

# 一种用于微电网经济调度的分布式粒子群算法\*

胡浩宇, 邢建春, 周启臻, 张玉晗

(陆军工程大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:**随着微电网技术在电力系统中的应用愈加广泛,协调微电网内部分布式电源的出力分配以提高经济性成为了研究的重要课题。目前主流的经济调度方法是微电网调度中心利用全网微电源及负荷的信息进行调度,但这种集中式的方法依赖调度中心的计算能力,对微电源与调度中心之间通信要求较高,且与微电网的分布式特性相违背。提出一种完全分布式的并行调度方法,各分布式电源作为独立的智能体,平等地参与调度工作,利用自身与邻居节点之间的势能博弈,基于粒子群算法优化自身的出力,进而实现全网经济性最优的目标。在 MATLAB 平台上搭建了独立微电网优化调度模型,验证了所提出方法的可行性,并讨论了相关参数的变化对于调度结果的影响。

**关键词:**微电网;经济调度;分布式并行调度算法;势能博弈;粒子群算法

**中图分类号:** TM734

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.03.003

**引用格式:**胡浩宇,邢建春,周启臻,等.一种用于微电网经济调度的分布式粒子群算法[J].信息技术与网络安全,2020,39(3):10-16.

## A distributed PSO algorithm for economic dispatch of microgrid

Hu Haoyu, Xing Jianchun, Zhou Qizhen, Zhang Yuhan

(School of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** With the increasing proportion of microgrid in power system, improving the economical performance by dispatching generators in the grid appropriately becomes an important subject of research on power system. Nowadays, the mainstream dispatching method is the centralized method in which the microgrid control center (MGCC) has to get the information from every generator and load controller or the dispatching cannot be implemented. Accordingly, centralized method needs great computing power of MGCC and reliability of communication between generators and MGCC, which has be contrary to the distributed characteristics of microgrid. A fully distributed parallel dispatching method is proposed in this paper. As an independent agent, each distributed generator of the grid participates in the dispatching works equally and collaboratively. By making potential game between itself and neighbors, every agent uses particle swarm optimization (PSO) algorithm to control its output independently. Then the goal of improving the economical performance of the whole network can be achieved naturally. Finally a microgrid model is established on MATLAB. The feasibility of the proposed method is verified, and the influence of the change of relevant parameters on the optimization results is also discussed.

**Key words:** microgrid; economic dispatch; distributed parallel dispatch method; potential game; particle swarm optimization (PSO) algorithm

## 0 引言

随着微电网技术在电力系统中的广泛应用,协调微电网内部分布式电源的出力分配,以实现微电网经济性最优,成为了重要的研究课题<sup>[1-3]</sup>。

目前,微电网的经济调度工作可由调度中心通过集中式的调度来完成<sup>[4-7]</sup>。文献[7]将微电网参与电力市场的收益最大作为目标,利用集中式方法

得到最优发电计划。文献[8-9]在调度中心采用粒子群算法将功率平衡约束作为罚函数加入适应度函数计算,达到优化目标。在集中式调度方法下,每个微电源的出力由调度中心根据全部微电源容量、负荷分布以及发电带来的经济效益计算得到。这种集中式的方法过多地依赖调度中心的计算能力,一旦调度中心发生故障,全网的调度就无法进行。此外,这种调度方法需要微电源与调度中心之

\* 基金项目:国家重点研发计划(973计划)(2017YFC0704100)

间有良好的通信能力<sup>[10]</sup>,若某微电源与调度中心之间通信发生故障,则该电源无法参与调度。且集中式调度方法下,若有新电源加入微电网,均需要与调度中心建立通信连接,故不利于实现微电源的即插即用<sup>[11]</sup>。

