

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210505

基于零和博弈的电力系统鲁棒优化调度研究

董燕¹, 杨俊林¹, 朱永胜¹, 李秋燕², 陈斌³, 聂彩静¹

(1. 中原工学院电子信息学院, 河南 郑州 450007; 2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 3. 河南森源电气股份有限公司, 河南 长葛 461500)

摘要: 随着多种分布式能源的规模化接入, 其固有的随机特性及多方利益冲突问题给电力系统调度决策带来了新的挑战。为此, 深度融合鲁棒优化与零和博弈机制, 分别将大自然与电力调度人员作为博弈参与方, 提出了一种考虑调度人员与大自然博弈的电力系统鲁棒调度协同规划方法。其中, 针对电动汽车移动与储能属性耦合的不确定性, 将其交通行为进行集群化处理。进而基于电动汽车、风电、火电机组的出力及运行费用特性, 建立含多种能源形式的 min-max 调度博弈模型, 并采用两阶段松弛算法进行求解。实验结果验证了所提调度模型及相关调度策略在不依赖准确风电预测的同时, 能实现风、车等能源的协同增效经济运行, 为解决不确定分布式能源接入电力系统的优化决策问题提供了新的研究思路。

关键词: 电力调度; 零和博弈; 鲁棒优化; min-max 模型; 分布式能源

Robust optimal dispatch of a power system based on a zero-sum game

DONG Yan¹, YANG Junlin¹, ZHU Yongsheng¹, LI Qiuyan², CHEN Bin³, NIE Caijing¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;
2. Economic Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;
3. Henan Senyuan Electric Co., Ltd., Changge 461500, China)

Abstract: With the large-scale accessing of various forms of distributed energy, its inherent random characteristics and multi-player conflicts of interest bring new challenges to power system dispatching. By deeply integrating a robust optimization and zero-sum game mechanism, taking nature and power dispatcher as game players, a robust dispatching collaborative planning method for a power system considering the game between dispatcher and nature is proposed. There is a problem of the uncertainty of the coupling between the traffic and energy properties of electric vehicles. To address this electric vehicles are first clustered based on their traffic attributes. Then, based on power output and operating cost characteristics of the vehicles, wind power and thermal power units, a min-max scheduling game model with multiple energy forms is established and analysed by a two-stage relaxation algorithm. The simulation results confirm that the proposed dispatching model and related strategies can realize the coordinated synergistic economic operation of wind, electric vehicles and other energy without relying on accurate wind power prediction. This provides a new approach for solving the power dispatching decision problem of uncertain distributed energy access.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 61873292).

Key words: power dispatch; zero-sum game; robust optimization; min-max model; distributed energy

0 引言

随着人类对资源的过度需求, 能源短缺问题成为各国政府亟需解决的关键问题^[1-2]。风电凭借其自

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(61873292); 河南省高等学校重点科研计划项目资助(22ZX011, 20A470019); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目资助(2018GGJS104)

身的清洁、可再生等优势近年来发展迅速^[3-5]。然而, 其固有的随机、不确定性给电力系统经济运行(Economic Dispatch, ED)带来新的挑战。另一方面, 电动汽车(Electric Vehicle, EV)成为全球汽车产业转型发展的主要方向, 逐渐步入大众的生活^[6], 但其电能来源问题, 一直是制约其发展的重要因素。

文献[7]研究了风电接入的碳捕集电场的经济调度问题, 以机组运行成本、碳交易成本等经济因素作为优化目标。文献[8-9]采用神经网络的预测方

法对风电误差进行预测, 结果验证了所建预测模型可有效地降低经济调度成本。文献[10-13]充分考虑电动汽车 V2G 特性, 建立含电动汽车接入的电网调度模型, 充分验证了电动汽车的“削峰填谷”效应。上述文献只关注于单一能源形式入网的经济调度研究, 然而随着国家“光储充放”等政策的落地, 相应研究应全面考虑风、车良性互动的协调增效作用。

文献[14]在分时电价机制基础上, 提出了一种风、车互动参与电网的经济调度问题。文献[15]研究了含风电及电动汽车参与的电力市场调度问题, 采用轮盘赌方法处理风电不确定性。文献[16]采用多场景模拟技术将风电不确定性分解为典型的离散概率场景, 但处理场景样本相对复杂。上述文献虽同时考虑风电及电动汽车接入, 然而对其不确定性方面的研究有待完善。研究表明, 鲁棒优化理论是解决不确定的有效办法^[17]。文献[18]建立鲁棒双层随机优化调度模型, 兼顾了电网以及电动汽车的利益。文献[19]采用两阶段鲁棒调度模型, 采用列约束生成分解方法将原模型分解为日前调度主问题和附加调整子问题。上述文献对新能源不确定性因素造成的预测误差问题未全面考虑, 同时, 鲁棒优化过程中大自然与调度人员之间具有“此消彼长”的关系, 博弈论是解决利益冲突与关联的有效工具, 为研究此类鲁棒优化问题提供了新的思路和途径^[20]。目前, 已有学者开始关注。文献[21]研究了光伏不确定并网背景下的日前鲁棒经济调度模型。文献[22]以增量配电网作为研究对象, 研究了多主体间的动态博弈过程。整体看来, 针对分布式能源不确定因素的电力系统鲁棒博弈经济调度相关研究有待深入。

本文在电动汽车及风电广泛接入电力系统背景下, 综合大自然出力的随机性, 提出相关鲁棒优化博弈框架, 随后建立了电力系统鲁棒经济调度二人零和博弈模型, 采用两阶段松弛算法对所建模型进行求解, 解决了风车互动模式下考虑风电不确定性的电力系统最优经济运行问题。在不依赖于精确风电出力预测的同时, 所建模型极易推广应用于一切含有不确定性因素的决策问题, 同时也拓宽了工程博弈论的应用范围。

