

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220651

# 工业园区微网调度研究与仿真

于飞, 葛思伟, 李梅航, 张倩, 刘喜梅

(青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 为提高新能源消纳能力和供电经济性、可靠性, 研究了含风光柴储、生活负荷、具有有限可控能力工业负荷的工业园区微电网, 提出了一种基于日前和日内相结合的优化调度方案。为保证日前优化调度的经济性, 提出了一种分段变异优化的改进粒子群算法求解调度模型。改进算法相较于传统粒子群算法收敛性速度更快, 同时提高了经济性, 减少了园区的运行成本。日内运行时, 为了校正日前预测偏差, 采用源网荷储共同参与调整, 保证尽可能跟随日前经济结果, 提高微网系统的可靠性。日内调整建立详细化的仿真模型, 采用实时仿真技术。利用实时仿真软件 RT-LAB 和实时仿真机 OP4510 构建的实时仿真平台, 解决模型仿真用时较长、求解困难的问题, 验证了工业园区微网调度策略的可行性。

**关键词:** 可控工业负荷; 园区微网调度; 粒子群算法; 实时仿真技术

## Research on and simulation of microgrid scheduling in an industrial park

YU Fei, GE Siwei, LI Meihang, ZHANG Qian, LIU Ximei

(College of Automation & Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** To promote new energy consumption capacity and economy and reliability of power supply, an industrial park microgrid with wind, solar, diesel, storage, living load and limited controllable industrial load is studied. An optimal scheduling scheme based on the combination of day-ahead and intraday is proposed. To ensure the economy of day-ahead scheduling, an improved particle swarm optimization algorithm with segmented mutation optimization is proposed to analyze the scheduling model. Compared to traditional particle swarm optimization, the improved algorithm has faster convergence speed, while improving economy and reducing the operating cost of the park. When running on the intraday, to correct the deviation in the day ahead prediction, the source, network, load and storage are jointly involved in the adjustment to ensure that the economic results, as much as possible, are followed and to improve the reliability of the microgrid system. Then, it establishes detailed simulation models within intraday using real-time simulation technology. A real-time simulation platform is constructed using real-time simulation software (RT-LAB) and machine (OP4510), to solve the problem of long simulation time and difficulty and verify the feasibility of the industrial park microgrid scheduling strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62103218).

**Key words:** controllable industrial load; park microgrid scheduling; PSO; real-time simulation

## 0 引言

在大力提倡节能减排、实现碳中和目标的背景下, 大量现代化工业园区为提高自身供电能力的经济性, 减少用电成本, 开始大规模建设园区型微电网<sup>[1-3]</sup>。微电网内新能源出力具有波动性, 因此园区

微网建设必须选取调度方案和求解算法<sup>[4]</sup>协调各微源出力, 提高微网内各微源的利用效率, 实现园区微网的经济优化调度<sup>[5]</sup>。

日前优化调度是确保系统经济运行的重要环节, 因此调度模型建立、求解算法等方面目前均在日益完善<sup>[6]</sup>。传统求解方法如梯度法、牛顿法等面临参数影响大、求解速度慢等问题。智能算法目前已经成为主流求解方式, 如遗传算法、差分进化算法以及各种群智能算法, 但均存在模型参数多、

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(62103218); 山东省自然科学基金项目资助(ZR2020MF081)

原理复杂等问题<sup>[7]</sup>。粒子群算法由于参数简单、收敛性较好，被学者们广泛研究并改进用于调度模型的求解中<sup>[8]</sup>。粒子变异能够直接跳出局部最优，是改变种群的直接方法<sup>[9-10]</sup>，可有效解决粒子群算法易陷入局部最优、早熟早收敛的问题。本文采用一种分段变异优化的方式改进粒子群算法，以高斯衰减方法改进惯性权重参数，同时采用柯西变异和高斯变异更新粒子位置，采用分段变异来增加粒子多样性，将改进后的粒子群算法应用于日前优化调度模型的求解。

日前优化调度以小时为时间尺度进行求解，各微源出力存在较大的预测偏差。日内运行时，可在更小的时间尺度下进行调整，以减小各微源出力偏差。日内调整调度采用实时仿真技术，仿真系统运行 240 s 以模拟现实时间的 24 h，进行园区微网系统的仿真运行。调整过程中，实时仿真时间 1 s 进行一次调整，校正运行点偏离。采用二次规划算法求解调整量，使实时运行尽可能跟随最优结果，保证微电网运行的经济性和可靠性。本文以 Matlab 仿真软件、商业化实时仿真软件 RT-LAB 和实时仿真机 OP4510 为平台，建立微网系统日内调整调度的实时化仿真模型，提高模型求解速度，减少仿真用时<sup>[11]</sup>，验证日内调整调度策略的可行性。

### 1 园区微网系统建模

本文采用并网型微网结构，包含一套光伏发电系统、一套风力发电系统、一套柴油发电机系统和一套小容量储能设备，通过交流母线并网，由电网提供电压和频率支撑，为恒定负荷 1(工业负荷)和波动负荷 2(生活负荷)供电，园区微网整体结构如图 1 所示。

