电池进行更换,将电量不足的电池换下并装入同型号的电量充足的电池。充电时间更灵活,在时间上可以提高电动汽车的利用率,且有利于电池的维护,可以有效避免大规模电动汽车接入电网时产生的不利影响,但换电站的修建成本较高,且电动汽车的电池规格不同,而现有换电站的换电设备只适用于单一规格的电池,难以在私家车辆中普及。

1.2 充电负荷预测模型

目前已经有大量研究剖析了电动汽车入网对电网运行的影响,而这些研究的关键在于建立精确的充电负荷预测模型。在建立电动汽车充电负荷预测模型方面,目前主要有以下3种思路。

1.2.1 蒙特卡罗模拟法

蒙特卡罗方法(Monte Carlo)也称为统计模拟法,其原理是通过大量的随机样本建立所求问题的数学模型,通过随机数的产生来获取计算问题的近似解。基于居民出行数据,通过蒙特卡罗方法来归纳模拟电动汽车用户的用车习惯,从而建立负荷预测模型。如文献[24]通过停车生成率模型模拟车辆的停车需求,通过停车概率模型分析电

电动汽车出行特性，通过蒙特卡罗方法预测充电负荷需求的时空分布；文献[25]建立了电动汽车充电功率需求的统计模型，采用蒙特卡罗方法模拟一天内的电动汽车充电功率曲线。基于蒙特卡罗模拟的电动汽车充电负荷计算流程如图1所示。

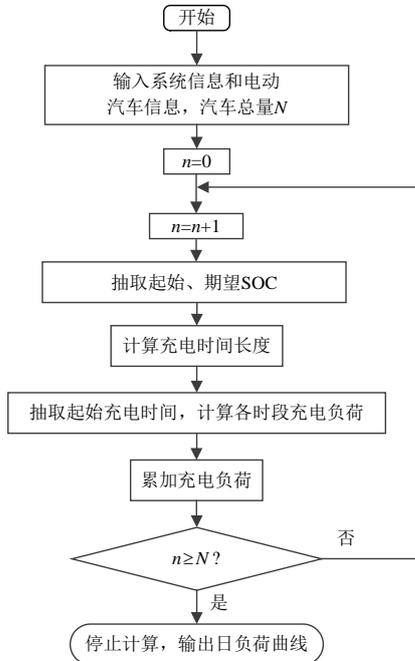


图1 基于蒙特卡罗模拟的电动汽车充电负荷计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of electric vehicle charging load based on Monte Carlo simulation

蒙特卡罗模拟法综合考虑了多种因素对负荷充电需求进行模拟，可以分析电动汽车负荷入网的随机性。然而通过该方法建立充电负荷预测模型是在拥有大量居民出行数据的基础上实现的，因此该方法对大量的样本数据具有很强的依赖性，一旦样本数据不足，就会大大降低该方法的可靠性。

1.2.2 基于出行链的时空模型

与蒙特卡罗方法相似，基于出行链的时空模型也需借助大量的样本数据。目前众多研究认为电动汽车替换传统燃料汽车并不会影响用户的出行行为，因此可以借助用户的出行特征统计模拟充电负荷需求。文献[26]针对私家车建立出行链，模拟电动汽车的出行规律，基于用户的用车习惯，通过模糊推理方法分析电动汽车的空间分布，结合车辆的时间分布和空间分布预测充电负荷需求。文献[27]将预测的充电负荷与可预测的基本

电力负荷集成，转化为系统状态预测，通过用户出行转移矩阵模拟充电负荷的空间分布。文献[28]以全国家庭出行调查数据为依据，考虑了起始出行时间、行驶时间、停车时间以及出行目的之间的相关关系，并建立了概率分布模型计算充电需求的时空分布。不同的出行链结构可以反映用户的出行目的、用车时间以及活动顺序^[29]。与蒙特卡罗模拟法相比，基于出行链的时空模型引入用户出行目的作为考虑因素，结合时间分布和空间分布2个层面考虑充电负荷的随机性。图2为基于出行链的电动汽车充电负荷计算流程图。

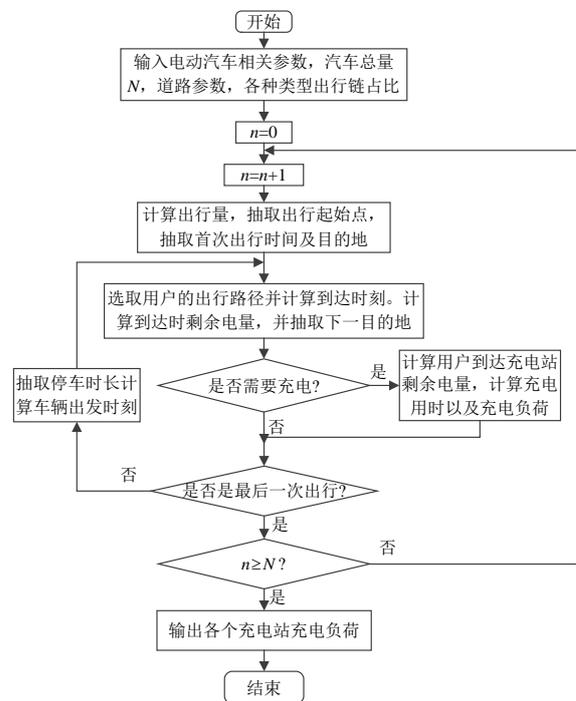


图2 基于出行链的电动汽车充电负荷计算流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of electric vehicle charging load based on travel chain