1 鲁棒经济调度框架

从调度人员角度考虑, 其关注的核心是在分布式能源各种不确定的因素下, 找到其给系统运行带来的最坏情况, 并尽可能去避免这一最坏情况造成的后果, 而这正是鲁棒优化的核心。不同于传统机组发电, 风电的出力受环境影响较大。一方面, 电

网调度人员关心如何制定合理调度策略以保证最优经济运行, 另一方面, 大自然产生的实际风功率因不能保证风电计划出力, 使得电力系统的经济运行成本升高。现代电力系统经济调度具备对立竞争的属性, 其符合“博弈”的思想。

基于规模化风电及以“清洁电”换“汽油”的电动汽车应用背景, 考虑风-车不确定性, 采用“零和博弈”框架进行建模, 解决了风车互动接入的电力系统鲁棒经济调度问题, 所建框架如图 1。

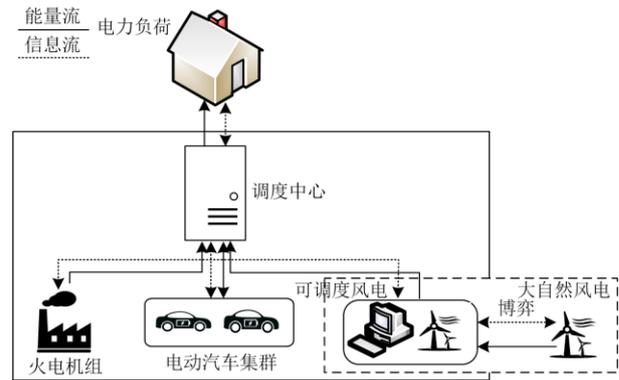


图 1 鲁棒经济调度架构

Fig. 1 Robust economic dispatch architecture

针对大自然与人为控制对电力系统经济运行造成的影响, 二人零和博弈关系可采用 min-max 模型表述为

$$\begin{aligned} \min_x \max_{y \in Y} f(x, y) \\ \text{subject to. } G(x, y) \leq 0 \\ x \in X \\ y \in Y \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为优化函数; x 为调度人员策略; y 为大自然策略; X 、 Y 为调度人员及大自然策略集; $G(x, y)$ 为同时含有 x 及 y 的约束条件。

2 电动汽车集群模型

随着电动汽车逐渐步入大众的生活, 其兼具的移动及储能属性, 在未来的智能电力系统中占据重要的地位, 由于其购置方属于车主, 其接入电力系统可有效降低电力系统的投资费用。然而电动汽车入、离网时间具有不确定性, 大规模接入将导致系统信息流量增高, 如对单台电动汽车考虑其充放电行为, 将大幅度增加计算复杂度, 带来“维数灾”。而当电动汽车规模达到一定水平时, 其交通行为较为稳定, 其出行行为符合正态分布函数^[23]:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_s} \exp\left(-\frac{(t-u_s)^2}{2\delta_s^2}\right) \quad (2)$$

式中, u_s 及 δ_s 为均值与方差。

基于电动汽车交通行为模型, 生成大规模电动汽车入、离网时间场景, 按出行规律的不同将其分为若干个集群, 分类如表 1 所示。

表 1 EV 分类规则

Table 1 Classification rules of EV

集群名称	接入时间	离开时间	集群名称	接入时间	离开时间
集群 1	08:00	16:00	集群 7	17:00	07:00
集群 2	08:00	17:00	集群 8	17:00	08:00
集群 3	08:00	18:00	集群 9	18:00	07:00
集群 4	09:00	16:00	集群 10	18:00	08:00
集群 5	09:00	17:00	集群 11	19:00	07:00
集群 6	09:00	18:00	集群 12	19:00	08:00

3 系统经济运行模型

含风电及电动汽车接入的电力系统经济运行主要包含机组发电成本、电动汽车充放电成本及风电误差成本, 并基于各发电单元特性, 建立相关模型。

3.1 目标函数

$$F = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T f(P_{i,t}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T f(P_{n,t}^{EV}) + \sum_{t=1}^T f(Pw_t^D, Pw_t^N) \quad (3)$$

式中: $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的发电功率; $P_{n,t}^{EV}$ 为电动汽车集群 n 在 t 时段的充放电功率, 其中电动汽车放电为正, 充电为负; Pw_t^D 为风电调度风功率; Pw_t^N 为大自然实际风功率; I 为火电机组台数; N 为电动汽车集群数; T 为调度周期, $T = 24$ 。

火电机组主要以煤炭等作为原料进行工作, 采用二次函数表示其发电成本, 即

$$f(P_{i,t}) = \alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2 \quad (4)$$

式中, α_i 、 β_i 及 γ_i 为火电机组 i 的燃料费用系数。

为平滑风电及电网的能量波动, 电动汽车需要进行充放电来维持电网的平稳运行。电动汽车放电时属于电力供应侧, 因此电网需支付其费用; 反之, 为电力需求侧, 需向电网支付充电费用。其充放电费用表示为

$$f(P_{n,t}^{EV}) = \begin{cases} v P_{n,t}^{EV}, & P_{n,t}^{EV} > 0 \\ 0, & P_{n,t}^{EV} = 0 \\ o P_{n,t}^{EV}, & P_{n,t}^{EV} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, o 、 v 分别为电动汽车充放电电价。