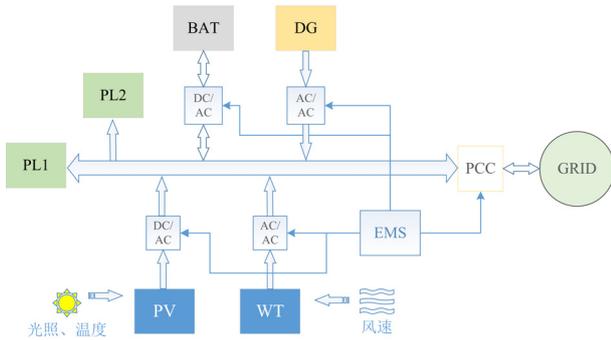


图 1 园区微网系统结构图

Fig. 1 Structure of the park microgrid system

图 1 中：PV、WT、BAT、DG 分别表示光伏发电系统、风力发电系统、储能系统、柴油发电机系统；GRID、PL1、PL2 分别表示大电网、恒定负荷

1 和波动负荷 2；EMS 表示能量调度系统，PCC 为并网点。此外，系统中还包括 DC/AC 逆变器，AC/AC 变流器等电能变换装置。

#### 1.1 不可控微源

园区微网系统中，风力和光伏受自然环境的影响制约，存在很大的不确定性<sup>[12-16]</sup>。受光照强度和温度因素影响，光伏发电的功率在运行期间变化明显。风速变化的波动性和间歇性较强，风力发电功率也不断改变，因此二者可视为不可控微源。

光伏发电主要受设备安装地的光照和温度影响，发电功率由式(1)计算得到<sup>[17]</sup>。风力发电主要受风速影响，在近似计算中，其输出功率与风速的关系可视为线性关系<sup>[18]</sup>。

$$P_{pv} = \alpha_{pv} P_{st} \left( \frac{S}{S_{st}} \right) [1 + K_p (T_{em} - T_{emst})] \quad (1)$$

式中： $P_{pv}$  为光伏发电功率； $\alpha_{pv}$  为光伏设备面板光照影响因数； $P_{st}$  为光伏发电系统的额定功率； $S$ 、 $T_{em}$  分别为实际光照强度和实际温度； $S_{st}$ 、 $T_{emst}$  分别为额定光照强度和额定温度； $K_p$  为光伏设备温度影响因数。

#### 1.2 可控微源

柴油发电机和储能系统是可控微源。储能系统采用蓄电池辅助削峰填谷，降低新能源发电波动性对电网的影响，是园区微网的重要组成部分<sup>[19]</sup>。储能系统除了充放电功率限制外，其荷电量  $S_{oc}$  也存在一定限制。假设一天起始时刻荷电量为 50% 的额定最大容量，则荷电量在运行中一般不低于 20% 的额定最大容量，不高于 90% 的额定最大容量，以提高储能设备的寿命。各个时刻的相对容量变化量如式(2)所示，荷电量如式(3)所示。

$$D_{Tsoc(i)} = D_{Tsoc(0)} + (-1) \sum_{m=1}^i P_{bat}(m) \quad (2)$$

$$S_{oc(i)} = S_{oc(0)} + D_{Tsoc(i)} \quad (3)$$

式中： $i$  对应一天内的 24 个时刻； $D_{Tsoc(i)}$  为相应时间荷电量的相对变化量； $P_{bat}(m)$  为对应时段内储能的功率，且功率为正时表示放电，功率为负时表示充电。

柴油发电机具有很高的灵活性和可控性，可以作为小容量储能的补充电源设备，柴油发电机工作时要求输出功率低于额定功率，以保护柴油发电机组设备的安全。

#### 1.3 电网与负荷模型

微网的一大优势是促进新能源就地消纳，采用“自发自用，余量上网”的工作模式与电网交换电

能, 富余和不足电量由电网抵消<sup>[20]</sup>。微网与电网采用实时电价交换功率, 作为大电网的需求响应, 是微网经济性调度必须考虑的重要因素, 交换功率为正时表示向电网售电, 反之为向电网购电。

某地区大电网对园区微网用户采用实时电价, 特点为: 夜间用电负荷较少, 采用谷时电价; 午高峰和晚高峰用电负荷较大, 采用峰时电价; 其他时间为平时电价; 平均各有 8 个时段。图 2 所示为工业园区微网与电网全天 24 h 购售电实时电价。

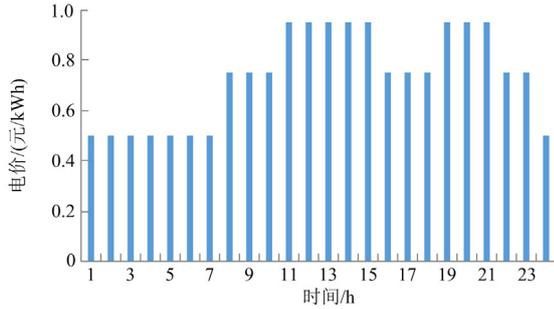


图 2 实时电价

Fig. 2 Real-time electricity price

园区内恒定负荷 400 kW, 为工业设备负荷。波动负荷主要包括园区内各种生活类负荷和安全保障用电等, 其预测对微网调度较为重要<sup>[21]</sup>, 图 3 为该园区典型日波动负荷变化情况, 以图中数据作为波动负荷预测数据。

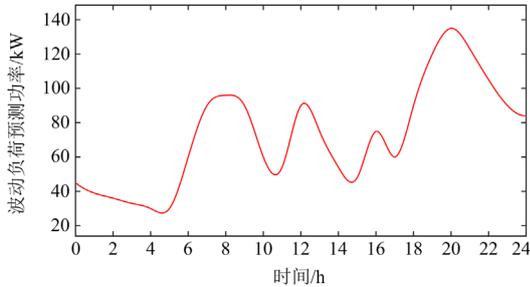


图 3 波动负荷预测

Fig. 3 Fluctuating load forecast

## 2 日前优化调度及其求解算法

日前优化调度以风光及负荷预测为基础, 根据目标函数和约束条件, 求解出可控微源及与电网的交换功率, 作为日内调整调度各机组的调整目标值。

### 2.1 目标函数及约束条件

优化调度以最小化综合运行成本为目标, 考虑不可控微源出力预测、负荷预测、柴油机、储能系统综合运行成本与电网交换功率时的实时电价等因素, 目标函数如式(4)所示。

$$\min F = \sum_{i=1}^{24} (-\lambda_g(i) \cdot P_g(i)) + \lambda_b \cdot P_b(i) + \lambda_d \cdot P_d(i) \quad (4)$$