1.2.3 充电负荷车-路-网模型

建立电动汽车充电负荷车-路-网模型，不仅考虑了用户充电时间对充电负荷时间分布特性的影响，还可以评估出行路径、交通状况等因素对充电负荷空间分布的影响。文献[30]基于电动汽车的空间属性和能量属性建立了“车-路-网”充电负荷预测模型，综合考虑了交通网络拓扑结构、用户出行路径以及电网信息等因素对充电负荷时空分布的影响。文献[31]为了分析电动汽车无序入网充电对配电网稳定运行的影响，基于“车-路-网”耦合结构建立了连续潮流模型，考虑了用

户行为特性对充电负荷的影响，该方法可以量化在恶劣充电场景下的充电负荷需求，评估在临界情况下的电压分布特性。文献[32]考虑了电动汽车和交通路况的相关性与耦合性，基于用户道路一体化模型分析了电动汽车入网对电网安全性与稳定性的影响。基于车-路-网模型的电动汽车充电负荷计算流程如图 3 所示。

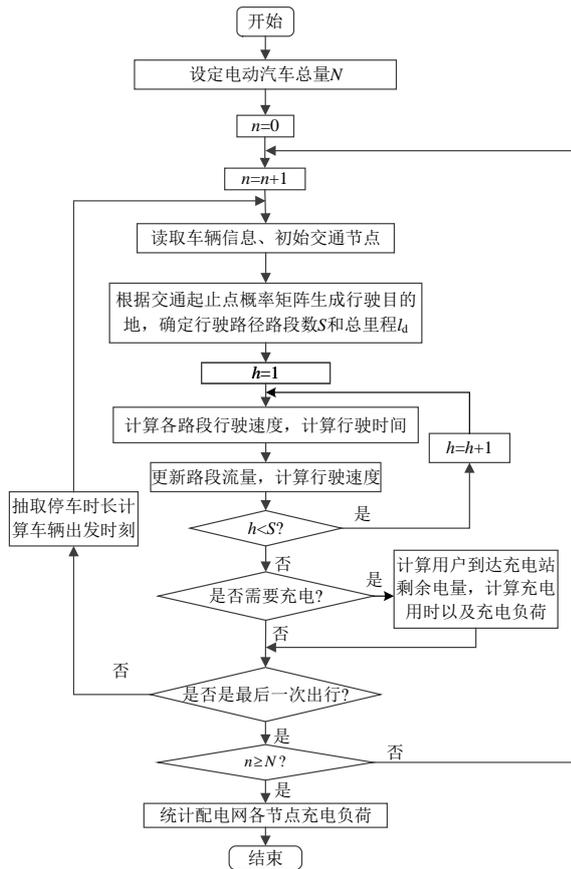


图 3 基于车-路-网模型的电动汽车充电负荷计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of electric vehicle charging load based on vehicle-road-network model

2 电动汽车智能充放电控制

2.1 电动汽车调度控制

针对大规模电动汽车无序充电给电网带来冲击这一问题，目前国内外已经进行了较为深入的研究，并取得了一定的研究成果，有大量研究聚焦于电动汽车与可再生能源的协同调度，这已经成为了优化能源利用的一项有效措施。图 4 为电动汽车参与电网调度示意图。由图 4 可知，电动汽车与电网之间可以进行双向的信息传递和能量

交互。电动汽车入网后将充电负荷信息传递给售电公司，售电公司根据负荷信息制定充放电计划并发布电价信息。电动汽车根据调度要求进行充放电。

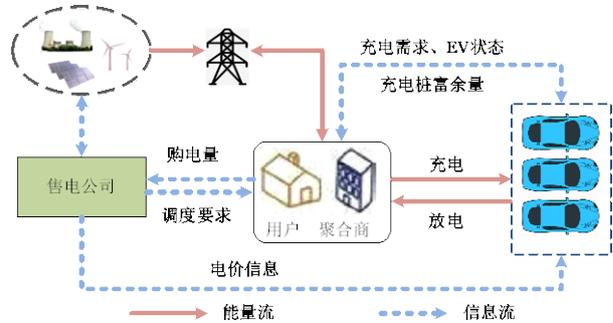


图 4 电动汽车与电网交互示意图

Fig. 4 Diagram of interaction between electric vehicle and power grid

2.2 电动汽车有序充电

电动汽车无序入网充电会给电网造成不利影响，但电动汽车作为一种可控负荷，对其进行有序充电控制，不但可以消除对电网造成的冲击，还有助于改善负荷波动，促进新能源消纳。依据控制方法，电动汽车有序充电调度策略可以分为集中式控制和分布式控制。

2.2.1 集中式控制策略

集中式控制策略是指控制中心基于电网源荷信息对某一区域内的所有入网电动汽车进行统一充电调度。文献[33-36]均采用了集中式控制策略，通过统一控制电动汽车实现降低网损或负荷波动等目标。基于集中式控制的电动汽车管理框架如图 5 所示。电动汽车入网后，用户上传充电需求、停留时间等信息，控制中心综合考虑源荷水平和用户需求，制定并下发电动汽车有序充电计划，电动汽车根据接收的计划充电。