由于风电预测技术的限制, 实际风电的出力相

较于调度风电会有所偏差。电力系统需预备足够的旋转备用来应对其出力的波动性。当调度风电功率高于大自然实际风电功率时, 电力系统需启动备用容量, 来满足实际风电出力的不足; 反之, 实际风电功率产量过剩, 需进行弃风操作进而产生相应费用, 风电出力偏差费用表示为

$$f(Pw_t^D, Pw_t^N) = \omega_1 \max(0, Pw_t^D - Pw_t^N) + \omega_2 \max(0, Pw_t^N - Pw_t^D) \quad (6)$$

式中: ω_1 为系统备用费用系数; ω_2 为风电弃风费用系数。

3.2 约束条件

3.2.1 功率平衡约束

为满足电力系统的平稳运行, 需保证供需侧功率平衡, 即

$$\sum_{i=1}^I P_{i,t} + \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{EV} + Pw_t^D = P_{load,t} \quad (7)$$

式中, $P_{load,t}$ 为 t 时段的电力负荷需求。

3.2.2 火电机组出力约束

火电机组出力应满足出力上下限, 即

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (8)$$

式中, $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别为机组出力上下限。

3.2.3 机组爬坡约束

受实际机组工作环境限制, 其相邻时段出力不能出现突变, 即

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq U_{R,i} \cdot \Delta T \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq D_{R,i} \cdot \Delta T \end{cases} \quad (9)$$

式中: $U_{R,i}$ 、 $D_{R,i}$ 为机组 i 的上下爬坡速率; ΔT 为调度时间间隔, $\Delta T = 1\text{h}$ 。

3.2.4 电动汽车约束

电动汽车 t 时段的功率状态既与该时段充放电功率相关, 也与上一时段的功率状态相关, 即

$$S_{n,t}^{EV} = S_{n,t-1}^{EV} + P_{n,t}^{EV} \quad (10)$$

式中, $S_{n,t}^{EV}$ 为电动汽车 t 时段的功率状态。

电动汽车的 t 时段功率状态应满足电池容量限制, 该时段充放电功率应小于额定充放电功率, 即

$$N_n^{EV} S_{\min}^{EV} \leq S_{n,t}^{EV} \leq N_n^{EV} S_{\max}^{EV} \quad (11)$$

$$-\eta_{\text{ch}} N_n^{EV} p_{\text{ev}} \leq P_{n,t}^{EV} \leq \eta_{\text{dch}} N_n^{EV} p_{\text{ev}} \quad (12)$$

式中: S_{\max}^{EV} 、 S_{\min}^{EV} 分别为电动汽车电池容量上下限; N_n^{EV} 为集群 n 电动汽车数量; η_{ch} 、 η_{dch} 为电动汽车充放电速率; p_{ev} 为电动汽车的电池容量。

为满足电动汽车用户出行, 其接入电网的周期内充放电电量应相等, 即

$$\sum_{t=1}^T P_{n,t}^{EV} = 0 \quad (13)$$

3.2.5 风电功率约束

风电出力具有随机及不确定性, 受预测误差限制, 调度风电功率及实际风电功率应满足预测上下误差区间范围内, 即

$$P_{W_{\min}} \leq P_{W_t}^D \leq P_{W_{\max}} \quad (14)$$

$$P_{W_{\min}} \leq P_{W_t}^N \leq P_{W_{\max}} \quad (15)$$

式中, $P_{W_{\max}}$ 、 $P_{W_{\min}}$ 分别为风电出力上下限。

3.3 min-max 调度模型

基于火电机组、电动汽车、风电出力费用及出力约束, 本文所建含风电及电动汽车接入的鲁棒经济调度模型可表述如下:

$$\begin{aligned} & \min_{[P_{i,t}, P_{n,t}^{EV}, P_{W_t}^D]} \max_{P_{W_t}^N} F \\ & \text{subject to.} \\ & \sum_{i=1}^I P_{i,t} + \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{EV} + P_{W_t}^D = P_{\text{load},t}, \forall t \\ & P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max}, \quad \forall i, \forall t \\ & \begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq U_{R,i} \cdot \Delta T \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq D_{R,i} \cdot \Delta T \end{cases}, \quad \forall i, \forall t \\ & S_{n,t}^{EV} = S_{n,t-1}^{EV} + P_{n,t}^{EV}, \quad \forall n, \forall t \\ & N_n^{EV} S_{\min}^{EV} \leq S_{n,t}^{EV} \leq N_n^{EV} S_{\max}^{EV} \\ & -\eta_{\text{ch}} N_n^{EV} p_{\text{ev}} \leq P_{n,t}^{EV} \leq \eta_{\text{dch}} N_n^{EV} p_{\text{ev}} \\ & \sum_{t=1}^T P_{n,t}^{EV} = 0 \\ & P_{W_{\min}} \leq P_{W_t}^D \leq P_{W_{\max}}, \quad \forall t \\ & P_{W_{\min}} \leq P_{W_t}^N \leq P_{W_{\max}}, \quad \forall t \end{aligned} \quad (16)$$

4 基于博弈论的鲁棒调度方法

4.1 博弈论规划模型

博弈论是现代数学理论的重要组成部分, 是解决多方利益冲突与关联的有效工具。针对规模化风-车互动接入的电力系统经济调度问题, 将大自然作为博弈参与者, 调度人员为另一博弈方, 博弈的最终目的是在大自然可能出现的任何情景下, 调度人员制定的调度策略均能保证电力系统经济运行。调度人员及大自然分别用 DS 及 NA 表示, 双方为典型的“二人零和”博弈格局, 其经济调度模型可归结为 min-max 优化问题, 博弈模型如下。

1) 参与者集合

$$N = \{\text{DS}, \text{NA}\} \quad (17)$$

2) 策略集合

$$\begin{aligned} \text{DS} &= \{P_{i,t}, P_{n,t}^{EV}, P_{W_t}^D\} \\ \text{NA} &= \{P_{W_t}^N\} \end{aligned} \quad (18)$$

