

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191516

含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究

应飞翔¹, 徐天奇¹, 李琰¹, 高鑫², 贾鉴³, 汪宇航¹, 何民⁴, 田华⁵

(1. 云南民族大学电气信息工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 江西 南昌 330024; 3. 中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司, 云南 昆明 650051; 4. 国网浙江建德市供电有限公司, 浙江 杭州 311600; 5. 昆明电器科学研究所, 云南 昆明 650221)

摘要: 研究商业型虚拟电厂运行机制能为新能源电源入网提供一定的技术支撑。将风力发电系统、光伏发电系统、储能系统、电动汽车充电站整合为一个虚拟发电厂, 可显著降低因新能源单独并网时的出力不确定性及电动汽车无序充电对电网造成的不良影响, 减轻电网压力, 并可有效促进新能源消纳。以虚拟电厂经济效益最优为目标, 在满足各约束条件的前提下, 对其进行调度优化策略研究。通过线性惯性权重粒子群算法及非线性惯性权重粒子群算法对所提模型进行求解, 结果表明采用非线性惯性权重粒子群算法不仅能避免过早收敛陷入局部最优而且得到的效益更高。通过算例验证了该模型的合理性及求解方法的有效性。

关键词: 商业型虚拟电厂; 电动汽车充电站; 经济运行; 调度优化策略; 粒子群算法

Research on day-to-day scheduling optimization strategy of a commercial virtual power plant with an electric vehicle charging station

YING Feixiang¹, XU Tianqi¹, LI Yan¹, GAO Xin², JIA Jian³, WANG Yuhang¹, HE Min⁴, TIAN Hua⁵

(1. School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China;
2. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330024, China;
3. China Energy Engineering Group Yunnan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Kunming 650051, China;
4. State Grid Zhejiang Jiande Power Supply Co., Ltd., Hangzhou 311600, China;
5. Kunming Electric Apparatus Research Institute, Kunming 650221, China)

Abstract: Research on the operation mechanism of a commercial virtual power plant provides another possible method for a new energy power source integrating into power grids. Integrating wind power, photovoltaic power, an energy storage systems, and an electric vehicle charging station into a virtual power plant can effectively reduce the power grid's stability risk. This is caused by the separate renewable energy output uncertainty and disordered charging of electric vehicles. Adverse impacts on power systems could be alleviated and the consumption of renewable energy could be promoted. The optimal economic benefit of the virtual power plant is taken as the objective, and under the premise of satisfying various constraints, a scheduling optimization strategy is studied. The proposed model is solved by linear and nonlinear inertia weight particle swarm optimization. The results show that the premature convergence at a local optimum can be avoided and higher benefits can be gained with the nonlinear inertia weight particle swarm optimization. A calculated example is carried out to verify the rationality of the model and the effectiveness of the solution.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61761049) and Yunnan Provincial Department of Education Science Research Fund Project (No. 2019Y0169).

Key words: commercial virtual power plant; electric vehicle charging station; economic operation; scheduling optimization strategy; particle swarm optimization

0 引言

随着全球性环境问题日益严重, 分布式发电技

术已成为国内外研究的热点^[1-2], 但与传统集中式电源相比, 分布式电源受环境因素影响较大, 所发出的电能具有间隙性、波动性的特点。大规模分布式电源接入电网后, 会对系统的可靠性、安全性造成一定的影响^[3-6]。虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)是通过内部的控制中心利用通信技术将多个分布式

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61761049); 云南省教育厅科学研究基金项目资助(2019Y0169)

电源、可控负荷及储能装置进行聚合和控制,使其成为一个特殊形式的电厂参与到电网管理及电力市场交易^[7]中。目前,虚拟电厂可分为技术型虚拟电厂(Technical Power Plant, TVPP)和商业型虚拟电厂(Commercial Virtual Power Plant, CVPP)两大类^[8],技术型考虑物理限制及VPP可提供的潜在服务,商业型则从虚拟电场的优化调度、最优发电计划的制定等方面入手^[9]。

针对CVPP而言,文献[10]建立了考虑分时电价的虚拟发电厂调度模型,模型中考虑了分布式电源发电的波动性、可控电源的发电计划及峰谷电价差,并以虚拟电厂的发电运行成本最低为目标,研究分时电价对虚拟发电厂调度策略的影响。文献[11]采用水电站容量对风电预测误差进行补偿的方式,基于随机利润模型,对含风-水发电联合系统的虚拟发电厂日前运行进行规划。文献[12]分析了虚拟电厂在孤网及并网情况下不同负荷曲线形状、风电价格、备用价格等因素对其整体表现的影响,并通过算例验证了风-光-水虚拟电厂协同调度模型的可行性。文献[13]考虑风电场出力相关性及其随机性对虚拟电厂调度策略的影响,以虚拟电厂总运行成本最低为目标,建立内部资源经济优化调度模型。文献[14-16]则从虚拟电厂参与电力市场的角度入手,研究计及不同因素的虚拟发电厂短期交易与竞价策略。综上所述,目前国内外主要从分时电价、风/水发电互补、风电场出力相关性、电力市场等因素入手,对虚拟电厂调度策略及交易竞价策略进行研究,但对含电动汽车充电站的CVPP日前调度策略研究则较少涉及。然而随着电动汽车关键技术的不断发展,未来势必有更多的电动汽车参与到大电网的运行中来^[17]。因此,为了顺应未来发展趋势,对含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略进行研究显得尤为重要。