由于集中式方法存在诸多缺陷,不需要调度中心的分布式调度方法应运而生。文献[11]提出一种基于蜂窝无线网络的微电网信息传输架构,此架构下微电源之间通过交互出力和负荷信息保证系统的功率平衡,但每个微电源均独立地进行出力优化,未考虑邻居微电源的经济性。文献[12]利用多智能体系统,为多联产型微电网设计了一种分布式的能量管理系统,并利用粒子群算法在考虑蓄电池放电量、水氢储量等多种约束下,以年为时间跨度对微电网运行总成本进行优化,但该文仅在上层智能体之间实现了分布式的控制,而在下层仍然是集中式的。文献[13]提出一种全局分布式迭代的优化框架,用于对空间上集群式微电网进行集群分布式优化调度,并通过仿真证明其所用方法经过少量迭代即可达到全局最优。但在每个微电网内部,调度仍是由调度中心完成的。上述两种方法分别在空间上、类别上对微电网进行了划分,实现上层的分布式调度,但在下层各个微电源仍然需要由调度中心进行出力分配。

本文提出一种完全分布式的并行调度方法,此方法下每个微电源都是可以进行信息处理的智能体,利用本地信息及邻居微电源的交互信息,进行势能博弈,基于粒子群算法对自身出力进行优化,从而达到全网经济性最优的目标。在 MATLAB 仿真平台上建立了独立微电网模型,验证了此调度方法的可行性,并分析了相关参数的变化带来的影响。

## 1 微电网经济调度模型

本文提出一种完全分布式的并行调度方法,微电网内每一台分布式电源均作为一个智能体。分布式电源通过母线为负荷供电形成微电网的能量网络,而对于信息网络,则在空间上距离较近的智能体间建立连接。每个智能体仅与通信相连的邻居进行信息交互,交互的信息包括传输功率、本地负荷及发电成本。微电网内每个可调分布式电源利用自身和邻居的信息进行博弈,从而调节自身的输出功率,分布式电源协同优化,使全网总的经济性达到最优。

## 1.1 微电网拓扑结构

微电网包含分布式电源、负荷以及储能装置,其中储能装置的作用主要在于对电能进行缓冲,优化电能质量,提高新能源微电网的稳定性,以及实现削峰填谷节约能源<sup>[14]</sup>。本文重点研究微电网经济调度的分布式方法,由于储能装置可在充电放电过程中分别作为负荷或电源来工作,为简化对于调度方法研究的影响,暂不考虑微电网中储能装置的调度。

建立的实验模型包含风力电站、光伏电站、柴油电站三类,设计一种环形的独立微电网,拓扑结构如图1所示,每个分布式电源连接到母线上且均带有本地负荷,通信连接如图1上虚线所示,以此拓扑结构为基础展开对于分布式调度方法的研究。

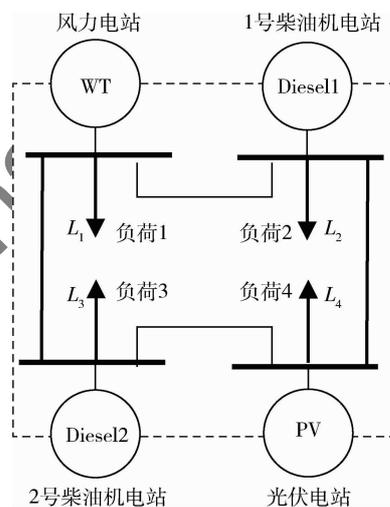


图1 独立微电网简化拓扑图

在此拓扑下,分布式电源 $i$ 输出功率的去向可大致分为三部分:供本地负荷消耗、传输给邻居两个节点的功率。

## 1.2 微电源模型

实验模型包含风力电站、光伏电站、柴油电站三类电源,下面对各种分布式电源进行建模。

### 1.2.1 风力电站

风力电站的基本组成单元是风力发电机,其输出功率由设备所处环境风速决定,按照式(1)进行建模<sup>[15]</sup>:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ P_r \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} & v_{ci} < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_{co} \\ 0 & v_{co} < v \end{cases} \quad (1)$$

其中  $P_{WT}$  为风力电站的输出功率,  $v$  为电站所处环境风速,  $P_r$  为电站额定功率,  $v_r$  为电站运行额定风速,  $v_{ci}$ 、 $v_{co}$  为电站运行切入、切出风速。