3) 博弈目标

$$\begin{aligned} F_{\text{DS}} &= \min_{[P_{i,t}, P_{n,t}^{EV}, P_{W_t}^D]} F \\ F_{\text{NA}} &= \max_{[P_{W_t}^N]} F \end{aligned} \quad (19)$$

4.2 模型求解

对于本文所建 min-max 模型, 采用两阶段松弛算法^[24]对所建模型求解, 求解步骤如图 2 所示。

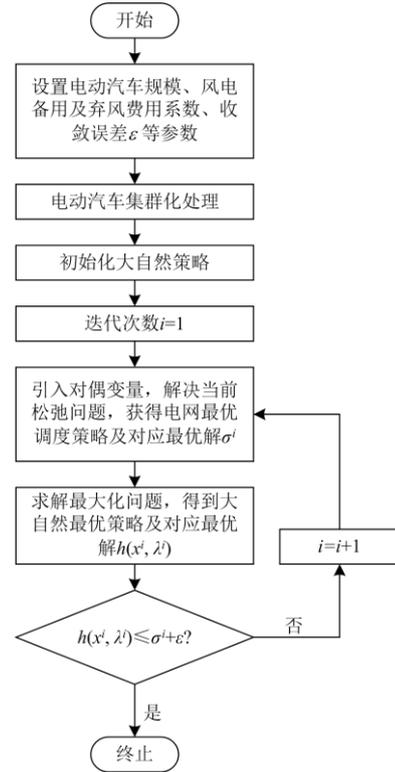


图 2 鲁棒经济调度求解流程

Fig. 2 Solving flow chart of robust economic dispatch

步骤 1: 初始化内层优化问题的策略 y^1 , 设置迭代次数 $i=1$ 。

步骤 2: 引入对偶变量 σ 及辅助变量 λ , 解决当前松弛问题, 并获得一个最优点 (x^i, λ^i) 及最优值 σ^i 。

$$\begin{aligned} & \min_{(x,\lambda)} \sigma \\ & \text{subject to. } f(x, y^i) - \lambda G(x, y^i) \leq \sigma \end{aligned} \quad (20)$$

$$x \in X$$

步骤 3: 解决最大化问题

$$\max_y f(x^i, y) - \lambda^i G(x^i, y) \quad (21)$$

$$\text{subject to. } y \in Y$$

优化内层子问题的策略为 y^{i+1} , 其对应最大值

为 $h(x^i, \lambda^i) = f(x^i, y^{i+1}) - \lambda^i G(x^i, y^{i+1})$ 。

步骤 4: 判断是否达到终止条件

若 $h(x^i, \lambda^i) \leq \sigma^i + \varepsilon$ 成立, 则 (x^i, y^{i+1}) 为所求 min-max 模型的最优解; 如果 $h(x^i, \lambda^i) > \sigma^i + \varepsilon$, 则设置 $i = i + 1$, 返回步骤 2, 同时增加如式(22)约束。

$$\text{subject to. } f(x, y^i) - \lambda G(x, y^i) \leq \sigma \quad (22)$$

可以看出, 所求外层优化问题随迭代次数增加, 约束条件增加, 松弛度不断缩小。

4.3 参数设置

本文以 10 机系统作为研究对象, 调度周期为 24 h, 电动汽车分为 12 个集群, 电池容量为 24 kWh。假定电动汽车接入电网时荷电状态为 50%, 电动汽车在网期间均能参与电网能量调度, 电池的最大放电深度为容量的 30%, 电动汽车放电电价为 0.1 美元/kWh, 充电电价为 0.08 美元/kWh, 系统备用费用系数为 150 美元/MWh, 弃风费用系数为 100 美元/MWh, 假定实际及调度风功率为预测风电上下限的 20%, 出力如图 3 所示。

