

doi: 10.7690/bgzdh.2025.11.013

# 计及需求响应的新能源并网系统优化调度算法

万莉<sup>1</sup>, 潘天红<sup>2</sup>

(1. 商丘工学院信息与电子工程学院, 河南 商丘 476000; 2. 安徽大学电气工程与自动化学院, 合肥 230000)

**摘要:** 为提高新能源的利用率、降低运营成本, 实现可靠的并网运行, 提出需求响应的新能源并网系统优化调度算法。基于电、气、热负荷建立系统用户需求响应模型, 以运行商经济效益最大化为目标, 建立基于价格的新能源并网系统能源分散调度模型, 并确定相应的约束条件。通过改进粒子群算法求解基于价格的新能源并网系统能源分散调度模型, 实现新能源并网系统的优化调度。实验结果表明, 该算法调度效果更好、稳定性更强、更适用于实际应用。

**关键词:** 优化调度模型; 用户需求响应; 多目标算法; 新能源并网系统

**中图分类号:** TM732 **文献标志码:** A

## Optimization Scheduling Algorithm for New Energy Grid Connected Systems Considering Demand Response

Wan Li<sup>1</sup>, Pan Tianhong<sup>2</sup>

(1. School of Information and Electronics Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230000, China)

**Abstract:** To enhance the utilization rate of new energy, reduce operational costs, and achieve reliable grid-connected operation, an optimized dispatch algorithm for new energy grid-connected systems considering demand response is proposed. Based on the electric, gas, and thermal loads, a system user demand response model is established. Aiming at maximizing the economic benefits of the operator, a price-based decentralized energy dispatch model for new energy grid-connected systems is established, and the corresponding constraints are determined. By improving the particle swarm optimization algorithm, the price-based decentralized energy dispatch model for new energy grid-connected systems is solved, achieving optimized dispatch of the new energy grid-connected system. Experimental results show that the algorithm has better dispatch performance, stronger stability, and is more suitable for practical applications.

**Keywords:** optimize the scheduling model; user demand response; multi objective algorithm; new energy grid connection system

## 0 引言

随着全球对清洁能源的需求不断增加, 新能源并网系统作为一种有效的清洁能源接入和消纳方式受到广泛关注。然而, 新能源的随机性、波动性以及与传统能源系统的复杂交互导致了优化调度问题的挑战; 因此, 新能源并网系统优化调度算法的研究成为迫切需求, 旨在通过合理的调度策略和算法设计来提高新能源的利用率, 降低运营成本, 并实现可靠的并网运行, 促进可持续能源发展和应对能源安全与环境挑战<sup>[1-2]</sup>。

李咸善等<sup>[3]</sup>以综合新能源系统收益最大化为目标, 建立需求响应模型, 建立双层博弈调度模型, 通过粒子群算法完成模型求解, 实现电力系统综合能源分散调度, 该算法存在系统完成调度时间长的

问题。王子驰等<sup>[4]</sup>建立用户需求响应模型, 基于模型预测控制方法建立综合新能源系统优化调度模型, 通过非支配排序遗传算法完成优化调度模型的求解, 该算法存在实际应用效果不佳的问题。张海静等<sup>[5]</sup>建立双层优化调度模型, 通过线性方法和卡罗需-库恩-塔克条件完成模型求解, 实现资源的优化调度, 该算法存在系统调度效果不佳的问题。

为了解决上述方法中存在的问题, 笔者提出需求响应的新能源并网系统优化调度算法。

## 1 用户需求响应模型构建

笔者建立基于电、气、热负荷的新能源并网系统用户需求响应模型<sup>[6-7]</sup>。在设计含有新能源并网的综合系统用户需求响应模型时, 不仅需要考虑电负荷, 而且需要考虑气、热等多种形式的负荷曲线<sup>[8]</sup>。

收稿日期: 2024-10-06; 修回日期: 2024-11-12

基金项目: 国际自然科学基金(51477070); 河南省高校人文社会科学研究(2023-ZDJH-189)