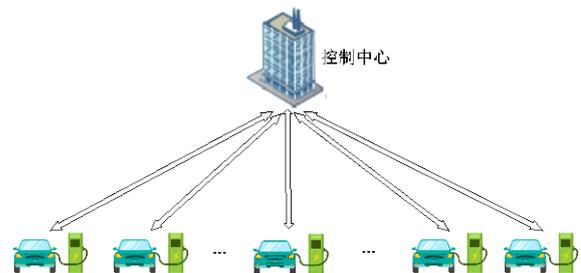


图 5 基于集中式控制的电动汽车管理框架

Fig. 5 Electric vehicle management framework based on centralized control

现有研究已经趋于多目标优化，通常是最大

日负荷率、最低用户用电成本以及最小负荷方差等目标相结合的多目标优化问题。较为典型的以最小负荷方差和最大日负荷率为目标的优化模型如下。

1) 目标函数。

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{24} [P_{\text{load}}(t) - P_w(t) + \sum_{i=1}^n P_{\text{EV},i}(t) - P_{\text{av}}]^2 \quad (1)$$

$$\max F_2 = \frac{P_{\text{av}}}{\max[\sum_{i=1}^n P_{\text{EV},i}(t) + P_{\text{load}}(t) - P_w(t)]} \quad (2)$$

$$P_{\text{av}} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} [P_{\text{load}}(t) - P_w(t) + \sum_{i=1}^n P_{\text{EV},i}(t)] \quad (3)$$

式中： $P_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻的常规负荷； $P_w(t)$ 为 t 时刻的风功率； $P_{\text{EV},i}(t)$ 为电动汽车 i 在 t 时段的充电功率； P_{av} 为系统平均负荷功率。

将目标函数(1)、(2)进行归一化处理，通过线性加权法将多目标函数转化为单目标函数，即

$$\min F = \lambda_1 \frac{F_1}{F_{1\max}} + \lambda_2 \frac{F_2}{F_{2\max}} \quad (4)$$

式中： λ_1 和 λ_2 分别为 F_1 、 F_2 的加权因子，体现所代表目标函数的重要程度，且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ ； $F_{1\max}$ 、 $F_{2\max}$ 分别为 F_1 、 F_2 的最大值，用于规范多目标优化函数。

2) 约束条件。

电池荷电状态(state of charge, SOC)约束：考虑到电池的特性和寿命问题，电池充电过程的荷电状态不能超过其上下限，即

$$S_{\min} \leq S_{i,t} \leq S_{\max} \quad (5)$$

式中： $S_{i,t}$ 为电动汽车 i 在 t 时刻的荷电状态； S_{\max} 和 S_{\min} 分别为电动汽车荷电状态的上、下限值， S_{\min} 一般不低于满荷电状态的20%。

用户需求约束：充电结束后，电动汽车的荷电状态应满足用户需求，即

$$S_{\text{exp}} \leq S_{\text{final}} \quad (6)$$

$$S_{\text{final}} = S_{\text{init}} + B^{-1} \int_{T_{\text{start}}}^{T_{\text{end}}} \eta P_{\text{EV}}(t) dt \quad (7)$$

式中： S_{exp} 为充电结束时用户的期望值； S_{final} 为充电结束时电动汽车的荷电状态； S_{init} 为电动汽车的初始荷电状态； B 为电动汽车的电池容量； η 为充电效率； $P_{\text{EV}}(t)$ 为 t 时刻的充电功率； T_{start} 、

T_{end} 分别为充电初始、结束时刻。

电池充电功率约束：

$$0 \leq P_{\text{EV}}(t) \leq P_{\text{EV},\max} \quad (8)$$

式中 $P_{\text{EV},\max}$ 为电动汽车的最大充电功率。

集中式控制策略对所有入网电动汽车进行统一管理，因此在满足用户需求的同时可以实现整体最优。但随着电动汽车的普及和推广，以及电动汽车用户的增加，集中式控制的计算量和控制难度都会加大。

2.2.2 分布式控制策略

分布式控制策略是电动汽车用户根据电网发布的充电需求和价格信息，结合用户自身的需求自主地响应有序充电策略。在这个过程中，电网并不直接参与电动汽车充电的控制，而是根据源荷信息建立激励机制，鼓励用户参与有序充电策略。文献[37-38]为了鼓励用户在负荷低谷期给电动汽车充电，基于用户充电行为对电价的响应提出了一种电动汽车充电电价的制定方法。图6为分布式控制策略流程图。电动汽车获取电价信息，