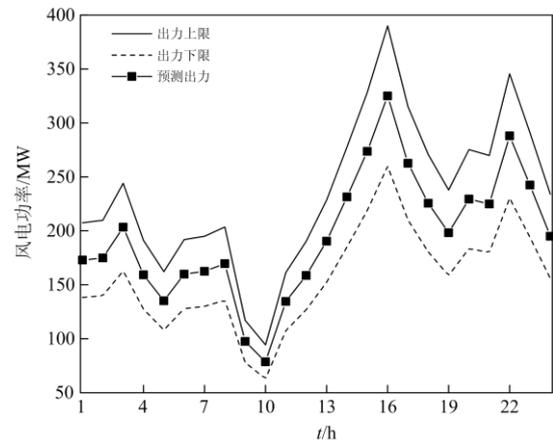


图 3 风电出力上下限

Fig. 3 Wind power output upper and lower limit

4.4 实验结果

4.4.1 调度结果

所建 min-max 二人零和博弈模型, 采用两阶段松弛算法求解。策略结果及功率平衡如表 2 及图 4 所示。

表 2 调度结果

Table 2 Scheduling result

时段	功率/MW										调度 风电	电动 汽车	实际 风电
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6	机组 7	机组 8	机组 9	机组 10			
1	150.00	135.00	100.56	109.03	229.54	159.98	129.99	119.99	29.61	21.20	166.05	-314.97	138.32
2	150.00	135.00	100.72	109.15	229.75	159.98	129.99	119.99	29.65	21.24	167.93	-243.41	139.88
3	150.00	135.00	100.86	109.29	229.95	159.98	129.99	119.99	29.69	21.27	195.07	-123.10	244.14
4	150.00	135.00	124.66	128.15	242.97	159.99	129.99	119.99	35.78	26.40	153.09	-0.04	127.40
5	150.00	135.00	167.72	162.14	242.99	159.99	130.00	120.00	46.83	35.70	129.60	0.04	162.24
6	150.00	135.00	189.43	179.36	242.99	159.99	130.00	120.00	52.39	40.37	153.90	74.55	127.92
7	150.00	135.00	208.29	201.28	242.99	159.99	130.00	120.00	52.60	40.43	155.59	105.82	195.00
8	150.00	135.00	288.27	251.26	243.00	160.00	130.00	120.00	79.97	54.99	162.92	0.59	135.72
9	155.89	188.42	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	93.73	57.96	78.00
10	155.89	188.46	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	75.43	174.22	94.38
11	155.90	188.46	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	129.22	204.42	107.64
12	155.90	188.46	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	152.31	225.34	126.88
13	155.88	188.40	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	182.81	116.91	228.54
14	150.00	135.00	334.66	294.11	243.00	160.00	130.00	120.00	79.99	54.99	222.29	-0.04	185.12
15	150.00	135.00	280.91	251.62	242.99	160.00	130.00	120.00	75.78	54.98	262.78	-88.07	218.92
16	150.00	135.00	224.18	207.08	242.99	160.00	130.00	120.00	61.32	47.85	311.86	-236.28	390.00
17	150.00	135.00	221.35	204.60	242.99	159.99	130.00	120.00	60.59	47.26	252.61	-244.40	210.08
18	150.00	135.00	221.46	204.69	242.99	159.99	130.00	120.00	60.62	47.28	216.67	-60.70	180.44
19	150.00	135.00	221.51	204.72	242.99	160.00	130.00	120.00	60.63	47.28	190.45	113.42	158.60
20	150.00	135.00	221.62	204.80	242.99	160.00	130.00	120.00	60.65	47.30	220.07	279.56	275.34
21	150.00	135.00	221.46	204.49	242.99	160.00	130.00	120.00	60.61	47.27	215.74	236.44	269.88
22	150.00	135.00	169.13	161.32	242.99	159.99	130.00	120.00	47.20	36.02	276.34	0.01	345.54
23	150.00	135.00	101.07	111.59	230.04	159.98	129.99	119.99	29.73	21.30	232.82	-89.51	193.96
24	150.00	135.00	100.76	109.19	229.81	159.98	129.99	119.99	29.66	21.25	187.18	-188.82	234.00

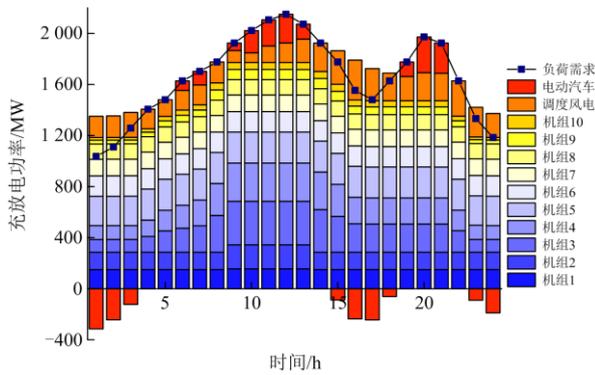


图 4 功率平衡验证

Fig. 4 Power balance verification

由图 4 可知，调度结果满足电力平衡约束，电力负荷需求主要由火电机组提供，运行总成本为 2.1035×10^6 美元，即无论大自然对调度风电造成何种影响，发电成本均不会超过采取此种调度策略的

经济运行费用。其中火电机组运行费用为 1.9533×10^6 美元，电动汽车费用为 3.7101×10^4 美元，风电误差费用为 1.1312×10^5 美元，电动汽车各集群调度策略如表 3 及图 5 所示。

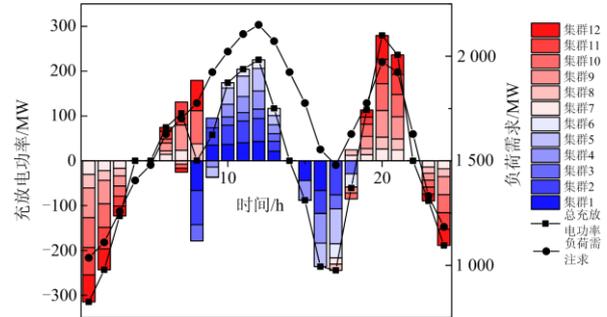


图 5 各集群电动汽车充放电策略

Fig. 5 Charging and discharging strategy of each cluster of electric vehicles

表 3 电动汽车充放电功率

Table 3 Electric vehicle charge and discharge power

时段	电动汽车充放电功率												总计
	集群 1	集群 2	集群 3	集群 4	集群 5	集群 6	集群 7	集群 8	集群 9	集群 10	集群 11	集群 12	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-30.34	-30.33	-66.27	-66.51	-61.37	-60.15	-314.97
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-21.88	-21.88	-52.34	-52.56	-47.92	-46.83	-243.41
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-16.87	-16.87	-22.59	-22.62	-22.13	-22.01	-123.10
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.04
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.38	7.72	17.50	8.88	17.29	8.78	74.55
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.38	-7.73	56.27	-8.89	51.58	-8.79	105.82
8	-66.19	-76.35	-36.34	0.00	0.00	0.00	0.00	37.77	0.00	74.03	0.00	67.68	0.59
9	34.99	38.84	21.36	-14.10	-22.37	-0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.96
10	36.46	43.11	18.48	28.03	36.31	11.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	174.22
11	40.35	48.34	18.99	35.71	45.64	15.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	204.42
12	43.20	51.35	20.92	40.38	50.30	19.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	225.34
13	21.49	21.96	17.16	19.82	20.49	15.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	116.91
14	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04
15	-44.13	0.00	0.00	-43.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-88.07
16	-66.18	-51.21	-0.27	-65.90	-52.46	-0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-236.28
17	0.00	-76.04	-31.21	0.00	-77.91	-31.77	-13.74	-13.73	0.00	0.00	0.00	0.00	-244.40
18	0.00	0.00	-29.09	0.00	0.00	-29.58	12.24	12.23	-13.18	-13.33	0.00	0.00	-60.70
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.69	13.68	27.02	27.15	15.96	15.92	113.42
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.36	26.35	59.62	59.86	54.26	53.11	279.56
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.41	24.41	49.53	49.71	44.60	43.77	236.44
22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-13.94	-13.94	-15.41	-15.41	-15.41	-15.40	-89.51
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-17.70	-17.69	-40.15	-40.32	-36.89	-36.08	-188.82