第一作者: 万莉(1989—), 女, 河南人, 硕士。

### 1.1 电负荷

通过价格型响应机制实现用户电负荷需求响应建模, 根据实际情况, 分别设置峰谷时电价, 以引导用户用电行为, 提高综合新能源系统调度运行的稳定性。

用  $\Delta v_p$  表示负荷响应量, 得到各时间段电量电价弹性指标:

$$q = \frac{\Delta Z}{Z} (\Delta v_p / v_p). \quad (1)$$

式中:  $Z$  为峰谷电价;  $v_p$  为负荷响应前用户用电量;  $\Delta Z$  为固定电价与峰谷电价的差值。

进一步得到实现价格型响应建模的电量电价弹性矩阵  $Q_r$ :

$$Q_r = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1n} \\ Q_{21} & Q_{22} & \cdots & Q_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \cdots & Q_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

用  $o$  表示时段, 则弹性矩阵的自弹性系数为:

$$Q_{oo} = \frac{\Delta Z_o}{Z_o} \times q(v_{po} / \Delta v_{po}). \quad (3)$$

式中  $\Delta Z_o$ 、 $\Delta v_{po}$  分别为  $o$  时段电价变化量和用户用电变化量。

电量电价弹性矩阵的互弹性系数  $Q_{ok}$  为:

$$Q_{ok} = \frac{\Delta Z_o}{Z_o} \times q(v_{pk} / \Delta v_{pk}). \quad (4)$$

式中:  $\Delta v_{pk}$  为  $k$  时段用户用电变化量;  $v_{pk}$  为  $k$  时段用户用电量。

基于分时电价的用户电负荷响应为:

$$\Delta Z_{r,t} = \begin{pmatrix} Z_{r,0,g} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{r,0,a} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{r,0,h} \end{pmatrix} \cdot Q_r Q_{oo} Q_{ok} \cdot \begin{pmatrix} \Delta v_{r,a,g} / v_{r,a_0,g} \\ \Delta v_{r,a,a} / v_{r,a_0,a} \\ \Delta v_{r,a,h} / v_{r,a_0,h} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

式中:  $v_{r,a_0,g}$ 、 $v_{r,a_0,a}$ 、 $v_{r,a_0,h}$  为传统峰、平、谷 3 个时段的固定电价;  $Z_{r,0,g}$ 、 $Z_{r,0,a}$ 、 $Z_{r,0,h}$  为分时电价前峰、平、谷 3 个时段的用电量;  $\Delta v_{r,a,g}$ 、 $\Delta v_{r,a,a}$ 、 $\Delta v_{r,a,h}$  为传统固定电价与 3 时段电价的差值。

### 1.2 气负荷

同样选择价格型响应机制实现用户的天然气负荷需求响应建模。同理, 得到基于分时电价的用户天然气负荷响应, 即分时天然气价格实施后用户天然气使用转移量  $\Delta Z_{h,t}$ :

$$\Delta Z_{h,t} = \begin{pmatrix} Z_{h,0,g} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{h,0,a} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{h,0,h} \end{pmatrix} \cdot Q_h Q_{oo} Q_{ok} \cdot \begin{pmatrix} \Delta v_{h,a,g} / v_{h,a_0,g} \\ \Delta v_{h,a,a} / v_{h,a_0,a} \\ \Delta v_{h,a,h} / v_{h,a_0,h} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

式中:  $v_{h,a_0,g}$ 、 $v_{h,a_0,a}$ 、 $v_{h,a_0,h}$  分别为传统固定天然气价格;  $Z_{h,0,g}$ 、 $Z_{h,0,a}$ 、 $Z_{h,0,h}$  分别为开展分时天然气价前峰、平、谷 3 个时段的天然气使用量;  $\Delta v_{h,a,g}$ 、 $\Delta v_{h,a,a}$ 、 $\Delta v_{h,a,h}$  为传统固定天然气价与峰、平、谷 3 个时段天然气价的差值。