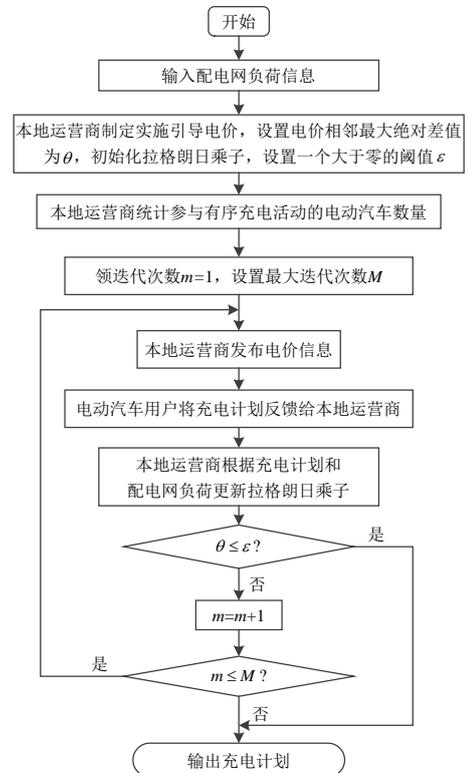


图6 分布式控制策略流程图

Fig. 6 Flow chart of distributed control strategy
根据自身充电需求制定并提交充电计划。电网根

据源荷状况对用户提交的充电计划进行审核, 参照负荷峰谷差与用户协商以得到最优充电计划。

分布式控制的激励机制主要分为基于价格的机制和基于激励的机制。基于价格的机制包括分时电价、尖峰电价和实时电价。其中分时电价是目前国内较为常见的一种电价策略, 该策略主要是在用电高峰时段适当提高电价, 在用电低谷时段适当降低电价, 从而激励用户减少高峰时段的用电, 降低峰谷差。文献[39]基于分时电价制度和电动汽车可入网的情况建立了计及电网负荷波动及用户成本的多目标优化模型, 对比分析了分时电价与固定电价下的仿真结果及不同分时电价对调度策略的影响。文献[40]研究了电动汽车分时充电价格的制定方法, 提出了基于分时充电价格引导及储能系统的电动汽车有序充电引导策略, 在降低运营商购电成本和用户充电费用的同时, 实现智能电网中充电负荷的友好接入。

分布式控制策略一般以用户用电成本最低为目标函数, 即

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot S(t) \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中: n 为参与优化调度的电动汽车数量; $P_i(t)$ 为电动汽车 i 在 t 时刻的充电功率; $S(t)$ 为电动汽车在 t 时刻的充电电价。

分布式控制策略可以满足用户充电需求, 提高用户的响应度, 相较于集中式控制策略可以减少计算量和计算时间, 但难以保证结果整体最优。

2.2.3 分层式控制策略

针对集中式控制策略和分布式控制策略的不足, 一些专家学者提出了分层式控制策略。文献[41-42]采用了分层式控制策略解决大规模电动汽车无序入网给电网带来的冲击问题。基于分层式控制的电动汽车管理框架如图7所示。

分层式控制是将集中式控制和分布式控制相结合的一种控制方式。分层式控制策略将电动汽车划分为多个群体, 分别由多个本地运行商控制, 本地运营商向上层决策中心提交聚合电动汽车群信息, 由上层决策中心协调各个本地运营商的运行。分层式控制通常分为2层, 上层求解各电动

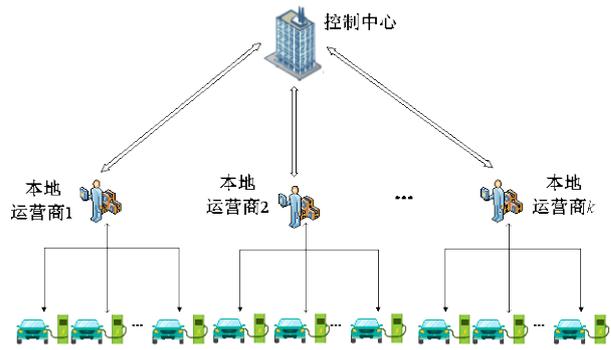


图7 基于分层式控制的电动汽车管理框架

Fig. 7 Electric vehicle management framework based on Distributed Control

汽车群的充放电控制策略, 下层求解集群内各电动汽车的充放电控制策略。分层控制中各本地运营商在实现整体目标的基础上, 相对独立地对电动汽车群进行控制。

分层式控制策略将电动汽车分群控制, 既解决了集中式控制运算维度大的问题, 降低了控制难度, 同时又可以实现整体最优, 弥补了分布式控制的不足。

2.3 V2G 技术

V2G 技术是一种新型的电网技术, 在 V2G 技术的支持下, 电动汽车不仅可以消费电力, 还可以在闲置时发挥自身储能作用给电网送电, 实现电能可在电网与电动汽车之间的双向输送。

智能V2G有助于维护电池的使用寿命。动力电池是电动汽车的主要部件, 其使用寿命和性能决定了电动汽车的使用性能。并不是对电动汽车的使用时间和充电次数越少, 电池寿命越高, 如果电动汽车长时间处于闲置状态, 没有达到最佳的充放电循环周期, 其寿命反而会受损。对电动汽车进行适当的V2G不仅可以降低对电池的损害, 还可以为车主带来收益^[43]。英国华威大学的一项研究表明, 电池的衰减是一个比想象中更复杂的过程, 取决于电池寿命、容量吞吐量、温度、充电状态、电流和放电深度等。而V2G是一种有效的技术, 可用于优化电池的状态, 使得衰减最小化, 从闲置的电动汽车中获取多余的能量为电网供电, 可以延长电池的使用寿命; 但不能过于频繁使用V2G技术, 否则会有损电池寿命。

目前已有基于电动汽车动力电池损耗模型的控制策略研究。文献[44]基于分时电价背景, 在

满足用户充电需求的前提下，分析了经典电池损耗模型下电动汽车放电对电池寿命的影响。文献[45]通过电池损耗模型评估电动汽车放电对电池寿命的影响，建立了一种多目标优化调度模型，分析了在不同电池损耗模型、不同用户参与度以及不同分时电价情况下的优化效果。