鉴于此,本文在考虑电动汽车充电站充电需求、风光发电系统出力、储能系统储能的前提下提出了含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略模型。以商业型虚拟电厂的经济效益最大为目标,以风光预测出力及电动汽车充电的预测负荷作为约束条件,利用线性惯性权重粒子群算法及非线性惯性权重粒子群算法分别对模型求解。通过算例分析,进一步证明了该模型的合理性及求解方法的有效性。

1 CVPP 模式下电动汽车充电站消纳新能源概述

通过CVPP内部的调控中心并利用通信技术将

风电、光伏、储能及电动汽车充电站进行聚合,以整体形式参与电网市场交易及电网运行。首先风/光伏发电企业通过历史数据预测未来一天内的风/光伏发电量,并将预测发电量上报虚拟发电厂;其次CVPP根据电动汽车的负荷预测及新能源发电量的预测给出次日的调度策略,并下发给各签约用户及电网公司;最后各签约企业根据调度策略进行调度。模型如图1所示。

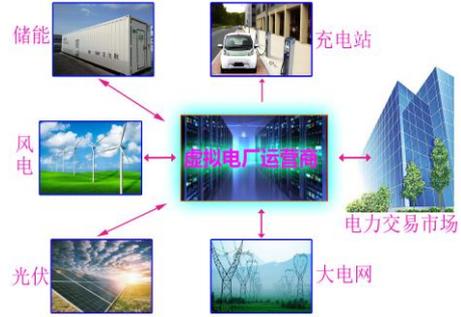


图1 CVPP模式下电动汽车充电站消纳新能源模型

Fig. 1 New energy model for electric vehicle charging station in CVPP mode

2 预测模型

2.1 单台风机出力预测模型

单台风机出力预测模型由风速预测及风机出力函数组成。风速预测是基于历史风速数据并采用自回归滑动模型建立的风速序列 v_t ^[18]。在预测出每小时的风速序列后,采用如下函数表达式建立风机出力模型^[19]。

$$P_{w,j,\text{forecast}}^t = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_t \leq v_{ci} \\ (\alpha + \beta v_t + \gamma v_t^2) P_r & v_{ci} \leq v_t \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v_t \leq v_{co} \\ 0 & v_t \geq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{w,j,\text{forecast}}^t$ 为第 t 个时段的单台风机的预测出力, kW; P_r 为风机额定功率, kW; v_{ci} 、 v_r 、 v_{co} 分别表示风机的切入风速、额定风速及切出风速, km/h; α 、 β 、 γ 分别为风机功率特性曲线的待定系数^[20]。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[v_{ci}^2 + v_{ci} v_r - 4 v_{ci} v_r \left[\frac{v_{ci} + v_r}{2 v_r} \right]^3 \right] \\ \beta = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[4(v_{ci} + v_r) \left[\frac{v_{ci} + v_r}{2 v_r} \right]^3 - (3 v_{ci} + v_r) \right] \\ \gamma = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[2 - 4 \left[\frac{v_{ci} + v_r}{2 v_r} \right]^3 \right] \end{cases} \quad (2)$$

2.2 单块光伏电板出力预测模型

单块光伏电板出力模型由光辐照度序列及光伏出力函数组成。本文中光辐照度序列由 Homer 软件生成, 考虑光伏出力受温度的影响较小, 因此采用只考虑光辐照度的光伏出力模型^[21-22]。

$$P'_{si,forecast} = \begin{cases} P_{sn}(G_{bt}^2 / (G_{std}R_c)) & 0 \leq G_{bt} < R_c \\ P_{sn}(G_{bt} / G_{std}) & R_c \leq G_{bt} < G_{std} \\ P_{sn} & G_{std} \leq G_{bt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P'_{si,forecast}$ 为第 t 个时段的单块光伏电板的预测出力, kW; P_{sn} 为光伏电板额定功率, kW; R_c 为光伏出力从非线性到线性转变过程中的某一特定光强, kW/m²; G_{std} 为额定光强, kW/m²; G_{bt} 为光辐照度序列, kW/m²。

2.3 电动汽车充电负荷预测模型

对于采用蒙特卡洛法预测电动汽车充电负荷而言: 在输入充电功率、充电效率、最大日行驶里程等基本参数的基础上产生日基础随机数、起始荷电状态、开始充电时间并计算充电持续时间^[23], 得到单辆电动汽车的充电负荷, 再将所有充电负荷进行叠加得到电动汽车总充电负荷, 表示为

$$P'_{e,forecast} = \sum_{n=1}^N P'_n \quad (4)$$

式中: N 为第 t 个时段进行充电的电动汽车数量; $P'_{e,forecast}$ 为第 t 个时段的预测总充电负荷; P'_n 为在第 t 个时段内第 n 辆车的预测充电负荷。

3 含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略模型

3.1 目标函数

以 CVPP 的经济效益最优为目标建立目标函数。文中目标函数的建模考虑电池储能系统损耗成本、风电机组及光伏机组维护成本、大电网供电时 CVPP 内部电动汽车充电站补贴成本、CVPP 内部电动汽车充电站供电收益、“源荷”双重性收益五个方面。