### 1.3 热负荷

用  $\beta$ 、 $\chi$ 、 $\eta$ 、 $\vartheta$ 、 $\varphi$ 、 $\xi$  表示热惯性物理参数, 则综合新能源系统的供热温度动态特征公式为:

$$\left. \begin{aligned} Y_{j,t} &= \sum_{k=0}^K \beta_k Y_{j,t-k} + \sum_{k=0}^K \chi_k Y_{h,t-k} + \sum_{k=0}^K \eta_k Y_{out,t-k} \\ Y_{in,t} &= \sum_{k=0}^K \vartheta_k Y_{j,t-k} + \sum_{k=0}^K \varphi_k Y_{h,t-k} + \sum_{k=0}^K \xi_k Y_{out,t-k} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

式中:  $t-k$ 、 $t$  为时段;  $Y_{out,t-k}$ 、 $Y_{in,t}$  分别为  $t-k$  时段和  $t$  时段的室外、室内温度;  $Y_{j,t}$  为热网回水温度;  $Y_{h,t-k}$  为供水温度。

用  $T$  表示等效热阻, 空间室内温度变化公式为:

$$Y_{in,t+1} = Y_{in,t} e^{-\Delta t / \nu} + (TW_t + Y_{out,t})(1 - e^{-\Delta t / \nu}). \quad (8)$$

式中:  $Y_{out,t}$  为  $t$  时段的室外温度;  $W_t$  为热功率;  $\nu$  为空气热容与等效热阻乘积。

用  $Y_{min}$  表示室内最低舒适温度, 室内温度约束公式如下:

$$Y_{min} \leq Y_{in,t} \leq Y_{max}. \quad (9)$$

式中  $Y_{max}$  为室内最高舒适温度。

## 2 优化调度模型

根据用户需求响应模型, 以运行商经济效益最大化为目标, 建立基于价格的新能源并网系统能源分散调度模型<sup>[9]</sup>。

### 2.1 目标函数

系统供应商的运营成本包含能源购买成本、支持能源转化设备运行成本、火电机组成本、储能装置运行成本和市场激励成本<sup>[10-11]</sup>。

用  $A_{o,t}^X$ 、 $H_{o,t}^X$ 、 $J_{o,t}^X$  表示购买的电力、天然气、热功率数量, 综合电、气、热 3 种综合能源成本, 获取新能源并网系统的目标函数公式如下:

$$\begin{aligned} \min V_{\text{sum}} = & \sum_{t \in Y} \sum_{o \in O} \Delta Z_{r,t} \Delta Z_{h,t} \left[ Y_{j,t} (z_{o,t}^r \cdot A_{o,t}^X + z_{o,t}^h \cdot \right. \\ & H_{o,t}^X + z_{o,t}^j \cdot J_{o,t}^X) + Y_{\text{in},t} (\nu_{o,t}^{\text{ES}} \cdot A_{o,t}^{\text{ES}} + \nu_{o,t}^{\text{GS}} \cdot A_{o,t}^{\text{GS}} + \\ & \nu_{o,t}^{\text{HS}} \cdot A_{o,t}^{\text{HS}}) + Y_{\text{in},t+1} (\phi_{o,t}^{\text{GT}} \cdot A_{o,t}^{\text{GT}} + \phi_{o,t}^{\text{P2G}} \cdot A_{o,t}^{\text{P2G}} + \phi_{o,t}^{\text{GB}} \cdot \\ & A_{o,t}^{\text{GB}}) + (s^l \cdot (A_{o,t}^l)^2 + n^l \cdot A_{o,t}^l + \nu^l + V_{o,t}^j) \end{aligned} \quad (10)$$