由表 3 及图 5 可知,电动汽车经过集群划分,其充放电行为更加细致具体化,相比于将其统一为一种形式进行充放电考虑,集群化处理更加贴合实际情况。对比负荷需求曲线图可知,电动汽车起到了很好的“削峰填谷”作用,在日间 06:00—13:00 时段,负荷需求逐渐增加,电动汽车采取放电策略补给电网出力,夜间 11:00—03:00 时段,负荷需求降低,为保证电力系统的平稳运行,其充电消耗过剩电能。综上所述,电动汽车能平滑功率的波动,较好地辅助电力系统安全稳定运行,起到较好的“削峰填谷”作用。

由图 6 可知,调度风功率及实际风功率均在风电出力区间内,实际风功率在风电出力上下限间徘徊,符合鲁棒经济调度的意义,当调度人员计划出调度风功率时,大自然将会选择对其偏差最大的策略,给电力系统运行造成最坏的影响,因此大自然调度策略必将位于预测区间的边界值,实际风电出力最优解必定极端化于可行域的边界上。

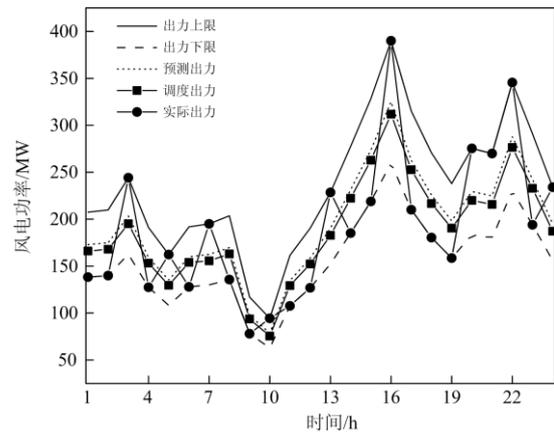


图 6 风电出力曲线

Fig. 6 Wind power output curve

4.4.2 电动汽车接入影响

电动汽车接入电力系统的规模,其他参数不变,各出力单元费用如表 4 及图 7 所示。

表 4 不同电动汽车规模发电成本

Table 4 Electricity generation costs of different electric vehicle scales

规模/辆	费用/美元	规模/辆	费用/美元		
10 000	总成本	2.1108×10 ⁶	60 000	总成本	2.1043×10 ⁶
	火电机组	1.9887×10 ⁶		火电机组	1.9476×10 ⁶
	电动汽车	8.7673×10 ³		电动汽车	4.3055×10 ⁴
	风电	1.1331×10 ⁵		风电	1.1367×10 ⁵
20 000	总成本	2.1078×10 ⁶	70 000	总成本	2.1072×10 ⁶
	火电机组	1.9768×10 ⁶		火电机组	1.9432×10 ⁶
	电动汽车	1.7054×10 ⁴		电动汽车	5.0225×10 ⁴
	风电	1.1394×10 ⁵		风电	1.1381×10 ⁵
30 000	总成本	2.1062×10 ⁶	80 000	总成本	2.1121×10 ⁶
	火电机组	1.9678×10 ⁶		火电机组	1.9415×10 ⁶
	电动汽车	2.5302×10 ⁴		电动汽车	5.7203×10 ⁴
	风电	1.1317×10 ⁵		风电	1.1333×10 ⁵
40 000	总成本	2.1061×10 ⁶	90 000	总成本	2.1165×10 ⁶
	火电机组	1.9601×10 ⁶		火电机组	1.9409×10 ⁶
	电动汽车	3.2261×10 ⁴		电动汽车	6.3144×10 ⁴
	风电	1.1373×10 ⁵		风电	1.1301×10 ⁵
50 000	总成本	2.1035×10 ⁶	100 000	总成本	2.1214×10 ⁶
	火电机组	1.9533×10 ⁶		火电机组	1.9397×10 ⁶
	电动汽车	3.7101×10 ⁴		电动汽车	6.8169×10 ⁴
	风电	1.1312×10 ⁵		风电	1.1355×10 ⁵

由表 4 及图 7 可知,随着电动汽车规模增加,电动汽车的费用逐渐升高,火电机组运行成本下降,对风电造成的影响较小,总成本呈现先下降,后逐渐上升趋势。随着电动汽车数量增加,其参与电力系统能量调度的比重将会随之增加,因此电动汽车

的辅助费用会逐渐增加。同样电动汽车参与能量调度将会进一步影响火电机组的经济运行,电动汽车数量越多,电力系统柔性增强,火电机组经济调节的范围越大,因此其经济费用逐渐减小。电动汽车接入规模较小时,对电力系统可调节效果较明显,