1) 电池储能系统损耗成本

电池储能损耗成本包括储能电池运行维护成本及储能电池能量损耗成本, 其函数表达式为

$$C'_d = C'_{dy} + C'_{dn} \quad (5)$$

式中: C'_d 为第 t 个时段电池储能系统损耗成本; C'_{dy} 为第 t 个时段储能电池运行维护成本; C'_{dn} 为第 t 个时段储能电池能量损耗成本。

$$C'_{dy} = \beta \times (f'_{b,t,plan} + f'_{b,t,plan}) + \alpha \times P_b \quad (6)$$

式中: β 为储能电池运行成本系数; $f'_{b,t,plan}$ 为单位时间 t 内储能电池计划充电电量; $f'_{b,t,plan}$ 为单位时间 t 内储能电池计划放电电量; α 为储能电池维护成本系数; P_b 为储能电池的额定功率。

$$C'_{dn} = \varphi \times \left[(1 - \eta^+) \times f'_{b,t,plan} + (1 - \eta^-) \times f'_{b,t,plan} \right] \quad (7)$$

式中: φ 为储能电池的能量损失成本系数; η^+ 、 η^- 分别为储能电池的充放电效率。

2) 风电机组及光伏机组维护成本

$$C'_{sw} = \lambda_w \sum_{wj=1}^{N_w} P'_{wj,plan} + \lambda_s \sum_{si=1}^{N_s} P'_{si,plan} \quad (8)$$

式中: C'_{sw} 为第 t 个时段风电机组及光伏机组维护成本; λ_w 为风机的运行维护系数; N_w 为风机的台数;

$\sum_{wj=1}^{N_w} P'_{wj,plan}$ 为第 t 个时段以 CVPP 收益最优为目标的

风电机组的计划发电量; λ_s 为光伏的运行维护系

数; N_s 为光伏电板的数量; $\sum_{si=1}^{N_s} P'_{si,plan}$ 为第 t 个时段

以 CVPP 收益最优为目标的光伏发电机组的计划发电量。

3) 大电网供电时 CVPP 内部电动汽车充电站补贴成本

若 CVPP 内部电动汽车充电站当前时段内供电量并不能满足电动汽车充电需求时, 差值电量由电网提供。因此, 需要对这一部分负荷给予一定的补贴, 其贴现成本函数为

$$C'_{ev} = \begin{cases} \lambda_{ev} \times (P'_{e,forecast} - P'_{e,plan}) & P'_{e,plan} < P'_{e,forecast} \\ 0 & P'_{e,plan} \geq P'_{e,forecast} \end{cases} \quad (9)$$

式中: C'_{ev} 为第 t 个时段大电网供电时 CVPP 内部电动汽车充电站补贴成本; λ_{ev} 为贴现系数; $P'_{e,plan}$ 为待寻优求解值, 代表第 t 个时段对电动汽车充电站供电的计划电量, 其表达式如式(10)。

$$P'_{e,plan} = \sum_{m=1}^M P'_m \quad (10)$$

式中: M 为第 t 个时段进行充电的电动汽车数量;

P'_m 为在第 t 个时段内第 M 辆车的供电电量。

4) CVPP 内部电动汽车充电站供电收益

CVPP 内部电动汽车充电站供电收益表达式为

$$R'_t = \gamma_t^L P'_{e,plan} \quad (11)$$

式中: R'_t 为第 t 个时段 CVPP 内部电动汽车充电站供电收益; γ_t^L 为 CVPP 内部电动汽车充电站的售电电价。

5) “源荷”双重性收益

CVPP 具有“源荷”双重性, 当其内部分布式电源的发电量大于内部负荷消耗量时, 可将剩余电量卖给电网, 而当发电量不能满足内部负载需求时, CVPP 则需从电网购电^[24], 则第 t 个时段“源荷”双重性收益为

$$R_2^t = \begin{cases} P^t \gamma_{t1}^D & P^t \geq 0 \\ P^t \gamma_{t2}^D & P^t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: R_2^t 为第 t 个时段 CVPP 的“源荷”双重性收益; γ_{t1}^D 为第 t 个时段 CVPP 向电网售电的电价; γ_{t2}^D 为第 t 个时段 CVPP 从电网购电的电价; P^t 为第 t 个时段 CVPP 向电网售出或购入的电量, P^t 的计算公式如式(13)所示。

$$P^t = \sum_{si=1}^{N_s} P_{si,plan}^t + \sum_{wj=1}^{N_w} P_{wj,plan}^t - P_{e,plan}^t - P_{b,plan}^t \quad (13)$$

式中, $P_{b,plan}^t$ 为第 t 个时段储能电池的计划充放电功率。

综上条件, CVPP 的经济效益最优目标函数可表示为

$$\max R = \sum_{t=1}^{24} (R_1^t + R_2^t - C_d^t - C_{sw}^t - C_{ev}^t) \quad (14)$$

3.2 约束条件

1) 对风光机组运行计划的约束

$$0 \leq \sum_{wj=1}^{N_w} P_{wj,plan}^t \leq \sum_{wj=1}^{N_w} P_{wj,forecast}^t \quad (15)$$

$$0 \leq \sum_{si=1}^{N_s} P_{si,plan}^t \leq \sum_{si=1}^{N_s} P_{si,forecast}^t \quad (16)$$