式中： $z_{o,t}^r$ 、 $z_{o,t}^h$ 、 $z_{o,t}^j$  分别为采购电能、天然气、和热量的单位功率价格； $A_{o,t}^{\text{ES}}$ 、 $A_{o,t}^{\text{GS}}$ 、 $A_{o,t}^{\text{HS}}$  分别为 3 种储能装置的输出功率； $\phi_{o,t}^{\text{GT}}$ 、 $\phi_{o,t}^{\text{P2G}}$ 、 $\phi_{o,t}^{\text{GB}}$  分别为燃气轮机、P2G 设备、燃气锅炉的运行成本； $A_{o,t}^{\text{GT}}$ 、 $A_{o,t}^{\text{P2G}}$ 、 $A_{o,t}^{\text{GB}}$  分别为电功率、热功率和气功率； $\nu_{o,t}^{\text{ES}}$ 、 $\nu_{o,t}^{\text{GS}}$ 、 $\nu_{o,t}^{\text{HS}}$  分别为储电站、储热装置和储气装置的运行成本； $s^l$ 、 $n^l$ 、 $\nu^l$  为发电机组成本系数； $A_{o,t}^l$  为火电机组的输出功率； $O$  为系统节点； $V_{o,t}^j$  为基于激励的热负荷响应成本。

用  $\Delta A_{s,o,t}$  表示用户实际热量削减量，进一步推导出热负荷响应成本公式如下：

$$\begin{aligned} V_{o,t}^j = & T_{o,t} - G_{o,t} + \Delta A_{s,o,t} \cdot j_{o,t} \cdot y_{o,m} + \\ \min V_{\text{sum}} (1 - \beta) \cdot & (A_{p,o,t} - \Delta A_{s,o,t}) j_{o,t} \cdot y_{o,m} \end{aligned} \quad (11)$$

式中： $G_{o,t}$  为未达到响应要求的用户惩罚项； $y_{o,m}$  为响应时间； $T_{o,t}$  为用户响应收益； $A_{p,o,t}$  为响应前热负荷； $j_{o,t}$  为单位热量价格。

### 2.2 约束条件

针对上述建立的目标函数，确定相应的约束条件。用  $W_{o,t}^H$  表示实行电价激励后的电力负荷需求，电负荷的约束条件公式如下：

$$\begin{aligned} \sum_{o \in O} (A_{o,t}^X + A_{o,t}^{\text{GT}} + A_{o,t}^l + A_{o,t}^{\text{ES}}) = \\ \sum_{o \in O} V_{o,t}^j (W_{o,t}^H + A_{o,t}^{\text{P2G}}), \quad 0 \leq A_{o,t}^l \leq A_{o,t}^l_{\text{max}} \end{aligned} \quad (12)$$

式中： $A_{o,t}^l_{\text{max}}$  为发电机组的最大输出功率； $W_{o,t}^{H,*}$  为实行价格激励后的天然气负荷需求。天然气负荷的约束条件公式如下：

$$\begin{aligned} \sum_{o \in O} (A_{o,t}^{\text{P2G}} + A_{o,t}^{\text{GS}} + A_{o,t}^X) = \\ \sum_{o \in O} A_{o,t}^l (W_{o,t}^{H,*} + H_{o,t}^{\text{GB}} + H_{o,t}^{\text{GT}}) \end{aligned} \quad (13)$$

热负荷约束条件公式如下：

$$\sum_{o \in O} (J_{o,t}^X + A_{o,t}^{\text{GB}} + A_{o,t}^{\text{HS}}) = \sum_{o \in O} W_{o,t}^{J,*} W_{o,t}^{H,*} \quad (14)$$

式中  $W_{o,t}^{J,*}$  为实行价格激励后的热负荷需求。

新能源并网系统在能量传递过程中，存在线路设定的不允许流量超过流量上限<sup>[12]</sup>，由此得到流量约束公式如下：

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq A_o^l \leq A_{o,\text{max}}^l \\ 0 \leq H_o^l \leq H_{o,\text{max}}^l \\ 0 \leq J_o^l \leq J_{o,\text{max}}^l \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中  $A_o^l$ 、 $H_o^l$ 、 $J_o^l$  分别为电路、天然气管道、热力传输线的电功率、天然气和热功率值。