式中:  $F$  为综合运行成本;  $\lambda_g$ 、 $\lambda_b$ 、 $\lambda_d$  分别为电网实时电价、储能综合运维成本系数、柴油机综合运维成本系数;  $P_g$ 、 $P_b$ 、 $P_d$  分别为电网交换功率、储能系统功率、柴油发电机系统功率。

日前优化调度要满足以下约束条件。

#### 1) 等式约束

园区微网中的等式约束即功率平衡约束, 如式(5)所示。

$$P_{pv} + P_{wt} + P_b + P_d = P_g + P_{L1} + P_{L2} \quad (5)$$

式中,  $P_{pv}$ 、 $P_{wt}$ 、 $P_{L1}$ 、 $P_{L2}$  分别为光伏发电系统、风力发电系统、恒定负荷 1、波动负荷 2 的功率。

#### 2) 不等式约束

各分布式微源的功率上下限约束, 包括园区微网与电网的交换功率约束, 柴油机出力的功率约束, 储能出力的功率约束等, 如式(6)所示, 储能容量上下限约束如式(7)所示。

$$P_{n\min} < P_n < P_{n\max} \quad (6)$$

$$S_{oc\min} < S_{oc} < S_{oc\max} \quad (7)$$

式中:  $P_n$  表示各分布式微源的功率;  $P_{n\max}$ 、 $P_{n\min}$  分别表示各分布式微源的功率上下限;  $S_{oc}$  为储能系统荷电量;  $S_{oc\max}$ 、 $S_{oc\min}$  分别为储能系统荷电量的上下限。

### 2.2 改进的分段变异粒子群算法

传统粒子群算法采用固定值或线性递减的惯性权重因子, 不利于平衡全局和个体寻优。本文采用高斯分布衰减优化惯性权重因子  $\omega$ ,  $\omega$  前期缓慢衰减, 中期迅速衰减, 后期又恢复缓慢衰减的趋势, 衰减趋势如图 4 所示。

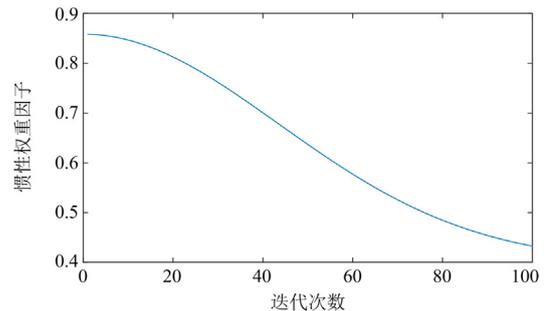


图 4 高斯分布衰减趋势

Fig. 4 Gaussian distribution attenuation trend

惯性权重因子  $\omega$  的趋势由式(8)表示。

$$\omega = \omega_{\text{end}} + (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}) \frac{1}{\theta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\theta^2}\left(\frac{t}{t_{\text{max}}}\right)^2} \quad (8)$$

式中： $\omega_{start}$ 、 $\omega_{end}$  分别为惯性权重因子的起始值和结束值； $\theta$  为离散程度，本文取 0.435； $t$  为迭代次数； $t_{max}$  为最大迭代次数。

为增加粒子多样性，本文提出一种基于柯西变异和高斯变异的分段变异，柯西变异搜索范围广，适合前期全局搜索阶段，应用在前 1/3 的迭代进程，高斯变异有较大的取值范围，适合后期局部搜索，提高收敛精度，应用在后 1/3 的迭代进程。其中柯西变异和高斯变异的粒子位置变异操作公式为

$$x' = x + C_{\text{auchy}}(p_b - x) \quad (9)$$

$$x' = x + G_{\text{aussian}}(p_b - x) \quad (10)$$

式中： $x$  表示粒子的位置； $x'$  表示更新后粒子的位置； $C_{\text{auchy}}$  表示服从柯西分布的随机数； $G_{\text{aussian}}$  表示服从高斯分布的随机数； $p_b$  为粒子个体极值。改进粒子群算法的求解流程如图 5 所示，具体步骤如下。