2) 电动汽车供电电量上下限约束

由目标函数可知, 尽管当第 t 个时段对电动汽车充电站供电电量大于第 t 个时段的预测总充电负荷时, 大电网供电时 CVPP 内部电动汽车充电站补贴成本为 0, 但在实际情况中电能是实时平衡, 不存在电动汽车充电站供电电量远远大于预测量这种现象。因此, 本文将第 t 个时段对电动汽车充电站供电的计划电量上下限约束在第 t 个时段的预测总充电负荷范围内, 如式(17)所示。

$$0 \leq P_{e,plan}^t \leq P_{e,forecast}^t \quad (17)$$

3) 储能系统约束条件

$$f_{b,min} \leq f_{b,t-1} + \eta^+ \times f_{b,t,plan}^+ - \frac{1}{\eta^-} \times f_{b,t,plan}^- \leq f_{b,max} \quad (18)$$

$$0 \leq f_{b,t,plan}^+ \leq \delta_b^+ \times \mu_{b,t} \quad (19)$$

$$0 \leq f_{b,t,plan}^- \leq \delta_b^- \times \nu_{b,t} \quad (20)$$

$$\mu_{b,t} + \nu_{b,t} \leq 1 \quad (21)$$

式中: $f_{b,t-1}$ 为调度周期 $t-1$ 结束后在电池中存储的能量; $f_{b,min}$ 、 $f_{b,max}$ 分别为电池陈列的储能最小容量及最大容量; $\mu_{b,t}$ 及 $\nu_{b,t}$ 为二进制变量, 当 $\mu_{b,t} = 1$ 时电池处在充电状态, 当 $\nu_{b,t} = 1$ 时电池处在放电状态; δ_b^+ 、 δ_b^- 分别为一个调度周期内能充入电池的最大能量及从电池内放出的最大能量。

4 算法及求解流程

4.1 基本粒子群算法

基本粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于群体优化的随机优化技术, 由于其在求解过程中需要调整的参数较少, 结构简单, 具有相当快的逼近最优解的速度, 可以有效地对系统参数进行优化, 利于工程实现^[25-26]。因此, 采用粒子群算法对本文所提模型进行求解, 在基本粒子群算法中更新粒子的速度和位移的计算公式为^[27]

$$v_{i,j}^{t+1} = \omega v_{i,j}^t + c_1 r_1 (p_{i,j}^t - x_{i,j}^t) + c_2 r_2 (p_{g,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (22)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1} \quad (23)$$

式中: t 为迭代次数; i 为第 i 个个体; j 为问题的维数; ω 为粒子移动的惯性权重, 随着迭代次数的增加, 惯性权重 ω 从最大变化到最小, 变化的公式为

$$\omega = \omega_{max} - \frac{t \times (\omega_{max} - \omega_{min})}{t_{max}} \quad (24)$$

式中: ω_{max} 为最大惯性权重; ω_{min} 为最小惯性权重; t_{max} 为最大迭代次数; t 为当前迭代次数。

4.2 改进粒子群算法

式(24)为标准的惯性权重递减策略, 采用该惯性权重初期有较强的全局搜索能力, 但初期搜索不到最优点, 后期搜索结果容易陷入局部最优, 而采用非线性动态的惯性权重法可以弥补这种缺陷^[28], 其变化公式为

$$\omega(t) = \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \exp(-k \times (\frac{t}{t_{max}})^2) \quad (25)$$

式中, k 为控制因子, 对变化曲线的平滑度起到控制作用。

当迭代次数为 3 000 次, k 分别取 0.5、1.5、3、5、10 这 5 个数值时, 惯性权重的变化曲线图如图 2 所示。为保证搜索能力呈现出前期全局强后期局部强的趋势, 惯性曲线应具备前期凸后期凹的特点, 由图 2 可知当 k 值在 5~10 时较为合适, 因此在本文中 k 值取为 5。

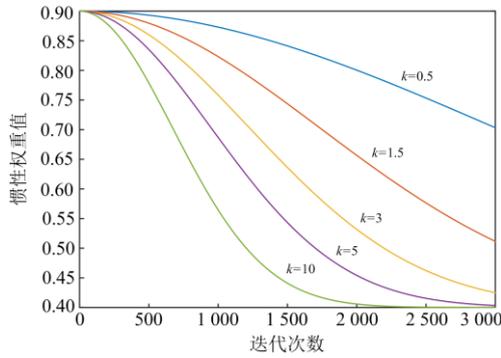


图2 不同k值情况下惯性权重值随迭代次数的变化曲线图
Fig. 2 Variation of inertia weight value with the number of iterations under different k values

4.3 求解流程

采用基本粒子群算法求解流程如图3所示。首先基于历史数据采用自回归滑动模型及 Homer 软件产生 24 h 的预测风速及光辐照度；其次在上述数据的基础上用风/光出力函数生成 24 h 的风/光预测出力，并载入 24 h 某区域内电动汽车充电的预测负荷；最后以虚拟电厂的经济效益最大为目标，以预测出力及电动汽车充电的预测负荷作为约束条件的上下限并采用线性惯性权重粒子群算法(LDWPSO)寻优求解，求得的虚拟电厂总收益、虚拟电厂向电