基于此，完成新能源并网系统优化调度模型的建立。

### 3 模型求解

通过改进粒子群算法求取新能源并网系统优化调度模型的最优解<sup>[13-14]</sup>。将种群亲和度概率引入到粒子群算法中，优化算法参数寻优性能。亲和度概率用于群体优越性的增强处理，以改善求解过程中陷入局部寻优问题，提高算法寻优效果<sup>[15]</sup>。

粒子个体的相似性可通过欧几里得距离  $f$  公式求取，其公式如下：

$$f = \sqrt{\sum_{o \neq k} A_o^l H_o^l J_o^l (C_o - C_k)^2} \quad (16)$$

式中  $C_o$ 、 $C_k$  为粒子。

当欧几里得距离为 0 时，表明 2 个粒子完全相同。

粒子亲和度  $W_o$  为：

$$W_o = M_o^v / Mf \quad (17)$$

式中： $v$  为近似系数； $M$  为粒子群粒子总数； $M_o^v$  为粒子群中与粒子  $o$  的相似性小于  $v$  的粒子数目。

将完成粒子亲和度计算的粒子存入最优种群中，开始迭代，通过交叉、变异更新粒子种群。

粒子的交叉系数  $P_j^o$  为：

$$P_j^o = \begin{cases} \frac{l_1(1-W_o)}{1-W_{\text{avg}}}, & W_o \leq W_{\text{avg}} \\ l_2, & W_o > W_{\text{avg}} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $W_{\text{avg}}$  为种群平均亲和度； $l_1$ 、 $l_2$  为常数。

粒子的变异系数  $P_b^o$  为：

$$P_b^o = \begin{cases} \frac{l_3(1-W_o)}{1-W_{\text{avg}}}, & W_o \leq W_{\text{avg}} \\ l_4, & W_o > W_{\text{avg}} \end{cases} \quad (19)$$

式中  $l_3$ 、 $l_4$  为常数。

淘汰超过最优种群所能容纳的数量后种群内亲

和度低的粒子个体。通过改进粒子群算法完成新能源并网系统优化调度模型求解步骤如图 1 所示。

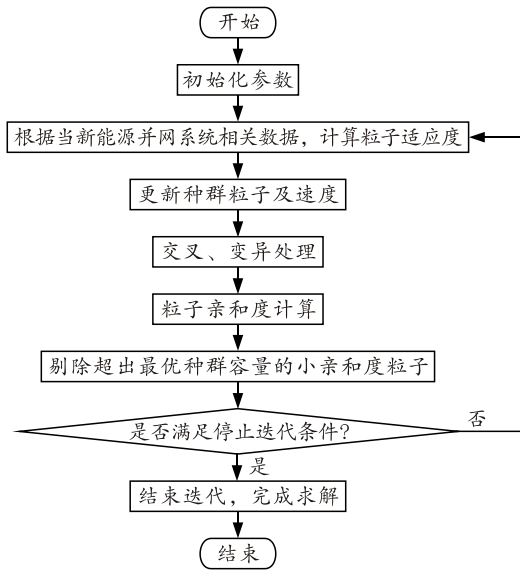


图 1 求解步骤

求解步骤如下：

- 1) 初始化粒子群算法各参数。
- 2) 将初始粒子个体植入最优种群  $J$  中。获取当前新能源并网系统的相关数据, 并计算粒子适应度。
- 3) 更新种群粒子及速度。
- 4) 继续对种群内粒子展开交叉、变异操作, 当交叉、变异后粒子的最优适应度值高于原始粒子适应度值, 则将交叉、变异后的粒子存入最优种群  $J$  中; 否则, 舍弃交叉、变异后的粒子。
- 5) 通过粒子相似性衡量式(16)和粒子亲和度式(17)计算最优种群  $J$  中粒子个体情况, 按照亲和度由大到小的循序, 将超出最优种群  $J$  容量的小亲和度粒子剔除。
- 6) 不断实行粒子个体及种群的最优值的更新迭代处理, 直至达到最大迭代次数, 获取新能源并网系统优化调度模型的最优解。