风力电站的发电成本主要来自于风力机组维护、保养产生的费用, 根据经验其单位功率的发电成本可根据式(2)建模:

$$f(P_{WT}) = 0.029 6 P_{WT} \quad (2)$$

### 1.2.2 光伏电站

光伏电站由若干光伏面板组成, 面板输出功率与电池表面的温度、面板接受光照强度有关, 按照式(3)进行建模<sup>[15]</sup>:

$$P_{PV} = [1 + k(T_C - T_{STC})] \frac{G_C}{G_{STC}} P_{STC} \quad (3)$$

$P_{PV}$  为输出功率,  $P_{STC}$  为标准测试环境光照强度  $1 \text{ kW/m}^2$ 、电池表面温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  下的最大功率,  $G_C$  为实际工况下的光照强度,  $k$  为功率温度系数,  $T_C$  为实际工况下的电池表面温度,  $G_{STC}$ 、 $T_{STC}$  分别为标准工况下的光照强度与电池表面温度。

光伏电站的运行成本主要是维护保养所产生的费用, 其单位功率的成本函数可根据式(4)建模:

$$f(P_{PV}) = 0.009 6 P_{PV} \quad (4)$$

### 1.2.3 柴油电站

柴油发电机可以根据自身下垂曲线, 在一定范围内进行输出功率的调节:

$$P_{diesel}^{\min} < P_{diesel} < P_{diesel}^{\max} \quad (5)$$

因需要使用化石燃料作为发电能源, 故发电成本较高, 其单位功率发电成本可根据式(6)进行建模<sup>[16]</sup>:

$$f(P_{diesel}) = a P_{diesel}^2 + b P_{diesel} + c \quad (6)$$

其中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为燃料耗量特性系数<sup>[16]</sup>。

## 1.3 经济调度模型

通常, 微电网的经济调度需要综合考虑发电成本和环境保护效益, 为注重于算法的研究, 简化问题, 故优化目标中暂时不考虑环境保护效益, 在建立经济调度模型时, 将实现全网发电成本最低作为优化目标, 即:

$$\min \sum_{i \in V} f_i(P_i) \quad (7)$$

其中  $f_i(P_i)$  表示节点  $i$  单位功率的发电成本。

在分布式的调度算法下, 各个分布式电源采取局部合作的思想<sup>[17]</sup>, 考虑自身以及邻居的发电成本, 计算各种出力方案下的经济效益, 因此在节点  $i$

上, 优化目标为式(8):

$$\min(f_i(P_i) + \sum_k^{N_i} f_k(P_k)) \quad (8)$$

其中  $f_i(P_i)$  表示节点  $i$  自身的发电成本,  $f_k(P_k)$  表示  $i$  的第  $k$  个邻居的发电成本。相应的, 节点  $i$  在进行调度时的约束条件<sup>[15]</sup> 如式(9)所示:

$$\begin{cases} \textcircled{1} P_i + \sum_{k=0}^{N_i} T_{k,i} = Li \\ \textcircled{2} P_i^{\min} < P_i < P_i^{\max} \\ \textcircled{3} T_l^{\min} < T_{i,k} < T_l^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

条件①表示节点  $i$  所提供的功率与所有邻居节点向  $i$  传来功率之和等于本地负荷大小, 其中  $N_i$  表示节点  $i$  邻居节点个数,  $T_{k,i}$  表示第  $k$  个邻居节点向节点  $i$  传输的功率; 条件②表示节点  $i$  自身出力定额约束; 条件③表示节点  $i$  与邻居  $k$  的功率传输线  $l$  上的限额约束。

## 2 基于局部信息交互的粒子群算法

### 2.1 势能博弈

根据 1.3 节经济调度模型中定义的目标函数, 各个节点参照式(8)给出的优化目标独立自主地调节出力, 最终实现式(7)全局的发电成本最低的优化目标。为实现邻居节点之间的相互合作, 这里将势能博弈的概念引入微电网运行调度。