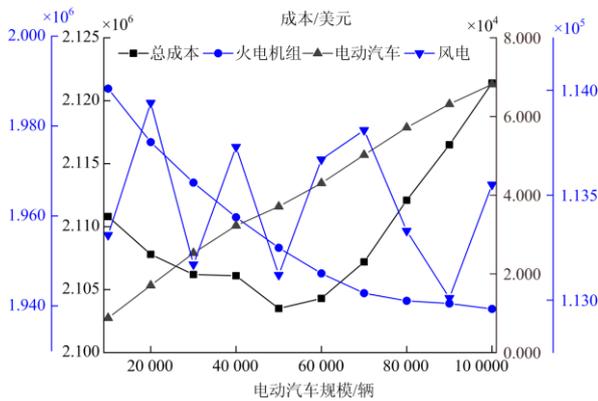


图 7 各出力单元费用变化曲线

Fig. 7 Cost change curve of each output unit

火电机组运行费用降低明显，因此总费用呈下降趋势，当其达到一定规模时，充电需求增加，随着电动汽车自身辅助费用的增加，电力系统经济运行费

用逐渐上升。综上，一定规模电动汽车以风-车互动模式参与电网调度，能有效改善系统经济运行，提高可再生能源的接纳比例及利用效率。

4.4.3 鲁棒经济性分析

将本研究所得调度策略与确定风电出力时调度策略进行对比，检验所提鲁棒经济调度策略的合理性，假定确定风出力为预测风电功率，其调度策略如表 5 所示。

由表 5 可知，当采取确定风功率经济调度时，由于实际风电功率已知，最优经济运行策略等于实际风功率，根据优先使用可再生能源发电政策，风电出力被电力系统全额消纳。风电相当于一个“负值”负荷，因此其鲁棒经济调度策略和传统机组经济调度无异。运行总成本为 1.98×10^6 美元，机组运行行为为 1.9428×10^6 美元，电动汽车运行行为为 3.7142×10^4 美元，风电误差成本为 0 美元。

表 5 固定风功率调度策略

Table 5 Fixed wind power dispatch strategy

时 段	功率/MW										调度 风电	电动 汽车	实际 风电
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6	机组 7	机组 8	机组 9	机组 10			
1	150.00	135.00	98.58	107.51	227.23	160.00	130.00	120.00	29.07	20.76	172.90	-315.04	172.90
2	150.00	135.00	98.58	107.51	227.23	160.00	130.00	120.00	29.07	20.76	174.85	-242.99	174.85
3	150.00	135.00	98.58	107.51	227.23	160.00	130.00	120.00	29.07	20.76	203.45	-123.59	203.45
4	150.00	135.00	121.92	125.97	243.00	160.00	130.00	120.00	35.06	25.80	159.25	0.00	159.25
5	150.00	135.00	165.23	160.22	243.00	160.00	130.00	120.00	46.19	35.17	135.20	0.00	135.20
6	150.00	135.00	187.23	177.62	243.00	160.00	130.00	120.00	51.84	39.92	159.90	73.48	159.90
7	150.00	135.00	202.73	200.00	243.00	160.00	130.00	120.00	51.84	39.92	162.50	107.00	162.50
8	150.00	135.00	282.73	250.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	169.65	0.62	169.65
9	153.70	185.38	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	97.50	59.43	97.50
10	153.70	185.38	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	78.65	176.28	78.65
11	153.70	185.38	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	134.55	204.38	134.55
12	153.70	185.38	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	158.60	224.33	158.60
13	153.70	185.38	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	190.45	114.48	190.45
14	150.00	135.00	329.47	290.13	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	231.40	0.00	231.40
15	150.00	135.00	275.48	247.43	243.00	160.00	130.00	120.00	74.51	55.00	273.65	-88.07	273.65
16	150.00	135.00	217.96	201.93	243.00	160.00	130.00	120.00	59.73	46.57	325.00	-235.20	325.00
17	150.00	135.00	217.52	201.58	243.00	160.00	130.00	120.00	59.62	46.47	262.60	-245.80	262.60
18	150.00	135.00	217.52	201.58	243.00	160.00	130.00	120.00	59.62	46.47	225.55	-60.75	225.55
19	150.00	135.00	217.52	201.58	243.00	160.00	130.00	120.00	59.62	46.47	198.25	114.55	198.25
20	150.00	135.00	217.52	201.58	243.00	160.00	130.00	120.00	59.62	46.47	229.45	279.35	229.45
21	150.00	135.00	217.52	201.58	243.00	160.00	130.00	120.00	59.62	46.47	224.90	235.90	224.90
22	150.00	135.00	163.41	158.15	243.00	160.00	130.00	120.00	45.72	34.77	287.95	0.00	287.95
23	150.00	135.00	98.58	108.15	227.23	160.00	130.00	120.00	29.07	20.76	242.45	-89.23	242.45
24	150.00	135.00	98.58	107.51	227.23	160.00	130.00	120.00	29.07	20.76	195.00	-189.14	195.00

综上可知,确定风功率参与电力系统最优运行经济成本小于鲁棒调度经济成本,由于鲁棒调度保证大自然最坏影响下电力系统安全稳定运行,风电所有情景下运行成本均不会超过鲁棒调度经济费用。本文所提鲁棒经济调度方法考虑了未来一切可能出现的风电出力情景,目的在于优化最坏情景下的系统最优经济运行。现实环境下,实际风功率与预测风功率存在偏差,会带来备用或弃风成本,在鲁棒调度策略下,无论未来实际风功率情景如何,基于此策略的总发电成本均不会高于鲁棒经济调度成本值,也考证了所提鲁棒经济调度的有效性。

5 结论

本文在规模化风电及电动汽车接入背景下,考虑风电出力的不确定性,基于零和博弈框架建立了风车互动模式下电力系统鲁棒经济调度min-max模型,采用二阶段松弛算法对所建模型进行求解。对于电动汽车交通属性不确定性,采用集群化处理。通过不同电动汽车规模,确定风功率运行等案例,验证了所提鲁棒经济调度策略在风电不确定性情景下的稳定经济运行特性较强。所提方法在不依赖准确风电预测的同时,解决了不确定风-车互动接入电力系统的最优经济运行问题,为不确定性分布式能源的优化决策问题提供了新的思路。