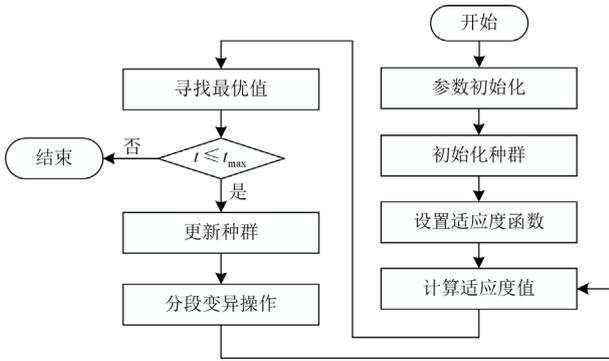


图 5 改进粒子群算法流程图

Fig. 5 Flow chart of the improved PSO

步骤 1：开始。

步骤 2：参数初始化，设置算法的种群规模、粒子维度、最大迭代次数等参数。

步骤 3：初始化种群，输入预测功率、负荷数据、运行约束等种群参数。

步骤 4：设置适应度函数，根据目标函数构造适应度函数。目标函数最小值即为求解算法中适应度值，迭代计算出每一代的适应度值。

步骤 5：计算适应度值，根据输入数据和适应度函数计算得到适应度函数的值。

步骤 6：寻找最优值，根据粒子适应度值与前一代比较得到局部最优值，再通过比较各个粒子的适应度值选择全局最优值。

步骤 7：当迭代次数不超过最大迭代次数时，继续循环，转至步骤 8；否则，当超过最大迭代次数时，跳出循环，结束，输出结果。

步骤 8：更新种群，按照粒子群算法的更新公

式，对粒子参数进行更新。

步骤 9：分段变异操作，按照改进策略，根据迭代进程选择变异方式，对粒子群进行变异操作。变异操作完成后，跳转至步骤 5 继续迭代计算，开始新一轮寻优过程。

### 2.3 算例求解与合理性分析

对于改进粒子群算法，粒子种群规模  $N = 100$ ；粒子维数  $D_{im} = 72$ ；最大迭代次数  $t_{max} = 100$ ；惯性权重系数起始值  $\omega_{start} = 0.9$ ，结束值  $\omega_{end} = 0.4$ 。

光伏发电系统额定功率为 500 kW，风力发电系统存在两台参数相同的风机设备，单台风机设备的额定功率为 300 kW，风力发电系统额定功率为 600 kW。储能和柴油发电机额定功率均为 100 kW，储能最大容量为 400 kWh。园区微网系统的日前优化调度模型运行参数如表 1 所示，日前优化调度以某典型春季日为对象，预测光伏(PV)、风机(WT)、恒定负荷(PL1)和波动负荷(PL2)预测功率如图 6 所示。

表 1 日前优化调度模型主要参数

Table 1 Main parameters of the day-ahead scheduling model

参数	最大值	最小值
$P_g/kW$	300	-300
$P_d/kW$	100	0
$P_b/kW$	100	-100
$P_{L1}/kW$	400	400
$P_{L2}/kW$	150	20
$S_{oc}/\%$	90	20

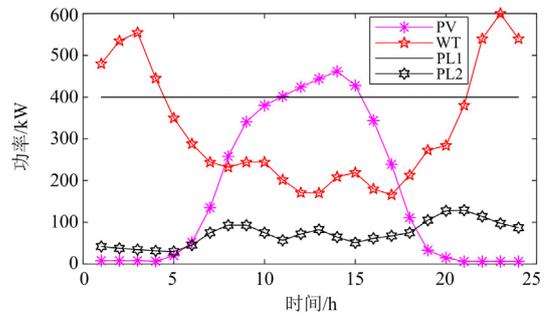


图 6 春季日日前预测功率

Fig. 6 Day-ahead forecast power in spring

图 7 为春季日传统粒子群算法和改进的粒子群算法迭代收敛情况对比图。其中，蓝线为传统粒子群算法收敛曲线，红线为改进粒子群算法收敛曲线。传统粒子群算法计算适应度最优值为 482 元，改进粒子群算法计算适应度最优值为 402 元，改进算法收敛精度较高，降低了园区微网的运行成本，经济性较好。

从图 7 中可以看出，传统粒子群算法迭代时的

起始最优值较高, 数量级在 6 次方级别, 在前期和后期的收敛速度上都较为均匀, 而且在 12 代左右时才接近全局收敛的最优值; 与之相比, 分段变异优化的粒子群算法在前期急速收敛, 中期通过交替变异再次跳出局部最优值, 在追求粒子多样性的结果下使得收敛速度较慢, 后期又快速向更优的全局最优值靠近, 在 10 代以内即接近收敛状态, 在收敛速度上表现更加优异。文献[22]基于引入收缩因子和动态权重改进方法在 40 代左右收敛, 文献[23]基于量子改进引入收缩扩张系数, 在 200 代左右收敛, 由文献[22-23]可知分段变异优化的粒子群算法收敛速度较快。通过收敛曲线和寻优结果可知, 改进的粒子群算法具有更强的收敛性, 应用于该园区微网系统的调度策略中, 取得了更优的效果。

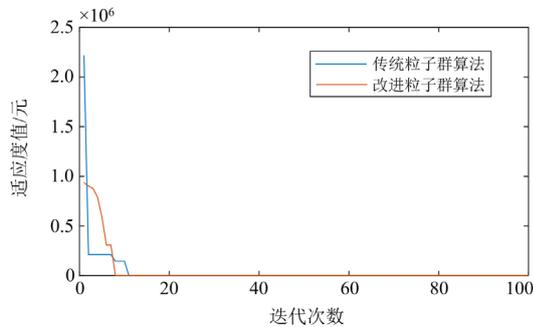


图 7 春季日不同算法收敛曲线对比图

Fig. 7 Algorithm convergence curve comparison in spring

图 8 是利用改进粒子群算法求解模型时的 24 h 出力分配结果, 其中 grid、bat、dg 分别表示电网、储能、柴油机各自出力变化曲线。

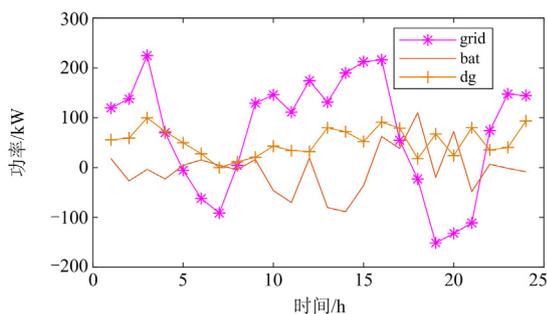


图 8 春季日出力分配结果图

Fig. 8 Output distribution result chart in spring

根据图 6 和图 8 分析可知: 在 0~5 h 时段内, 风机高发且负荷较小, 有能力向电网售电; 6~8 h 时段内, 负荷较夜间大, 而风机出力下降较快, 光伏不足以弥补缺口, 需要从电网大量购电; 在 9~16 h 时段内, 光伏和风机发电开始出现富余, 向电网售