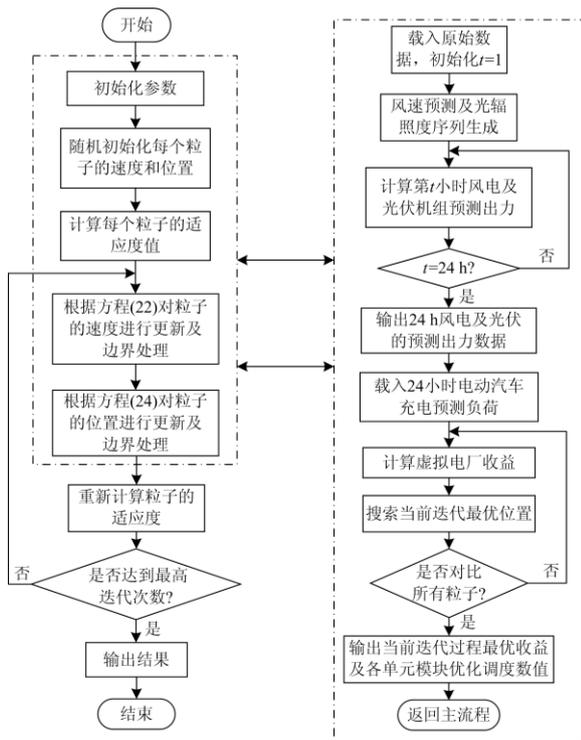


图3 基本粒子群算法求解流程

Fig. 3 Basic particle swarm algorithm solving process

动汽车充电站供给电量的运行计划、虚拟电厂中储能的运行计划、虚拟电厂中风电机组出力的运行计划及虚拟电厂中光伏机组出力的运行计划，并进行相应的分析。采用非线性惯性权重粒子群算法(NDWPSO)进行求解的流程与采用线性惯性权重粒子群算法(LDWPSO)求解的流程不同之处在于前者对粒子的位置进行更新及边界处理是根据方程(25)进行的。

5 算例仿真

5.1 系统参数设置

本文的算例分析中包括风力发电系统、光伏发电系统、储能系统及电动汽车充电站四种单元。风力及光伏发电机组参数设定分别见表1、表2，光辐照度数据及风速预测数据如图4所示，风电机组及光伏机组出力预测数据如图5所示^[20]；假设电池储能系统的储能容量为 280 kWh，初始状态时储能系统的电池深度为 0，充放电效率为 0.9，储能系统其他相关参数设定见表3；假设 CVPP 对电动汽车的贴现成本系数为 0.04 元/kWh，CVPP 购电及售电价见表4。

表1 风力发电机组参数信息

Table 1 Wind generator set parameter information

风机台数/台	额定功率/kW	切入风速/(km/h)	额定风速/(km/h)	切出风速/(km/h)	运维成本/(元/kWh)
1 000	45	10.8	46.8	90	0.018 7

表2 光伏发电机组参数信息

Table 2 Photovoltaic generator set parameter information

光伏电板数量/块	额定功率/kW	额定光强/(kW/m ²)	特定光强/(kW/m ²)	运维成本/(元/kWh)
1 500	10	1	0.15	0.007 9

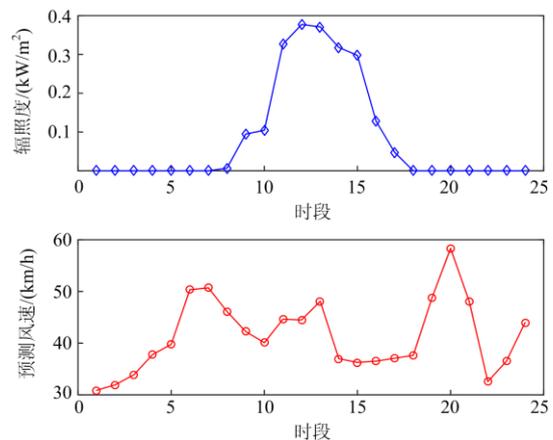


图4 光辐照度数据及风速预测数据图

Fig. 4 Solar irradiance and wind speed prediction data chart

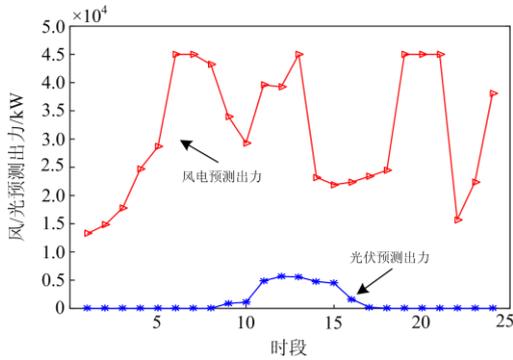


图 5 风电机组及光伏机组出力预测数据图

Fig. 5 Wind power unit and photovoltaic unit output forecast data chart

文献[29]根据《中国汽车产业发展报告(2008年)》中预测的电动汽车未来总量比例,假设某地区电动汽车的总数量为 13 000 辆,并在考虑常规和快速这两种充电模式的基础上,将 24 h 分为 48 个时段,分别得到每 30 min 内电动汽车的充电负荷曲线。本文采用其预测数据,取每小时内 2 时段的最大值作为该小时电动汽车充电负荷的预测数据,如图 6 所示。

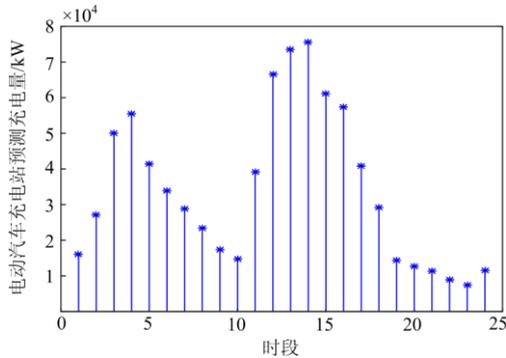


图 6 电动汽车实时充电预测负荷图

Fig. 6 Electric vehicle real-time charging forecast load map

表 3 储能电池相关参数信息

Table 3 Energy storage battery related parameter information

储能系统运行管理			储能电池剩余		储能电池充放	
系数/(元/kWh)			电量/kWh		电量/kW	
维护成本系数	运行成本系数	能量损失成本系数	下限	上限	下限	上限
0.009	0.05	0.025	3	0	280	-100 100