参考文献

- [1] SWANSON R A. Foundations of human resource development[J]. *Industrial & Commercial Training*, 2010, 18(7): 27-30.
- [2] 白浩,袁智勇,周长城,等. 计及新能源波动与相关性的配电网最大供电能力调度方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8): 66-73.
BAI Hao, YUAN Zhiyong, ZHOU Changcheng, et al. Dispatching method of maximum power supply capacity of a power distributed network considering fluctuation and correlation of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8): 66-73.
- [3] 鲁鹏,田浩,武伟鸣,等. 需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑负荷峰谷模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(1): 42-51.
LU Peng, TIAN Hao, WU Weiming, et al. Demand side energy hub and energy storage cooperate to smooth peak and valley and improve wind power consumption model[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1): 42-51.
- [4] MADHIARASAN M. Accurate prediction of different forecast horizons wind speed using a recursive radial basis function neural network[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(3): 48-56.
- [5] 李军徽,冯喜超,严干贵,等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(2): 163-170.
- [6] PATTANAIK J K, BASU M, DASH D P. Review on application and comparison of metaheuristic techniques to multi-area economic dispatch problem[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 178-188.
- [7] 彭元,娄素华,吴耀武,等. 考虑储液式碳捕集电厂的含风电系统低碳经济调度[J/OL]. *电工技术学报*: 1-9[2021-04-01]. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201249.
PENG Yuan, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Low-carbon economic dispatch of power system with wind power considering solvent-stored carbon capture power plant[J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*: 1-9[2021-04-01]. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201249.
- [8] 韩自奋,景乾明,张彦凯,等. 风电预测方法与新趋势综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(24): 178-187.
HAN Zifen, JING Qianming, ZHANG Yankai, et al. Review of wind power forecasting methods and new trends[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(24): 178-187.
- [9] 潘锋,陈炯,张乔林. 考虑风电不确定性的电热系统经济调度[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(1): 206-210.
PAN Feng, CHEN Jiong, ZHANG Qiaolin. Economic dispatch of electrothermal system considering wind power uncertainty[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(1): 206-210.
- [10] 陈明强,高健飞,畅国刚,等. V2G模式下微网电动汽车有序充电策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(8): 141-148.
CHEN Mingqiang, GAO Jianfei, CHANG Guogang, et al. Research on orderly charging strategy of micro-grid electric vehicles in V2G model[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(8): 141-148.
- [11] HUANG Z, FANG B, DENG J. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 48-55.

- [12] 李景丽, 时永凯, 张琳娟, 等. 考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 94-102.
LI Jingli, SHI Yongkai, ZHANG Linjuan, et al. Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 94-102.
- [13] 刘维扬, 王冰, 王敏, 等. 智能合约技术下电动汽车入网竞价机制研究[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4344-4352.
LIU Weiyang, WANG Bing, WANG Min, et al. Research on electric vehicles participating in bidding mechanism of power grid based on smart contract technology[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4344-4352.
- [14] GUO Q, HAN J, YOON M, et al. A study of economic dispatch with emission constraint in smart grid including wind turbines and electric vehicles[C] // 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), October 9-12, 2012, Seoul, Korea.
- [15] 王金明, 张卫国, 朱庆, 等. 含风电及电动汽车虚拟电厂参与电力市场的优化调度策略[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1): 28-34, 47.
WANG Jinming, ZHANG Weigu, ZHU Qing, et al. Optimal scheduling strategy for VPP participating in the power market including wind power and EV[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1): 28-34, 47.
- [16] 张晓花, 谢俊, 朱正伟, 等. 考虑不确定性的智能电网多目标机组组合研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3055-3062.
ZHANG Xiaohua, XIE Jun, ZHU Zhengwei, et al. Research of multi-object unit combination in smart grid with uncertainty[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(12): 3055-3062.
- [17] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [18] 葛晓琳, 郝广东, 夏澍, 等. 考虑规模化电动汽车与风电接入的随机解耦协同调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 54-62.
GE Xiaolin, HAO Guangdong, XIA Shu, et al. Stochastic decoupling collaborative dispatch considering integration of large-scale electric vehicles and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 54-62.
- [19] WANG X, DENG Y, REN Z, et al. Robust day-ahead dispatch for combined heat and power microgrid considering wind-solar power uncertainty[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 467(1).
- [20] MYERSON R B. Game theory: analysis of conflict[M]. Boston: Harvard University Press, 1997.
- [21] 杨国清, 王亚萍, 王德意, 等. 博弈论在光伏并网鲁棒优化调度问题中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 129-134.
YANG Guoqing, WANG Yaping, WANG Deyi, et al. Robust optimal dispatch of power system with photovoltaic power stations based on game theory[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 129-134.
- [22] 杨楠, 董邦天, 黄禹, 等. 考虑不确定性和多主体博弈的增量配电网源网荷协同规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2689-2702.
YANG Nan, DONG Bangtian, HUANG Yu, et al. Incremental distribution network source-load collaborative planning method considering uncertainty and multi-agent game[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2689-2702.
- [23] 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 Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [24] SHIMIZU K, AIYOSHI E. Necessary conditions for min-max problems and algorithms by a relaxation procedure[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1980, 25(1): 62-66.

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-08-18

作者简介:

董燕(1977—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为智能信息处理; E-mail: zysdy@126.com

杨俊林(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为含新能源的电力系统优化运行; E-mail: ygl8587@163.com

朱永胜(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源系统优化运行与调度。E-mail: zhuydsy@163.com

(编辑 葛艳娜)