电, 储能基本处于充电状态, 且在午间前后, 由于售电的经济性, 柴油发电机提高输出功率; 17~21 h 时段内负荷处于高峰期, 光伏发电量明显下降, 柴油发电机处于高发状态, 储能处于放电状态, 并同时向电网购电弥补功率不足; 21 h 后, 风机功率提高, 负荷减小, 园区微网有能力向电网售电。

考虑到冬季日光照、温度不足, 且光照时间减少造成光伏出力减少, 日前优化调度再以典型冬季日为对象, 进一步验证改进算法的性能。冬季日预测光伏(PV)、风机(WT)、恒定负荷(PL1)和波动负荷(PL2)预测功率如图 9 所示。

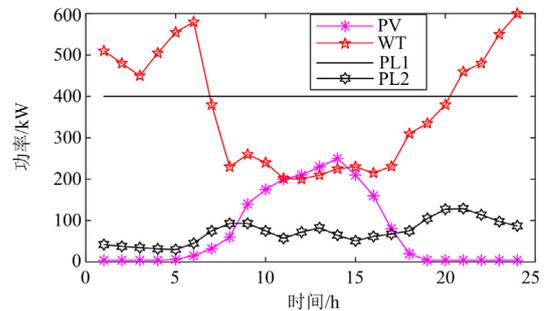


图 9 冬季日日前预测功率

Fig. 9 Day-ahead forecast power in winter

图 10 为冬季日传统粒子群算法和改进的粒子群算法迭代收敛情况对比图。其中, 蓝线为传统粒子群算法收敛曲线, 红线为改进粒子群算法收敛曲线。传统粒子群算法计算适应度最优值为 2166 元, 改进粒子群算法计算适应度最优值为 1763 元。

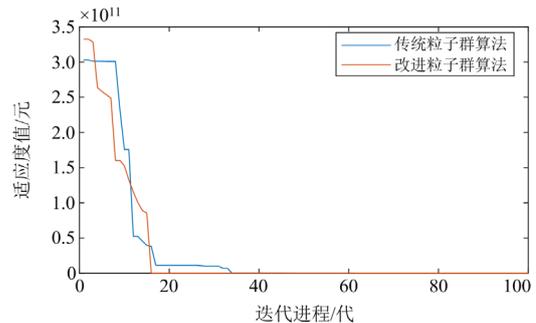


图 10 冬季日不同算法收敛曲线对比图

Fig. 10 Algorithm convergence curve comparison in winter

从图 10 中可以看出, 传统粒子群算法在迭代起始阶段最优值下降不明显, 前期、中期、后期收敛速度较为均匀, 在 32 代左右接近收敛值; 与之相比, 分段变异优化的粒子群算法, 快速接近收敛值, 在 16 代左右即接近收敛状态, 说明改进算法应用在冬季日时收敛速度性能优异。

图 11 是利用改进粒子群算法求解模型时的 24 h 出力分配结果。

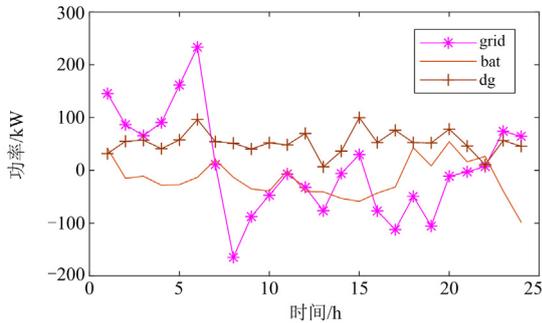


图 11 冬季日出力分配结果图

Fig. 11 Output distribution result chart in winter

根据图 9 和图 11 分析可知：在冬季日，0~6 h 时段，负荷较小，且风速较大，风机出力大，园区微网系统向电网售电，同时储能系统基本处于充电蓄能状态；在 7~8 h 时段，风力发电出力迅速减少，此时光伏出力增加较慢，从大电网购电，与电网交换功率冲击明显；在 9~13 h 时段，电价处于较高水平，由于风力发电系统在白天出力较少，且冬季日光伏也出力较少，仍需要向电网购电，但随着光伏发电系统输出功率增大，且柴油发电机也处于高发状态，购电量处于较低水平；14~15 h 时段光伏输出功率达到最高水平，此时出现短暂微网有能力向电网售电的时段，但售电量较少；在 16~20 h 时段，与 9~13 h 时段园区微网内各微源出力状态相近，其中在 18~20 h 时段处于晚高峰，负荷较大，且光伏出力逐渐趋于 0，储能系统处于放电状态，增加向负荷的供电量；在 21 h 后，晚间风机出力增大，且负荷逐渐开始下降，园区微网系统向电网售电。

### 3 日内调整调度实时仿真验证

日内调整调度策略是以日前优化调度计算结果作为调整目标值，以日内实时测量与日前预测的差值最小作为目标调整量，从而使日内运行状态尽可能跟随日前求解结果。各可控微源及可调工业负荷供需两侧均参与调整，实时更新调整量，修正日前预测偏差，保证日内运行更加安全可靠。本文不可控微源以负荷的日内运行数据和日前的典型日数据为基础，采用插值法模拟更小时间尺度的日内运行数据。日内调整调度以春季日日前求解结果输入为可控微源出力，进一步施加调整策略，验证了日内调整调度策略的可行性。