表 4 CVPP 购电及售电电价信息

Table 4 CVPP purchase and sale price information

类型	电价/(元/kWh)
CVPP 从电网购电价格	0.51
CVPP 向电网售电价格	0.39
CVPP 内部电动汽车充电站的售电价格	0.47

5.2 结果分析

在本文的算例仿真中采用 LDWPSO 算法及 NDWPSO 算法进行仿真,设定种群规模大小为 300,迭代次数为 3 000,搜索空间维数为 96,最大惯性权重 ω_{max} 为 0.9,最小惯性权重 ω_{min} 为 0.4,最大飞跃速度 v_{max} 为 50,控制因子 k 为 5,学习因子 c_1 为 0.5,学习因子 c_2 为 2.5。采用两种算法得到的虚拟电厂总收益进化曲线如图 7 所示。

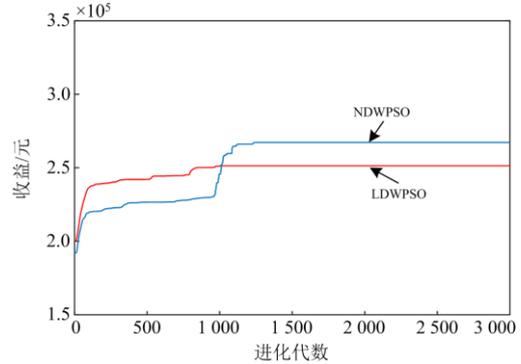


图 7 虚拟电厂总收益进化过程

Fig. 7 Virtual plant total revenue evolution process

其中,一天每个时段供给电动汽车充电站电量的运行计划变化趋势如图 8 所示。

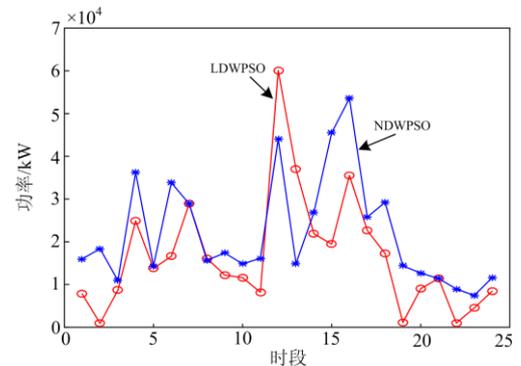


图 8 虚拟电厂向电动汽车充电站供给电量的运行计划变化趋势

Fig. 8 Trends in the operation plan of the virtual power plant supplying electricity to the electric vehicle charging station

由图 6 及图 8 可知:采用 LDWPSO 算法及 NDWPSO 算法得到的虚拟电厂向电动汽车充电站供给电量的实时运行计划均在电动汽车实时充电预测负荷内,但采用 NDWPSO 算法得到的运行计划较 LDWPSO 而言波动范围更小,且每个小时都在向电动汽车充电站供给电量,能较好消纳风/光伏发电量,而采用 LDWPSO 算法得到的运行计划则存在某几个小时不对电动汽车充电站供电的情况。

一天每个时段储能运行计划变化趋势如图 9 所示，其中功率为正代表储能电池处于充电状态，功率为负代表储能电池处于放电状态。

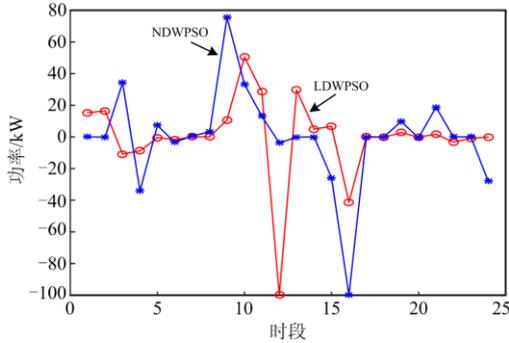


图 9 虚拟电厂中储能的运行计划变化趋势
Fig. 9 Trends in operational planning of energy storage in virtual power plants

一天每个时段风电机组出力的运行计划变化趋势如图 10 所示。

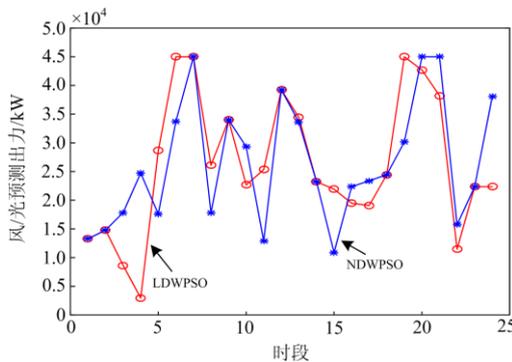


图 10 虚拟电厂中风电机组出力的运行计划变化趋势
Fig. 10 Trends in the operation plan for the output of wind turbines in virtual power plants

由图 5 及图 10 可知：采用 LDWPSO 算法及 NDWPSO 算法得到的风电机组出力的运行计划均在风电机组预测出力范围内，但采用 NDWPSO 算法得到的风电机组计划出力波动范围更小，较 LDWPSO 得到的计划出力而言更加稳定。