将分布式电源的出力分配问题看作一个博弈问题<sup>[18-19]</sup>, 如式(10)所示:

$$A = [H, \{X_h\}_{h \in H}, \{Z_h\}_{h \in H}, \{U_h\}_{h \in H}] \quad (10)$$

其中  $A$  表示全网优化调度问题,  $H$  表示分布式电源集合,  $\{X_h\}$  表示出力方案集合,  $\{Z_h\}$  表示电源  $h$  的邻居电源集合,  $\{U_h\}$  表示电源  $h$  在对集合  $\{X_h\}$  中的方案进行优劣性评价时所用到的势能函数集合。

对应于式(8)所定义的单个节点的目标函数,  $\{U_h\}$  应当同时包含电源  $h$  以及邻居电源的发电成本。在调度时各电源还需要满足各自运行的约束条件。罚函数法提供了一种在分布式优化问题中, 解决各节点约束条件不一致的方法<sup>[20]</sup>。各节点将满足本地负荷所需功率约束作为惩罚项, 加入到每个智能体的势能函数中, 某节点势能函数得到如式(11)的定义:

$$F_h = f_h(P_h) + f_{z1}(P_{z1}^1) + f_{z2}(P_{z2}^2) + \alpha^k (P_h + P_{z1}^1 + P_{z2}^2 - L_h)^2 \quad (11)$$

其中  $F_h$  为电源  $h$  某一方案对应的势能函数,  $f_h$  ( $P_h$ ) 表示  $h$  自身的发电成本,  $P_{z1}^1$  表示邻居电源 Z1 流向  $h$  节点负荷的功率分量,  $f_{z1}(P_{z1}^1)$  表示此分量所产生的成本,  $P_{z2}^2$ 、 $f_{z2}(P_{z2}^2)$  表示电源 Z2 流向  $h$  节点的功率分量及其产生成本,  $\alpha^k(P_h + P_{z1}^1 + P_{z2}^2)$  为罚函数,  $P_h^2$  表示电源  $h$  提供给本地负荷的功率的分量,  $L_h$  表示  $h$  节点本地负荷。惩罚系数  $\alpha^k$  随着迭代次数  $k$  的增加而增大, 使得  $h$  节点处本地电源出力与接收功率之和随着迭代进行不断逼近负荷的需求。

微电网内每个分布式电源均使用这样的函数进行优劣性评价, 根据势能博弈理论, 全网存在一个调度方案的集合, 使得全网总势能函数达到最小, 进而选出最佳的出力方案。

### 2.2 分布式粒子群算法

本文提出一种基于局部信息交互的分布式并行粒子群算法。该方法中: 每个智能体首先按照 1.3 节中式(9)的约束, 随机产生一些可供选择的方案, 组成初始种群, 而后开始迭代计算, 如图 2 中所示在某次迭代中, 节点利用 2.1 节式(11)定义的势能函数, 对现有种群中的所有个体进行评价, 从中选取最优个体进行记录。在这一过程中需要注意, 势能函数中使用的邻居节点信息来自于邻居上一次迭代中的最优结果, 且自身选择的最优结果也将作为交互信息, 发送给所有的邻居用于下一次迭代。通过势能函数的比较, 完成选择最佳个体的操作后, 进行种群的更新, 在约束条件下, 根据前一次迭代的最优方案和多次迭代的全体最优方案, 生成新的种群供下一次迭代选择。

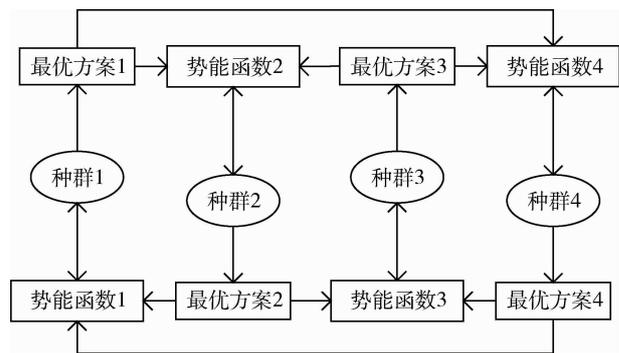


图2 某次迭代中粒子的选择与更新

据此, 微电网内某节点调度算法伪代码如下所示:

#### 算法 1: 节点出力方案制定算法

1. 识别电源类型
2. 设定最大进化代数  $T$ , 种群大小  $D$ , 局部及全局学习因子  $C_1$ 、 $C_2$ , 变异系数阈值  $W_{max}$ 、 $W_{min}$ , 惩罚系数  $\alpha$  及其变化规律  $\alpha^k$
3. 初始化普通种群  $\{X\}$ 、最优种群  $\{P\}$ 、速度矩阵  $\{V\}$
4. for  $h = 1$  to  $T$  (开始迭代)
  - 4.1 收取邻居信息
  - 4.2 for  $j = 1$  to  $D$ 
    - 评价粒子  $j$  优劣性, 更新  $P_j$       更新  $X_j$ 、 $V_j$
    - 修正在约束条件外的  $v \in V$ 、 $x \in X$
  - end
  - 4.3 记录本次迭代最优个体、编号
    - 记录最优个体中与邻居节点耦合的变量
    - 更新  $\alpha$
    - 发送耦合变量给邻居
- end

某节点上算法流程如图 3 所示。

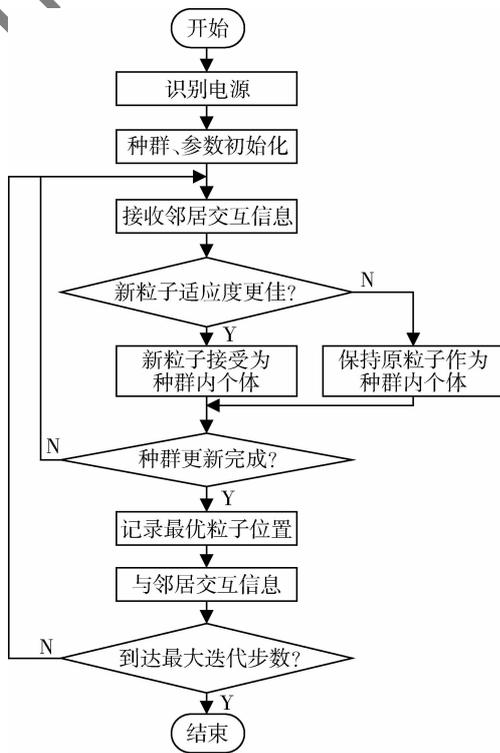


图3 单一节点粒子群算法流程图

### 3 MATLAB 仿真实验

在 MATLAB 仿真平台上, 按 2.2 节中定义的某一智能节点的算法, 分别产生四组相互独立的粒子

种群和速度矩阵,每个节点拥有各自的种群、速度矩阵、势能函数。在  $h$  节点利用势能函数评价个体的优劣时,式(11)中的本地变量  $P_h$  由节点  $h$  自身种群提供。而由于每个节点在一次迭代完成后,要将最优出力方案下的传输到某邻居节点功率和这部分功率所产生的成本,发送给该邻居。因此  $P_{z1}^1$ 、 $P_{z2}^1$  以及  $f_{z1}(P_{z1}^1)$ 、 $f_{z2}(P_{z2}^1)$  由邻居节点完成方案选择工作后,对全局变量进行赋值,进而可被节点  $h$  的势能函数使用。

每次迭代时,四个节点分别执行 2.2 节中提出算法的步骤 4,待四个节点全部完成选择与更新后,再更新全局变量,开始下一次迭代。因此,即使各节点在选择方案的时间上有先后顺序,但同一次迭代中使用的交互信息均是上一次迭代的,故四节点的计算仍可以看作是分布式并行的。

由于风力电站与光伏电站输出不可调节,且目前的风、光功率预测技术偏差仍比较大<sup>[21]</sup>,为保证经济性和环保性,需尽量使其出力全部提供给负荷,因此进行实验时,为了简化程序,在额定输出功率范围内,假定两个电站的出力为定值,同时假定某一时刻各节点上负荷是不变的。

实验中选取电源出力及负荷大小为无量纲量进行计算,风力电站出力选为 18,光伏电站选 15,1 号柴油电站出力范围 5~20,2 号柴油电站出力范围 10~30,负荷  $L_1 \sim L_4$  分别取为 14、15、24、12。