#### 3.1 可控工业负荷参与的日内调整策略

日内运行时，园区内工业装备用电装置 80 台，

每台功率 5 kW，该工业负荷在无调整状态下可视为 400 kW 的恒定负荷。工业设备用电具有一定灵活性，根据设备的启停安排可动态调节运行功率，但是它必须满足相关的约束条件，例如设备工作条件、生产需求以及用电合同等。工业负荷在一定情况下灵活可控，能够主动参与微网系统调控。因此，控制工业负荷运行功率逐渐成为智能电网缓解供需矛盾的重要手段<sup>[24]</sup>。根据某工业园区设备运行特点，本文采用热备用的 10 台工业设备作为可控负荷，参与日内调整调度，工业负荷的调节功率范围为 -50~50 kW。对工业设备启停机的智能排序本文不作深究，只考虑其用电模型。

设置日内调整调度目标函数如式(11)所示。

$$\min f = \Delta P_g^2 + 0.2\Delta P_d^2 + 0.8\Delta P_b^2 + 0.2\Delta P_L^2 \quad (11)$$

式中： $f$  为综合最小调整量； $\Delta P_g$ 、 $\Delta P_d$ 、 $\Delta P_b$ 、 $\Delta P_L$  分别为电网、柴油发电机、储能、工业负荷的功率调整量。

采用带权重因子的二次规划算法，实时求解调度模型，计算出各控制量的最优调整量。为保证工业负荷正常运转，且避免设备调整量过大影响设备正常运行，各调整量须设定阈值，日内功率调整量约束设置如表 2 所示。

表 2 日内调整调度模型主要参数

Table 2 Main parameters of the adjustment scheduling model

参数	最大值	最小值
$\Delta P_g/\text{kW}$	10	-10
$\Delta P_d/\text{kW}$	20	-20
$\Delta P_b/\text{kW}$	20	-20
$\Delta P_L/\text{kW}$	50	-50

#### 3.2 实时仿真平台

为了验证日内调整策略的可行性，建立了实时仿真模型，如图 12 所示。

为了解决模型复杂、仿真用时多的问题，采用 OPAL-RT 公司的实时仿真机 OP4510，以实时化软件 RT-LAB 与 Simulink 链接，将仿真模型装载到实时仿真机 CPU 中运行，实现实时仿真。该实时仿真平台能多核并行运算，加快模型求解速度，数据处理能力强，仿真运行时间与现实时间一致性较好<sup>[25]</sup>。

#### 3.3 实时仿真结果

日内实时运行时，在按分钟计算的较小时间尺度内，风、光、负荷等运行功率必然与日前预测存在一定的偏差。无日内调整时，各控制量按照日前结果投入运行，实时运行时偏差量将全部由电网交换功率承担，与日前经济结果偏差较大，甚至可能

发生越限行为。当不加入日内调整策略时, 园区微网与大电网交换功率仿真结果如图 13 所示。

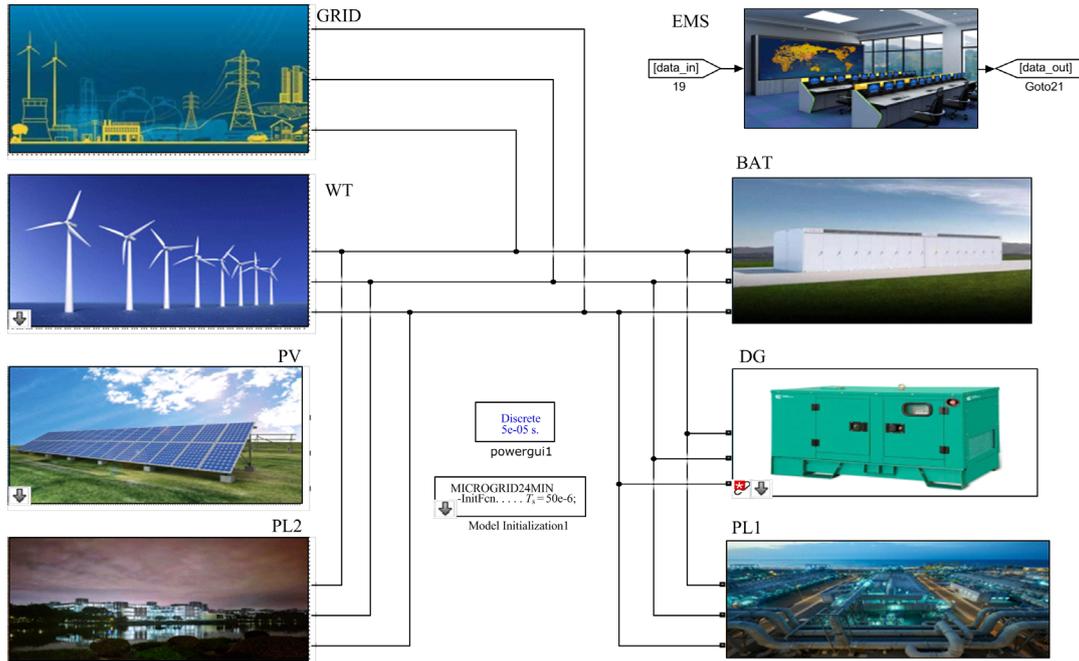


图 12 实时仿真模型

Fig. 12 Real-time simulation model

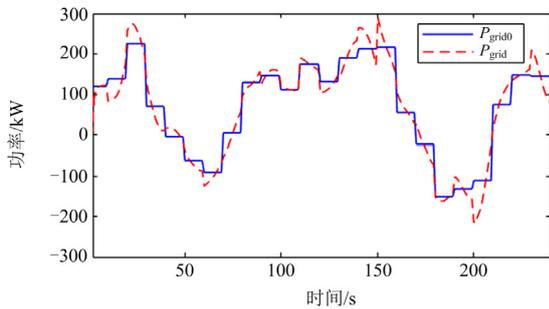


图 13 无调整时微网与大电网交换功率仿真结果

Fig. 13 Simulation results micro grid and power grid exchange power without adjustment