一天每个时段光伏出力的运行计划变化趋势如图 11 所示。

由图 5 及图 11 可知：采用 LDWPSO 算法及 NDWPSO 算法得到的光伏机组出力的运行计划均在光伏机组预测出力范围内，且采用两者算法得到出力运行计划重合度较高，但采用 NDWPSO 算法得到的运行计划在 11 时及 12 时所需的光伏出力较 LDWPSO 算法而言更多。

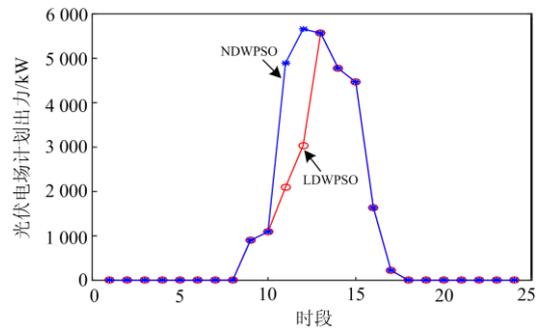


图 11 虚拟电厂中光伏机组出力的运行计划变化趋势
Fig. 11 Trends in the operation plan of photovoltaic units output in virtual power plants

综上图 7—图 11 中数据可得：采用 LDWPSO 及 NDWPSO 优化求得的虚拟电厂向电动汽车充电站供给电量、储能运行计划、风电机组出力、光伏机组出力均满足约束条件。但 LDWPSO 在 900 次左右收敛，而 NDWPSO 则在 1 300 次左右趋于收敛，采用后者有效解决了过早陷入局部极值的问题，并且求得的总收益利润为 267 250 元，较采用前者求得的总收益 251 350 元提高了 15 900 元。因此，采用非线性惯性权重的粒子群算法寻优能力更加优越，更适合求解本文所提的模型。并且采用 NDWPSO 算法所得的各个单元运行计划较 LDWPSO 算法而言更稳定，更好地促进了风/光的消纳。

6 结论

本文将风光发电系统、储能系统、电动汽车充电站组成虚拟发电厂，对内部各单元调度策略进行研究，以虚拟电厂效益最优为目标，在各约束条件均满足的前提下，提出各组成部分的调度策略。利用 LDWPSO 及 NDWPSO 算法对所提模型进行求解，结果证明采用 NDWPSO 算法能避免过早收敛陷入局部最优，具有更好的寻优能力，且求得的效益更高，更好地促进了风/光的消纳。

针对本文模型将在以下方面进行后续研究：

- 1) 考虑分时电价对含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度策略的影响，制定在分时电价影响下的调度策略；
- 2) 本文仅考虑了电动汽车的充电特性，后期可进一步考虑电动汽车的放电特性，将电动汽车作为特有储能单元参与虚拟电厂的调度。

参考文献

[1] 叶鹏, 李山, 何淼, 等. 风储孤网系统运行与控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 163-170.
YE Peng, LI Shan, HE Miao, et al. Review of operation and control of the wind storage isolated network system[J].

- Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 163-170.
- [2] 裴哲义, 丁杰, 李晨, 等. 分布式光伏并网问题分析与建议[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 80-87.
PEI Zheyi, DING Jie, LI Chen, et al. Analysis and suggestion for distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 80-87.
- [3] 刘文霞, 李征洲. 北美可靠性风险评价指标及应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 180-187.
LIU Wenxia, LI Zhengzhou. North American reliability risk assessment indicators and application analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 180-187.
- [4] XIE K, HUI H, DING Y. Review of modeling and control strategy of thermostatically controlled loads for virtual energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 283-295. DOI: 10.1186/s41601-019-0135-3.
- [5] 应飞祥, 姜燕波, 何民, 等. 含风储系统的电力系统可靠性评估进展与展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 1-8, 42.
YING Feixiang, JIANG Yanbo, HE Min, et al. Progress and prospect of reliability assessment of power system with wind farm and energy storage system[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 1-8, 42.
- [6] 周任军, 吕佳, 张武军, 等. 气电虚拟电厂多能源市场竞标策略[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 120-127.
ZHOU Renjun, LÜ Jia, ZHANG Wujun, et al. Bidding strategies for gas-electricity virtual power plants in multi-energy market[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 120-127.
- [7] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111.
- [8] LUKOVIC S, KAITOVIC I, MURA M, et al. Virtual power plant as a bridge between distributed energy resources and smart grid[C] // 2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, January 5-8, 2010, Honolulu, HI, USA: 1-8.
- [9] 乐健, 柳永妍, 叶曦, 等. 商业型虚拟发电厂调度优化策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 159-167.
LE Jian, LIU Yongyan, YE Xi, et al. Review on dispatch optimization strategies of commercial virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 159-167.
- [10] 冯其芝, 喻洁, 李扬, 等. 考虑分时电价的虚拟发电厂调度策略[J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(4): 1-5.
FENG Qizhi, YU Jie, LI Yang, et al. Scheduling strategy of virtual power plant considering time-of-use power price[J]. Power Demand Side Management, 2014, 16(4): 1-5.
- [11] MOGHADDAM I G, NICK M, FALLAHI F, et al. Risk-averse profit-based optimal operation strategy of a combined wind farm-cascade hydro system in an electricity market[J]. Renewable Energy, 2013, 55: 252-259.
- [12] 邹云阳, 杨莉. 基于经典场景集的风光水虚拟电厂协同调度模型[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1855-1859.
ZOU Yunyang, YANG Li. Synergetic dispatch models of a Wind/PV/Hydro virtual power plant based on representative scenario set[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1855-1859.
- [13] 卢锦玲, 於慧敏. 考虑风电相依结构的虚拟发电厂内部资源随机调度策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 67-74.
LU Jinling, YU Huimin. Stochastic scheduling strategy of resources in virtual power plant considering wind power dependence structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 67-74.
- [14] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 92-102.
YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 92-102.
- [15] 马春艳, 董春发, 吕志鹏, 等. 计及随机因素的商业型虚拟发电厂短期交易与优化运行策略[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1543-1549.
MA Chunyan, DONG Chunfa, LÜ Zhipeng, et al. Short-term trading and optimal operation strategy for commercial virtual power plant considering uncertainties[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1543-1549.
- [16] 艾欣, 周树鹏, 赵阅群. 含虚拟发电厂的电力系统优化运行与竞价策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6351-6362.
AI Xin, ZHOU Shupeng, ZHAO Yuequn. Research on optimal operation and bidding strategy of power system with virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6351-6362.
- [17] 邱智勇, 陈贺, 高胜国, 等. 一种电动汽车充电站有序用电智能配电系统[J]. 新能源汽车供能技术, 2018, 2(1): 8-12.
QIU Zhiyong, CHEN He, GAO Shengguo, et al. An intelligent power distribution system for EV charging station[J]. Energy Supply Techniques of New Energy