#### 4 实验与分析

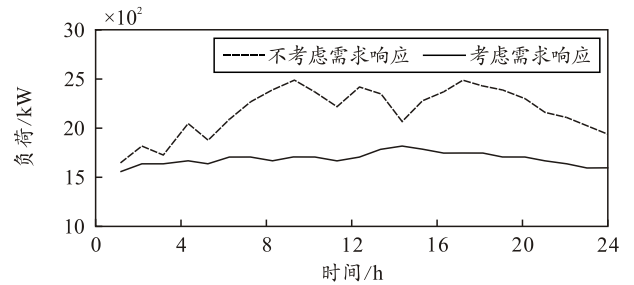
为了验证计及需求响应的新能源并网系统优化调度算法的有效性, 在 Matlab 软件上完成实验测试。表 1 为实验环境参数。

表 1 实验环境参数

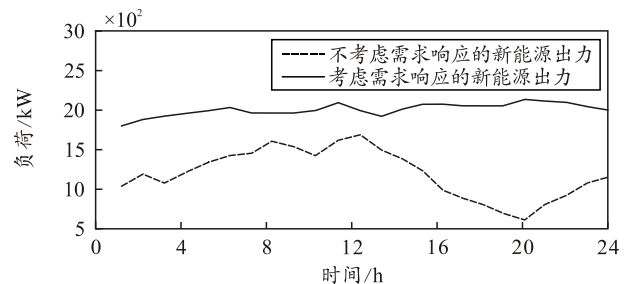
参数	数值
发电机组容量/MW	300
启动时间/min	10
停机时间/min	20
负荷预测误差/%	±5
发电机组类型	风电、光伏、水电等
线路最大传输功率限制/MW	50

在上述环境下, 采用笔者所提算法、基于主动配电网与综合新能源系统联盟的双层博弈调度模型的新能源并网系统优化调度算法(文献[3]算法)和基于模型预测控制的新能源并网系统优化调度算法(文献[4]算法)完成实验测试。

1) 需求响应。在未考虑需求响应和考虑需求响应 2 种情况下, 采用所提算法完成新能源并网系统优化调度, 记录需求响应前后新能源并网系统负荷和新能源消纳率对比如图 2 所示。



(a) 需求响应前后系统负荷对比



(b) 需求响应前后新能源消纳率对比

图 2 考虑需求响应前后对比

分析图 2 可知：考虑需求响应后的新能源并网系统负荷曲线明显较不考虑需求响应时的负荷曲线更趋于平稳, 考虑需求响应新能源并网系统的新能源出力值大于未考虑需求响应新能源并网系统的新能源出力值, 且考虑需求响应后的新能源出力曲线峰谷比有所下降, 表明完成新能源并网系统优化调度时考虑用户需求响应的有效性。

2) 负荷曲线。采用本文中所提算法、文献[3]和[4]算法完成新能源并网系统优化调度, 记录 3 种算法的负荷曲线如图 3 所示。

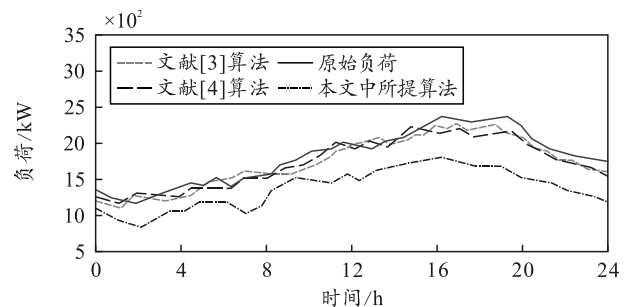


图 3 3 种算法的负荷

分析图 3 可知：原始调度负荷曲线 1 150~2 480 kW，采用本文中所提算法完成新能源并网系统优化调度的负荷 820~1 760 kW，文献[3]算法完成新能源并网系统优化调度的负荷 1 090~2 100 kW，文献[4]算法完成新能源并网系统优化调度的负荷 1 210~2 220 kW，本文中所提算法负荷低于原始调度负荷曲线，低于文献[3]和[4]算法，表明本文中所提算法的新能源并网系统优化调度效果更好。