图 13 中,  $P_{grid0}$  与  $P_{grid}$  分别表示园区微网与大电网交换功率的日前计算结果与实时运行结果。从图 13 中可以看出, 实时运行结果与日前计算结果偏差较大, 实时运行功率甚至接近边界条件, 对电网来说难以预测, 会产生一定不利影响。

当加入日内调整策略时, 可控微源和可控工业负荷共同调整, 各控制量实时调整, 交换功率仿真结果如图 14 所示。

对比图 13 和图 14 可以得出: 有日内调整时, 由源网荷储共同参与调整, 大幅降低了与大电网交换功率在日内实时运行和日前预测时的偏差。在 20 h 时偏差最大, 由于风光以及负荷预测偏差均较

大, 在没有日内调整策略的情况下, 与电网侧交换功率在日内实时运行时与日前预测结果偏差高达约 100 kW, 加入日内调整后偏差仅约为 30 kW, 跟随日前预测效果明显, 极大地改善了电网运行环境, 使园区微网系统相对于电网的可预测性更高。

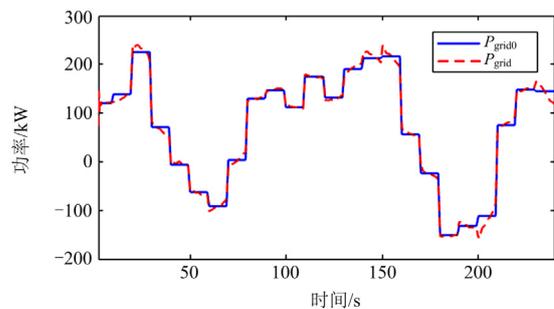


图 14 有调整时微网与大电网交换功率结果

Fig. 14 Simulation results micro grid and power grid exchange power with adjustment

各控制量的实时调整功率如图 15 所示。从图 15 可以看出, 各控制量处于安全限值范围内, 没有发生越限行为。图 16 为储能系统在日内调整调度过程中工作状态监测结果。从图 16 可以看出, 园区微网系统运行过程中储能系数的荷电量始终处于 20%~90%, 状态安全可靠。

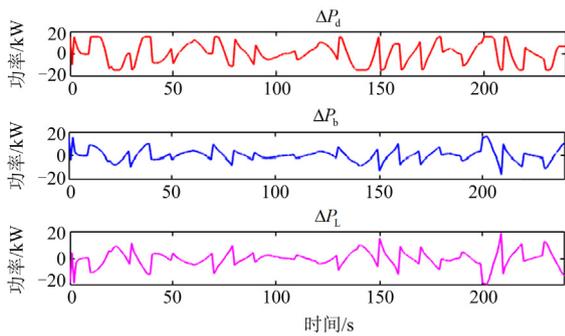


图 15 各控制量调整功率

Fig. 15 Adjustment power of control variables

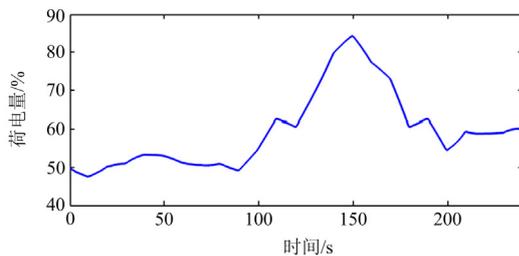


图 16 日内储能系统工作状态

Fig. 16 Working status of energy storage system within the day

### 4 结论

本文以工业园区微网为背景研究了园区微网调度，提出了一种日前优化和日内调整相结合的优化调度策略。在日前优化调度中，针对粒子群算法的固有缺陷，提出了一种基于分段变异优化的改进粒子群方法，采用柯西变异和高斯变异，提高了算法的收敛速度和精度。在日内调整中，建立最小化调整量为目标函数的调度模型，给各微源和可控负荷的调整量赋予权重，通过二次规划算法求解，使其尽可能跟随日前优化调度结果，保证工业园区微网系统供电的经济性和可靠性。

日内调整调度仿真时，充分利用实时仿真技术，在仿真软件 RT-LAB 和实时仿真机 OP4510 上完成模型解算，将仿真模型实时化，加快求解速度，为微网系统调度或相关实验的实时仿真、快速控制原型或硬件在环仿真提供借鉴。

### 参考文献

[1] 刘练. 园区微电网能量管理与工程应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.  
LIU Lian. Research on energy management and engineering application of park microgrid[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.

[2] 刘青, 赵洋, 李宁, 等. 基于分布式神经动力学算法的微电网多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021,

49(11): 105-114.

LIU Qing, ZHAO Yang, LI Ning, et al. Multiple objective optimization of a microgrid based on a distributed neural dynamics algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 105-114.

[3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.

[4] 张志文, 李华强. 考虑灵活性的孤岛微电网群分层能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 97-105.  
ZHANG Zhiwen, LI Huaqiang. A hierarchical energy management strategy for an island microgrid cluster considering flexibility[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 97-105.

[5] 黄鹏程, 王瑛. 风光储柴微电网系统运行控制策略分析[J]. 电力勘测设计, 2020(增刊 1): 242-248.  
HUANG Pengcheng, WANG Ying. Analysis of operational control strategy for wind-solar storage and diesel microgrid system[J]. Electric Power Survey & Design, 2020(S1): 242-248.