### 3.1 实验结果

经过调节参数观察优化结果,根据成本大小、迭代至收敛所用代数以及是否满足功率平衡等因素,综合考虑,选取了最佳的参数如表 1 所示。

表 1 最优参数设置表

参数	值
最大进化代数 $T$	200
种群维度	12
个体数量	20
局部学习因子 $C1$	1.2
全局学习因子 $C2$	1.2
变异系数上限 $W_{max}$	0.8
变异系数下限 $W_{min}$	0.4
惩罚系数初值 $\alpha$	50
惩罚系数增量 $k$	3

在这种参数设置下,得到收敛的调度结果如图 4 所示,因实验在 MATLAB 平台上进行,很容易得到

四个节点的发电总成本,对每一代的值进行记录绘制如图 5 所示。

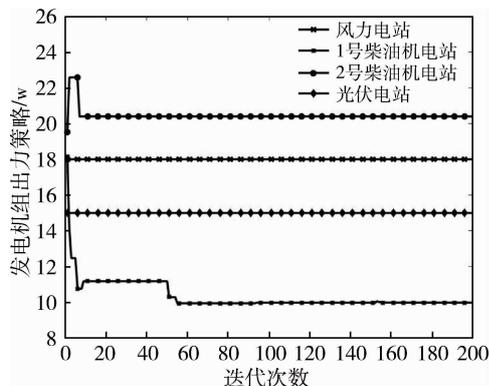


图 4 优化出力结果

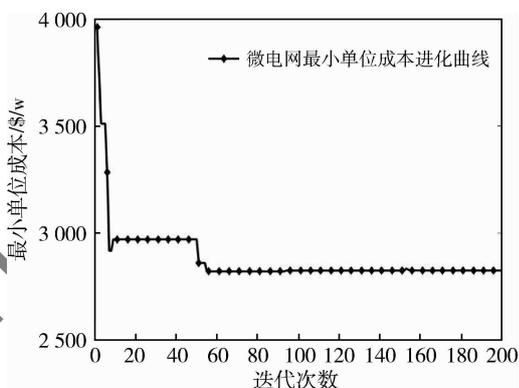


图 5 发电总成本

多次实验后发现,分布式的粒子群算法在此参数设置下通常只需要 0.7 s 就可迭代至最高代数,完成优化,因此具有快速性。而当这种优化算法使用在分布式的平台上时,其每一个节点的运算都是同步进行的,收敛时间还将进一步缩短。

### 3.2 参数影响性分析

实验中发现,在配置算法关键参数时,参数的变化可能造成优化结果的不同,因此需要对参数的影响作用进行分析,为在分布式平台上实现算法的配置提供依据。

#### 3.2.1 改变局部学习因子

考虑极端情况,即不使用局部学习时,优化结果呈现出了收敛速度变慢且无法迅速满足约束条件的现象。出力结果和总成本如图 6、图 7 所示。

#### 3.2.2 改变全局学习因子

同样考虑极端情况,即没有全局学习时,算法出现了收敛至局部最优值的问题,如图 8、图 9 所示。

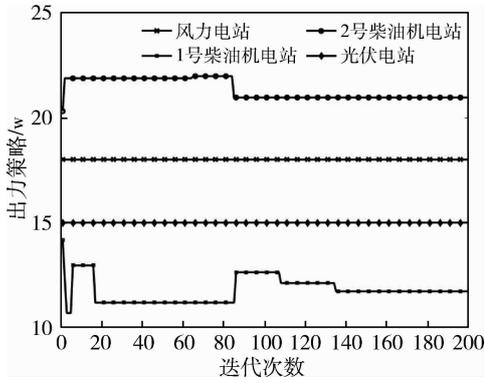


图6 无局部学习优化结果

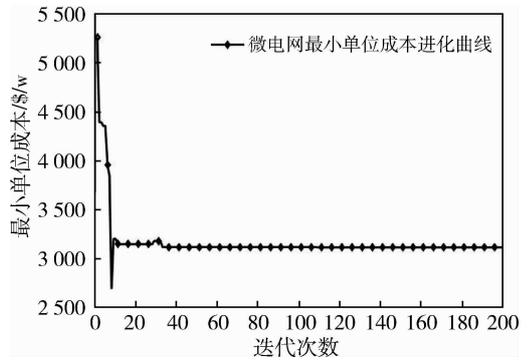


图9 无全局学习发电总成本

步进值选取过大,即实验中超过 10 时,也会导致算法陷入局部最优,结果满意度不高。选取过小时,实验中小于 1 时,则会导致如初值过小时同样的资源浪费现象。当惩罚系数初值选为 10,步进值选为 1 时结果如图 10、图 11 所示。