- Vehicles, 2018, 2(1): 8-12.
- [18] KARKI R, HU P, BILLINTON R. Reliability evaluation considering wind and hydro power coordination[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 685-693.
- [19] 孟虹年, 谢开贵. 计及电池储能设备运行特性的风电场可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 214-219.
MENG Hongnian, XIE Kaigui. Wind farm reliability evaluation considering operation characteristics of battery energy storage devices[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 214-219.
- [20] 应飞祥, 张恩睦, 李琰, 等. 含风光互补的独立发电系统可靠性评估[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2019, 44(6): 71-81.
YING Feixiang, ZHANG Enmu, LI Yan, et al. A reliability assessment of independent power generation system with wind and solar complementation[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science, 2019, 44(6): 71-81.
- [21] 应飞祥, 何民, 姜燕波, 等. 光伏发电及其所处电力系统可靠性评估研究进展[J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2019, 28(5): 523-530.
YING Feixiang, HE Min, JIANG Yanbo, et al. Research progress on photovoltaic power generation and reliability assessment of its power system[J]. Journal of Yunnan Minzu University: Natural Sciences Edition, 2019, 28(5): 523-530.
- [22] 葛少云, 王浩鸣, 王源山, 等. 含分布式风光蓄的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 16-23.
GE Shaoyun, WANG Haoming, WANG Yuanshan, et al. Reliability evaluation of distribution system including distributed wind turbines, photovoltaic arrays and batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 16-23.
- [23] 靳现林, 赵迎春, 吴刚. 考虑分布式光伏和电动汽车接入的配电网空间负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 10-19.
JIN Xianlin, ZHAO Yingchun, WU Gang. Space load forecasting of distribution network considering distributed PV and electric vehicle access[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 10-19.
- [24] 胡殿刚, 刘毅然, 王坤宇, 等. 多商业型虚拟发电厂联合竞标及分配策略[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1550-1557.
HU Diangang, LIU Yiran, WANG Kunyu, et al. Joint bidding and distribution strategies for multiple commercial virtual power plants[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1550-1557.
- [25] 李整, 谭文, 秦金磊. 一种用于机组组合问题的改进双重粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 189-195, 26.
LI Zheng, TAN Wen, QIN Jinlei. An improved dual particle swarm optimization algorithm for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 189-195, 26.
- [26] 康健, 靳斌, 段秀娟, 等. 基于贝叶斯-粒子群算法的微电网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 32-41.
KANG Jian, JIN Bin, DUAN Xiujuan, et al. Optimal operation of microgrid based on Bayesian-PSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 32-41.
- [27] HARGREAVES J J, HOBBS B F. Commitment and dispatch with uncertain wind generation by dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 724-734.
- [28] 唐浩, 杨国华, 王鹏珍, 等. 基于改进粒子群算法的风光蓄互补发电系统容量优化[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 50-55.
TANG Hao, YANG Guohua, WANG Pengzhen, et al. Capacity optimization of hybrid wind-solar-battery power system based on improved particle swarm optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 50-55.
- [29] 陈鹏, 孟庆海, 赵彦锦. 基于蒙特卡洛法的电动汽车充电负荷计算[J]. 电气工程学报, 2016, 11(11): 40-46.
CHEN Peng, MENG Qinghai, ZHAO Yanjin. The electric vehicle charging load calculation based on the Monte Carlo method[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(11): 40-46.

收稿日期: 2019-12-08; 修回日期: 2020-05-13

作者简介:

应飞祥(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性评估及虚拟电厂日前调度策略; E-mail: feixiangy521@163.com

徐天奇(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统可靠性评估、系统规划、电动汽车充放电策略、能源互联网、虚拟电厂日前调度策略等; E-mail: xu.tianqi@gmail.com

李琰(1977—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统调度、智能电网及其通信系统等。E-mail: liyan.hust@gmail.com

(编辑 葛艳娜)