2.4 电动汽车有序充放电控制策略求解算法

对电动汽车进行优化调度，其本质为对未来每个时刻的入网电动汽车进行充放电功率规划，也是优化问题，因此可以采用优化算法对电动汽车充放电功率进行寻优。文献[46]通过粒子群算法寻优得到分时电价优化模型的最优解。文献[47]运用自适应遗传算法对电动汽车智能充电优化数学模型进行寻优。文献[41]为了解决大规模电动汽车实时有序充放电控制问题，建立了电动汽车集群优化调度模型，通过灰狼算法求解各电动汽车的优化调度策略。

3 应用区块链的电动汽车电力交易

3.1 区块链技术

区块链是一种分布式的安全可靠的数据库，自从化名为“中本聪”的学者在2008年发布《比特币：一种点对点电子现金系统》一文开始，关于区块链的研究逐渐增多^[48]。非对称加密、共识机制、分布式账本以及智能合约四大核心技术支撑着区块链^[49]。从数据存储角度来看，区块链具

有不可篡改、可追溯、传输安全等特点；从价值转移角度来看，区块链可以在大大降低信用成本的前提下实现价值转移和资产数字化。面对当前电力市场中存在的安全性低、透明度和公信力有待提升、共享性低等问题，区块链技术可以提供有效的解决方案^[50]。目前区块链已经被广泛应用到多个领域中^[51]。

3.2 区块链在电动汽车电力交易中的应用

电动汽车规模的扩大给电力系统增加了大量的交易信息，这对交易信息的管理无疑增加了运维难度和成本，且对于中心化电力交易体系，用户的隐私信息存在泄露风险。电动汽车的分布具有分散性，与区块链技术特征具有很好的结合点。目前已有学者将区块链应用到电动汽车电力交易中，以避免中心化平台带来的弊端。

图8为基于区块链的电动汽车电力交易架构示意图。电动汽车用户、分布式储能运营商以及分布式发电运营商等能量单元首先注册为节点，获取各自的公私钥，然后通过区块链实现节点之间的广播通信、交易认证、计费结算等。区块链会将当前时段之前的所有交易信息以链式区块的形式进行记录，用户可通过这样的链式结构对交易信息进行查询和追踪。

基于区块链的电动汽车电力交易流程如图9所示。在交易开始前，各节点注册获取自身的公私钥，并向其他节点广播公钥。在交易开始后，

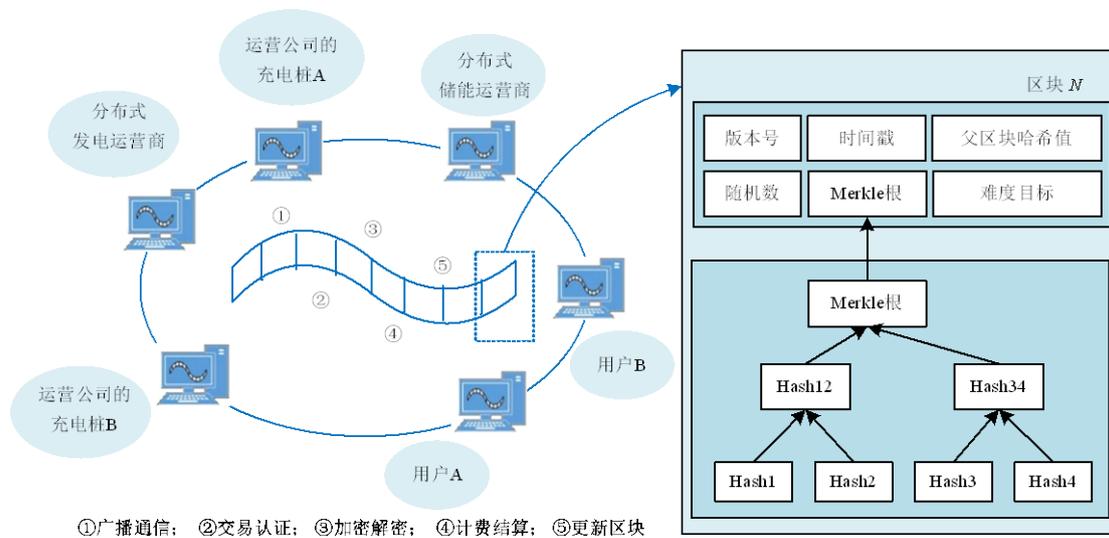


图8 基于区块链的电动汽车电力交易架构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of electric vehicle electric power transaction architecture based on blockchain