在这种条件下,前期无法满足约束条件的要求,后期又无法达到期望结果。可见惩罚系数的选取对于算法十分重要。

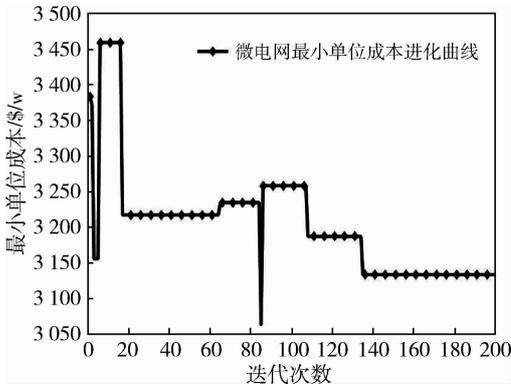


图7 无局部学习发电总成本

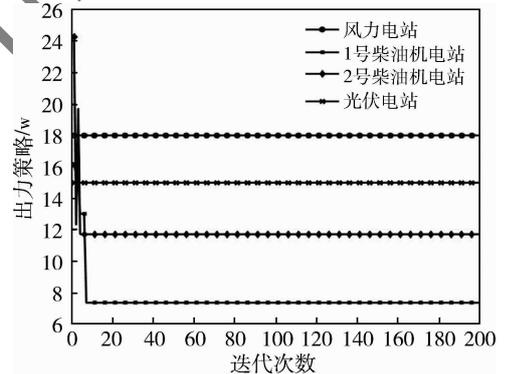


图10 小惩罚系数偏优化结果

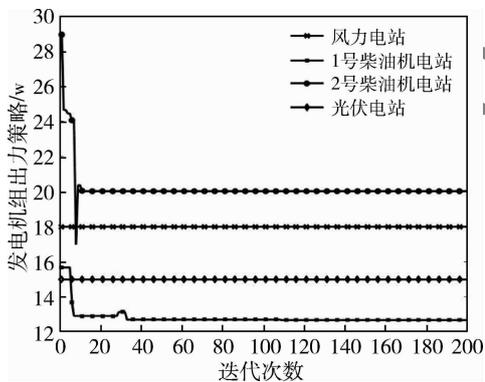


图8 无全局学习优化结果

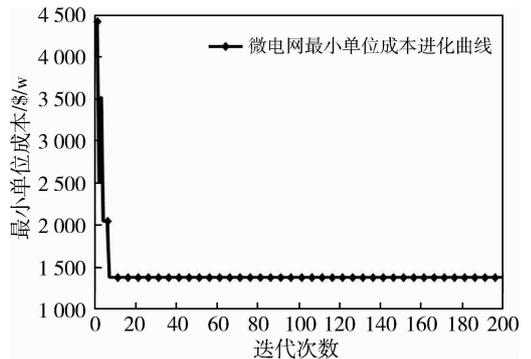


图11 小惩罚系数发电总成本

### 3.2.3 改变惩罚系数

罚函数的作用在于随着迭代的进行,提升惩罚系数,使得罚函数值更小的个体优势更加明显,进而使得约束条件得到满足。

当惩罚系数的初始值选取过小时,迭代的前半部分结果将会十分不稳定,无法满足约束条件要求,满足约束条件后,优化还未完成,因而浪费了计算资源。当惩罚系数初始值选择过大时算法又容易陷入局部最优。因此选取合适的惩罚系数初始值对于算法很重要。