3) 求解对比。采用本文中所提算法、文献[3]和[4]算法完成新能源并网系统优化调度，记录 3 种算法的迭代曲线如图 4 所示。

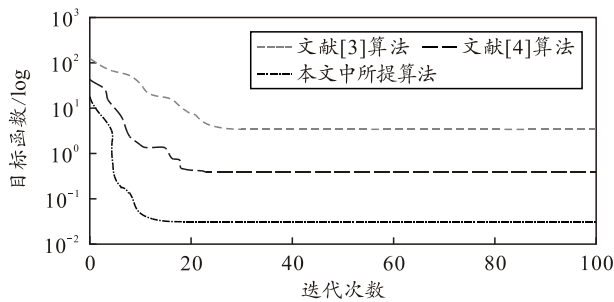


图 4 3 种算法迭代

分析图 4 可知：文献[3]算法在 25 次左右迭代后获取新能源并网系统优化调度的最优解，文献[4]算法在 20 次左右迭代后获取新能源并网系统优化调度的最优解，本文中所提算法在 11 次左右迭代后获取新能源并网系统优化调度的最优解。本文中所提算法的调度时间明显低于文献[3]和[4]算法，表明本文中所提算法求取新能源并网系统优化调度最优解的时间更短，调度效率更高。

## 5 结束语

笔者提出需求响应的新能源并网系统优化调度算法，解决了传统方法中存在的问题，具有较为重要的现实应用意义。由实验结果可知：本文中所提算法通过建立需求响应模型，提高了新能源并网系统调度运行的稳定性；通过建立基于价格的新能源并网系统优化调度模型及改进粒子群求解方法实现了新能源并网系统的优化调度，提高了系统调度性能。

## 参考文献：

[1] 白雪婷, 杨瑞琪, 陈泽春, 等. 计及综合需求响应的园

区综合能源系统优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 27-35.

- [2] 陈灵敏, 吴杰康, 张文杰, 等. 基于鲁棒优化的微能源网综合需求响应协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 159-169.
- [3] 李咸善, 马凯琳, 程杉. 含多区域综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 8-22.
- [4] 王子驰, 雷炳银, 杨灵芝, 等. 考虑电热联合需求响应的区域综合能源系统多目标双层优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 120-127.
- [5] 张海静, 杨雍琦, 赵昕, 等. 计及需求响应的区域综合能源系统双层优化调度策略[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 141-150.
- [6] 艾永乐, 丁剑英, 刘群峰, 等. 计及负荷需求响应的并网家用光伏系统协同优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 104-114.
- [7] 邱革非, 何超, 骆钊, 等. 考虑新能源消纳及需求响应不确定性的配电网主从博弈经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 66-74.
- [8] 杨茂, 王金鑫. 考虑可再生能源出力不确定的孤岛型微电网优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 973-985.
- [9] 王森, 张照彦, 袁玉宝, 等. 提高新能源消纳的电-热综合能源系统日前优化调度策略[J]. 热力发电, 2022, 51(7): 36-45.
- [10] 李林晏, 韩爽, 乔延辉, 等. 面向高比例新能源并网场景的风光-电动车协同调度方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(5): 554-563.
- [11] 颜勤, 涂晓帆. 新型电力系统下综合电动汽车充电站的优化运行[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(2): 176-182.
- [12] 张章, 王涛, 张丽洁, 等. 考虑需求响应的用户端气-电综合能源网络优化控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 156-164.
- [13] 张闻强, 邢征, 杨卫东. 基于多区域采样策略的混合粒子群优化求解多目标柔性作业车间调度问题[J]. 计算机应用, 2021, 41(8): 2249-2257.
- [14] 卜令晨, 李安桂, 李扬, 等. 基于改进粒子群的冷-热-电综合能源系统双层优化模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(5): 753-761.
- [15] 宋兴荣, 吴晋波, 杨志学, 等. 基于多目标粒子群算法的风光水火多源 AGC 协调优化方法[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(7): 13-23.