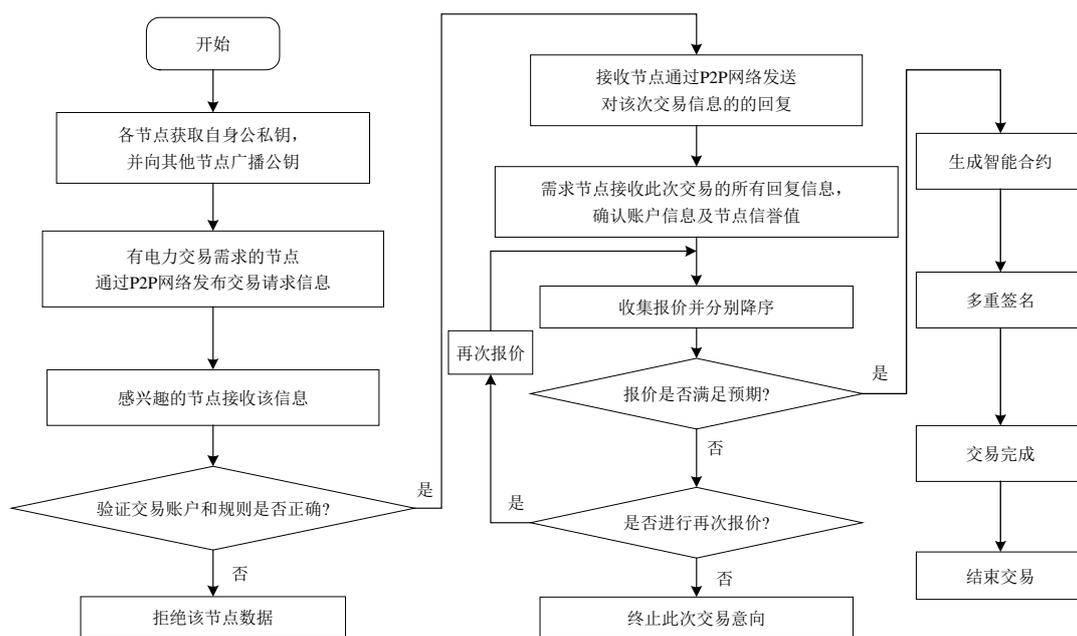


图9 基于区块链的电动汽车电力交易流程图

Fig. 9 Schematic diagram of electric vehicle electric power transaction process based on blockchain

有电力交易需求的节点在 P2P 网络上发出购买需求信息, 感兴趣的节点接收信息, 并验证账户和规则的正确性, 在对自身用能需求和能源供应情况分析的基础上, 通过 P2P 网络对该交易请求信息进行回复。双方确认交易内容之后, 生成智能合约, 多方签名验证交易的正确性, 完成交易。在确认交易时, 若价格没有满足预期值, 可确认是否进行再次报价, 若同意再次报价, 则调整后的价格参与下一轮价格排序; 若不同意再次报价, 则终止此次交易。在交易过程中, 公私钥的转换过程是不可逆的, 账户在达成交易后生成智能合约并发送至各交易节点进行签名, 这保障了交易和账户的安全性。

4 结论

随着动力电池技术的提高以及政府部门政策的推动, 电动汽车将会得到快速普及和推广, 这将会对电网的运营与维护产生深远的影响。对电动汽车充电负荷进行优化调度, 既有利于电网的安全稳定运行, 又可以用户使用户和电网产生经济效益。在未来的研究工作中以下问题应得到特别的关注:

1) 在建立电动汽车充电负荷预测模型方面,

已经有大量的研究基于多个因素分析充电负荷的不确定性, 但对于交通网络和电网等因素对负荷的影响的研究不够深入, 未来还需要进一步建立更为精细的电动汽车充电负荷模型。

2) 目前已有大量的研究注重电动汽车的充放电过程, 但是不合理的充放电会影响到电动汽车电池的寿命, 如何应用 V2G 技术维护电动汽车电池寿命还有待进一步研究。

3) 将区块链应用到电动汽车的电力交易中既可以保障交易的安全性和可靠性, 还可以保护用户隐私。但随着电动汽车规模的增加, 交易数目增多, 电力交易的速度将会受到一定程度的影响。如何利用区块链平台使电动汽车交易系统更加完善, 还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 孙思宇, 于成琪, 孙涛, 等. 冷热电三联供分布式能源系统研究进展[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 26-31.
Sun S Y, Yu C Q, Sun T, et al. Advance in study on CCHP distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 26-31.
- [2] 国旭涛, 蔡洁聪, 韩高岩, 等. 分布式能源技术与发展现状[J]. 分布式能源, 2019, 4(1): 52-59.
Guo X T, Cai J C, Han G Y, et al. Technologies and