## 4 结论

本文针对微电网经济调度问题的集中式方法存在的问题,提出一种基于局部信息交互的分布式

粒子群算法。该算法仅需要分布式电源与邻居交互信息,就能通过势能博弈选取出最优出力方案,实现微电网运行经济性最优的目标。并利用 MATLAB 仿真平台,验证了所提出算法的可行性并讨论了关键参数对于算法结果的影响。

在 MATLAB 平台上进行的实验过程中,各个智能体所选取的参数均相同,但在真实的分布式系统中,各个节点应当根据自身出力限额以及所带负荷大小选取合适地参数。

基于本文提出的分布式调度算法,进一步的研究工作将围绕在分布式的群智能仿真平台上实现算法来开展。在分布式平台上,需要进一步复杂化微电网的结构,加入储能装置、新电源及负荷,验证算法在复杂系统中的可行性。

### 参考文献

[1] 周晓倩,余志文,艾芊,等. 含冷热电联供的微网优化调度模型综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):26-33.

[2] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):7-14.

[3] 冯庆东. 分布式发电及微网相关问题研究[J]. 电测与仪表,2013,50(2):54-59,82.

[4] 李燕青,全年. 基于多属性决策的微电网多目标优化运行[J]. 电测与仪表,2018,55(4):55-60,69.

[5] DING M, ZHANG Y, MAO M, et al. Operation optimization for microgrids under centralized control[C]. 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2010:984-987.

[6] CAVRARO G, CALDOGNETTO T, CARLI R, et al. A master/slave control of distributed energy resources in low-voltage microgrids[C]. European Control Conference (ECC). IEEE, 2016:1507-1519.

[7] PARHIZI S, KHODAEI A, SHAHIDEHPOUR M. Market-based versus price-based microgrid optimal scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):615-623.

[8] 王锐,顾伟,吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化,2011,35(8):22-27.

[9] 陈达威,朱桂萍. 微电网负荷优化分配[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):45-50.

[10] ANAND S, FERNANDES B. Reduced-order model and stability analysis of low-voltage DC microgrid[C]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(11):5040-5049.

[11] LIANG H, B. CHOI B J, ABDRABOU A, et al. Decentralized economic dispatch in microgrids via heterogeneous

wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2012, 30(6):1061-1074.

- [12] KARAVAS C, KYRIAKARAKOS G, ARVANITIS K, et al. A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 103:166-179.
- [13] 周晓倩,艾芊,王皓. 即插即用微电网集群分布式优化调度[J]. 电力系统自动化,42(18),106-119.
- [14] 李国庆,张慧杰,王鹤,等. 计及储能装置削峰填谷的微网优化运行[J]. 电测与仪表,2013,50(10):73-78.
- [15] 马溪原,吴耀文,方华亮,等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):17-25.
- [16] WOOD A J, WOLENBERG B F, SHEBLÉ G B. Power generation, operation, and control[M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [17] MAESTRE J M, MUÑOZ DE LA PEÑA D, CAMACHO E F. Distributed model predictive control based on a cooperative game[J]. Optimal Control Applications & Methods, 2011, 32(2):153-176.
- [18] MARDEN J R, ARSLAN G, SHAMMA J S. Cooperative control and potential games[C]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2009, 39(6):1393-1407.
- [19] XU Y, WU Q, WANG J, et al. Opportunistic spectrum access using partially overlapping channels: graphical game and uncoupled learning[C]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9):3906-3918.
- [20] INALHAN G, STIPANOVIĆ D M, TOMLIN C J. Decentralized optimization with application to multiple aircraft coordination[C]. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002:1147-1155.
- [21] 黄国栋,李伟刚,李振斌. 大规模风电接入的电网发电调度研究综述[J]. 电测与仪表,2015,52(9):1-5.

(收稿日期:2019-12-29)

### 作者简介:

胡浩宇(1996-),男,硕士,主要研究方向:电力系统经济调度、分布式无中心智能优化算法。

邢建春(1964-),男,博士,教授,主要研究方向:国防工程智能化、复杂智能信息系统。

周启臻(1993-),男,博士,主要研究方向:无线网络通信、物联网感知。

# 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部  
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所