[6] MICHAEL S, SALMAN M, THIBAUT F, et al. Value streams in microgrids: a literature review[J]. Applied Energy, 2016, 162: 980-989.

[7] CAI Hui, CHEN Qiyu, GUAN Zhijian, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 93-107.

[8] 张春韵, 邹德旋, 沈鑫. 改进的粒子群算法在电力经济调度中的应用[J]. 制造业自动化, 2021, 43(1): 53-57.  
ZHANG Chunyun, ZOU Dexuan, SHEN Xin. Application of improved particle swarm optimization algorithm in power economic dispatching[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(1): 53-57.

[9] 刘欢, 刘志刚. 基于改进粒子群算法的牵引变电所维修优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 87-94.  
LIU Huan, LIU Zhigang. An improved particle swarm algorithm study on optimization model of maintenance schedules for railway traction substations[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 87-94.

[10] YAN C M, LU G Y, LIU Y T, et al. A modified PSO algorithm with exponential decay weight[C] // 2017 IEEE 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), July 29-31, 2017, Guilin, China: 239-242.

[11] 李元浩, 马玉鑫, 杜志超. 基于 RT-LAB 的风电并网系统低电压穿越仿真研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(6): 71-77.

- LI Yuanhao, MA Yuxin, DU Zhichao. Simulation research of LVRT in wind power grid-connected system based on RT-LAB[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2017(6): 71-77.
- [12] AREKKARA S, KUMAR R, BANSAL R C. An intelligent multi agent based approach for autonomous energy management in a microgrid[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2021, 49(1-2).
- [13] 王中, 黎丽丽, 李振华, 等. 考虑新能源渗透的电网频率概率分布研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(20): 65-73.
- WANG Zhong, LI Lili, LI Zhenhua, et al. The evolution characteristics of power grid frequency probability distribution[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(20): 65-73.
- [14] ZHANG X, CHEN Y L, WANG Y X, et al. Reactive voltage partitioning method for the power grid with comprehensive consideration of wind power fluctuation and uncertainty[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 124514-124525.
- [15] 陈思源, 景巍巍, 史明明, 等. 新能源接入背景下的谐波源建模方法综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 162-175.
- CHEN Siyuan, JING Weiwei, SHI Mingming, et al. Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 162-175.
- [16] DONG W C, LI S H, ZHANG H, et al. Sensitivity-based reliability coordination for power systems considering wind power reserve based on hybrid correlation control method for wind power forecast error[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 30(5): 81-89.
- [17] 肖斐, 艾芊. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度需求响应资源优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(5): 184-190.
- XIAO Fei, AI Qian. Multiple time-scale optimal dispatch of demand response resource for microgrid based on model predictive control[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(5): 184-190.
- [18] 王福忠, 陶新坤, 田广强. 基于改进果蝇算法优化的微电网逆变器恒功率控制算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(21): 71-79.
- WANG Fuzhong, TAO Xinkun, TIAN Guangqiang. Constant power control algorithm for a microgrid inverter based on an improved fruit fly algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(21): 71-79.
- [19] 丁小洁. 用于储能电站的蓄电池充放电控制系统[D]. 西安: 陕西科技大学, 2015.
- DING Xiaojie. Battery charging and discharging control system for energy storage power station[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2015.
- [20] 孙惠娟, 张乐乐, 彭春华. 基于差异化需求响应模型预测控制的微网时域滚动优化调度[J]. *电网技术*, 2021, 45(8): 3096-3105.
- SUN Huijuan, ZHANG Lele, PENG Chunhua. Time-domain rolling optimal scheduling of microgrid based on differential demand response model predictive control[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(8): 3096-3105.
- [21] 陈文彬, 徐大勇, 郭瑞鹏. 负荷预测对新能源电网多目标优化调度的影响规律研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 46-51.
- CHEN Wenbin, XU Dayong, GUO Ruipeng. A study on the influence rule of load forecasting on multi-objective optimal dispatching of a new-energy grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 46-51.
- [22] 刘富强, 高强. 基于改进粒子群算法电网的优化调度研究[J]. *电力学报*, 2022, 37(2): 154-164.
- LIU Fuqiang, GAO Qiang. Research on optimal dispatch of power grid based on improved particle swarm algorithm[J]. *Journal of Electric Power*, 2022, 37(2): 154-164.
- [23] 王翔, 胡明, 闫岩, 等. 基于改进量子粒子群算法的综合能源系统优化配置[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(10): 19-24.
- WANG Xiang, HU Ming, YAN Yan, et al. Optimal configuration of integrated energy system based on improved quantum particle swarm optimization[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(10): 19-24.
- [24] 刘夏清, 向卫东, 周弘明. 供电企业电力营销管理总体策略研究[J]. *电力需求侧管理*, 2002, 4(5): 33-35.
- LIU Xiaqing, XIANG Weidong, ZHOU Hongming. Study of the marketing management overall tactics of electric power supply enterprise[J]. *Power Demand Side Management*, 2002, 4(5): 33-35.
- [25] 刘安成. 基于 RT-LAB 的光伏并网发电系统半实物仿真研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
- LIU Ancheng. Research on hardware-in-the-loop simulation of photovoltaic grid-connected power generation system based on RT-LAB[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2021.

收稿日期: 2022-09-05; 修回日期: 2023-08-07

作者简介:

于飞(1961—), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为高压直流输电、微电网; E-mail: yyffqd@163.com

葛思伟(1996—), 男, 硕士, 研究方向为微电网; E-mail: 1951435426@qq.com

刘喜梅(1961—), 女, 通信作者, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力电子、智能控制。E-mail: liuximeiqd@163.com

(编辑 周金梅)