- development status for distributed energy resources [J]. *Distributed Energy*, 2019, 4(1): 52-59.
- [3] 焦伟航. 火力发电厂应用海水热泵进行区域供热的分析与设计[J]. *浙江电力*, 2019, 38(3): 98-105.
Jiao W H. Analysis and design of district heating using seawater heat pump in thermal power plant [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(3): 98-105.
- [4] 王汉华, 陈永进. 电动汽车充电设施接入配电网的最优布点规划[J]. *广东电力*, 2018, 31(4): 72-78.
Wang H H, Chen Y J. Optimal stationing planning for electric vehicle charging facilities accessing to distribution network[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(4): 72-78.
- [5] 李磊, 赵新, 李晓辉, 等. 基于动态交通信息的电动汽车充电需求预测模型及其对配网的影响分析[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(3): 107-118.
Li L, Zhao X, Li X H, et al. Electric vehicle charging demand prediction model based on dynamic traffic information and its impacts on distribution networks [J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(3): 107-118.
- [6] Bradley T H, Quinn C W. Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(16): 5399-5408.
- [7] Lopes J A P, Soares F J, Almeida P M R. Integration of electric vehicles in the electric power system [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 99(1): 168-183.
- [8] 胡文平, 巫伟南, 郝婉梦, 等. 含电动汽车的配电网运行风险评估[J]. *现代电力*, 2016, 33(2): 45-50.
Hu W P, Wu W N, Hao W M, et al. Operation risk assessment on distribution system with the integration of electric vehicles[J]. *Modern Electric Power*, 2016, 33(2): 45-50.
- [9] 李琥, 周琪, 史静, 等. 大规模电动汽车接入电网对南京市负荷特性的影响及对策[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(S1): 19-24.
Li H, Zhou Q, Shi J, et al. Impact of large-scale electric vehicles connected to power grid on the load characteristics in Nanjing city and the corresponding countermeasures[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(S1): 19-24.
- [10] 张乐平, 张明明, 林伟斌. 电动汽车与电网统一互动架构设计与探讨[J]. *现代电力*, 2014, 31(1): 34-39.
Zhang L P, Zhang M M, Lin W B. Design and discussion of a unified EV-grid integration structure [J]. *Modern Electric Power*, 2014, 31(1): 34-39.
- [11] 李惠玲, 白晓民, 谭闻, 等. 电动汽车入网技术在配电网的应用研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(S1): 22-27.
Li H L, Bai X M, Tan W, et al. Application of vehicle to grid to the distribution grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(S1): 22-27.
- [12] 杜成刚, 张华, 李瑾, 等. 电动汽车入网技术在智能电网中的应用[J]. *华东电力*, 2010, 38(4): 557-560.
Du C G, Zhang H, Li J, et al. Application of electric vehicle access network technology in intellectual grid [J]. *East China Electric Power*, 2010, 38(4): 557-560.
- [13] 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 X F, Zhang Q F, Cui S M. Review of electric vehicle V2G technology[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(2): 121-127.
- [14] 李瑾, 杜成刚, 张华. 智能电网与电动汽车双向互动技术综述[J]. *供用电*, 2010, 27(3): 12-14.
Li J, Du C G, Zhang H. Summary on the two-way interaction between smart grid and the electric vehicle [J]. *Distribution & Utilization*, 2010, 27(3): 12-14.
- [15] 张秉良, 孙玉田, 李建祥. 电动汽车的电网调峰模型及效益分析[J]. *供用电*, 2012, 29(1): 29-32.
Zhang B L, Sun Y T, Li J X. The model and the benefits analysis of electric vehicle for peak-load regulation in grid[J]. *Distribution & Utilization*, 2012, 29(1): 29-32.
- [16] Al-Awami A T, Sortomme E. Coordinating vehicle-to-grid services with energy trading[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 453-462.
- [17] Liu H, Hu Z C, Song Y H, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3480-3489.
- [18] 杨玉红, 张峰, 张艳芳. 电动汽车参与电网调峰的分析研究[J]. *电力学报*, 2012, 27(4): 306-309.
Yang Y H, Zhang F, Zhang Y F. Analysis of power grid peak shaving with electric vehicles[J]. *Journal of Electric Power*, 2012, 27(4): 306-309.
- [19] Wehinger L A, Galus M D, Andersson G. Agent-based simulator for the German electricity wholesale market including wind power generation and widescale PHEV adoption[C]//*Energy Market*. IEEE, 2010: 1-6.
- [20] 王浩然, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的电动汽车充电站充电权交易: 机制、模型和方法[J]. *中国*

- 电机工程学报, 2020, 40(2): 425-436.
- Wang H, Chen S J, Yan Z, et al. Blockchain-enabled charging right trading among EV charging stations: mechanism, model, and method [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 425-436.
- [21] 金志刚, 吴若茜, 李根, 等. 基于联盟区块链的电动汽车充电交易模型[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4362-4370.
- Jin Z G, Wu R Q, Li G, et al. Transaction model for electric vehicle charging based on consortium blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4362-4370.
- [22] 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 Z C, Song Y H, Xu Z W, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [23] 张祖平, 陈麒宇, 杨秀媛, 等. 大容量直流充电桩集群的调峰研究[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 11-16.
- Zhang Z P, Chen Q Y, Yang X Y, et al. Study of the group controlling on large-capacity dc charging piles for peak load regulation[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 11-16.
- [24] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 13-20.
- Zhang H C, Hu Z C, Song Y H, et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [25] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
- Tian L T, Shi S L, Jia Z. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [26] 苏小林, 张艳娟, 武中, 等. 规模化电动汽车充电负荷的预测及其对电网的影响[J]. 现代电力, 2018, 35(1): 45-54.
- Su X L, Zhang Y J, Wu Z, et al. Forecasting the charging load of large-scale electric vehicle and its impact on the power grid[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(1): 45-54.
- [27] Nie Y Q, Chung C Y, Xu N Z. System state estimation considering EV penetration with unknown behavior using Quasi-Newton method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4605-4615.
- [28] Tao S, Liao K, Xiao X, et al. Charging demand for electric vehicle based on stochastic analysis of trip chain[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(11): 2689-2698.
- [29] Huang H, Chung C Y, Chan K W, et al. Quasi-Monte Carlo based probabilistic small signal stability analysis for power systems with plug-in electric vehicle and wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3335-3343.
- [30] 邵尹池, 穆云飞, 余晓丹, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5207-5219.
- Shao Y C, Mu Y F, Yu X D, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207-5219.
- [31] 杨昕然, 吕林, 向月, 等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 102-108.
- Yang X R, Lü L, Xiang Y, et al. Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under "EV-road-grid" coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 102-108.
- [32] 徐青山, 蔡婷婷, 刘瑜俊, 等. 考虑驾驶人行为习惯及出行链的电动汽车充电站站址规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 59-65.
- Xu Q S, Cai T T, Liu Y J, et al. Location planning of charging stations for electric vehicles based on drivers' behaviours and travel chain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 59-65.
- [33] Zhang P, Qian K J, Zhou C K, et al. A methodology for optimization of power systems demand due to electric vehicle charging load[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1628-1636.
- [34] 吴晨曦, 张杰, 张新延, 等. 考虑电价影响的电动汽车削峰填谷水平评价[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 14-22.
- Wu C X, Zhang J, Zhang X Y, et al. Load shifting level evaluation of EVs in the different energy price environment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 14-22.
- [35] 杨国清, 罗航, 王德意, 等. 分时电价与电动汽车

- 优化调度的主从博弈模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 55-60.
- Yang G Q, Luo H, Wang D Y, et al. Leader-follower game model of time-of-use electricity price and optimized plug-in electric vehicle dispatching [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2018, 30(10): 55-60.
- [36] Chang R F, Chang Y C, Lu C N. Loss minimization of distribution systems with electric vehicles by network reconfiguration[C]//2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology. 2012: 551-555.
- [37] O'Connell N, Wu Q W, Ostergaard J, et al. Electric vehicle (EV) charging management with dynamic distribution system tariff[C]//2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. 2011: 1-7.
- [38] Dauer D, Flath C M, Strohle P, et al. Market-based EV charging coordination[C]//2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT), November 17-20, 2013, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2013: 102-107.
- [39] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.
- Wei D J, Zhang C H, Sun B, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.
- [40] 常方宇, 黄梅, 张维戈. 分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2609-2615.
- Chang F Y, Huang M, Zhang W G. Research on coordinated charging of electric vehicles based on TOU charging price[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2609-2615.
- [41] 潘振宁, 张孝顺, 余涛, 等. 大规模电动汽车集群分层实时优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 96-104.
- Pan Z N, Zhang X S, Yu T, et al. Hierarchical real-time optimized dispatching for large-scale clusters of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 96-104.
- [42] 潘胤吉, 邱晓燕, 肖建康, 等. 电动汽车充电负荷的时空双层优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2018, 55(6): 62-70.
- Pan Y J, Qiu X Y, Xiao J K, et al. Optimal temporal and spatial bi-layer scheduling strategy of electric vehicles charging load[J]. Southern Power System Technology, 2018, 55(6): 62-70.
- [43] 陈麒宇. 泛在电力物联网实施策略研究[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 99-106.
- Chen Q Y. Research on implementation strategy of ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 99-106.
- [44] 郑宇, 张睿, 李正佳, 等. 基于多群组均衡协同搜索算法的电动汽车充放电多目标优化[J]. 南方电网技术, 2017, 11(1): 52-57.
- Zheng Y, Zhang R, Li Z J, et al. Multi-objective optimization of charging and discharging strategy for electric vehicles based on equilibrium-inspired multiple group search optimization[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(1): 52-57.
- [45] 戴越繁, 杨伟. 计及电池放电损耗的电动汽车充放电优化调度策略[J]. 电工电气, 2019(10): 1-8.
- Dai Y F, Yang W. An optimal dispatching strategy for charging and discharging of electric vehicles accounting battery discharging loss[J]. Electrotechnics Electric, 2019(10): 1-8.
- [46] 杨春萍, 赵祺, 祁兵, 等. 基于用户利益与出行意愿的电动汽车充放电调度策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 106-112.
- Yang C P, Zhao Q, Qi B, et al. Charge and discharge scheduling strategy of electric vehicle based on interest and travel intention of users[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 106-112.
- [47] 张聪, 许晓慧, 孙海顺, 等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 19-24.
- Zhang C, Xu X H, Sun H S, et al. Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 19-24.
- [48] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[EB/OL]. [2020-03-01]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [49] 邵炜晖, 许维胜, 徐志宇, 等. 基于区块链的虚拟电厂模型研究[J]. 计算机科学, 2018, 45(2): 25-31.
- Shao W H, Xu W S, Xu Z Y, et al. Study on virtual power plant model based on blockchain[J]. Computer Science, 2018, 45(2): 25-31.
- [50] 喻小宝, 郑丹丹. 区块链技术在能源电力领域的应

用及展望[J]. 华电技术, 2020, 42(8): 17-23.

Yu X B, Zheng D D. Application and exploration of blockchain technology in energy and electricity[J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 17-23.

[51] 王君宇, 吴清烈, 曹卉宇. 国内区块链典型应用研究综述[J]. 科技与经济, 2019, 32(5): 1-6.

Wang J Y, Wu Q L, Cao H Y. Overview of research on typical application of domestic block chain[J]. Science & Technology and Economy, 2019, 32(5): 1-6.

收稿日期: 2020-04-09。

作者简介:



贺瑜环

贺瑜环(1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程及新能源发电, 910169459@qq.com;



杨秀媛

杨秀媛(1962), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向为新能源电力系统分析与规划, yangxy0912@163.com;



陈麒宇

陈麒宇(1986), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源及电力系统分析与规划, chenqiyu@epri.sgcc.com.cn;



卜思齐

卜思齐(1984), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事电力电子化和智能化电力系统稳定控制分析与运行规划研究, siqi.bu@polyu.edu.hk;



徐智蕾

徐智蕾(1977), 女, 博士, 研究员, 研究方向为电力电缆及其在电力物联网中应用, zhq.xu@soton.ac.uk;



肖天颖

肖天颖(1992), 女, 博士研究生, 研究方向为分布式能源与主动配电网, tianyingxiao@mail.icc.ac.cn。

(责任编辑 尚彩娟)