

1-2-2019

Optimal Economic Dispatch of Microgrid Based on Immune Particle Swarm Optimization Algorithm

Gao Cong

Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Dinghui Wu

Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Tinglong Pan

Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Zhicheng Ji

Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimal Economic Dispatch of Microgrid Based on Immune Particle Swarm Optimization Algorithm

Abstract

Abstract: Some restrictions are accompanied when solving the optimal economic dispatch of microgrid, such as multi-constraints, discontinuities and multi-generators. *An immune particle swarm optimization (IMPSO) algorithm is proposed, which introduces the artificial immune system into particle swarm optimization (PSO) algorithm and can ensure the PSO convergence as well as exerting the immune mechanism to make the particles uniformly distributed in solution plane.* The algorithm possesses the virtues like global probe and robustness and is used to solve two operating modes of island and grid-connected in microgrid respectively. The experimental results show that the IMPSO provides a feasible and advanced method in comparison with other three intelligent algorithms.

Keywords

immune particle swarm optimization, economic dispatch, microgrid model, microgrid operation mode, immune mechanism

Recommended Citation

Gao Cong, Wu Dinghui, Pan Tinglong, Ji Zhicheng. Optimal Economic Dispatch of Microgrid Based on Immune Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 636-646.

基于免疫粒子群算法的微电网经济运行优化

高聪, 吴定会, 潘庭龙, 纪志成

(江南大学轻工过程先进控制教育部重点实验室 江苏 无锡 214122)

摘要: 微电网经济运行优化问题的求解常常伴随着多约束、非连续和多发电机组等问题的制约。针对该问题, 提出一种免疫粒子群算法, 算法将人工免疫系统引入到粒子群算法中, 既能保证算法本身的收敛性, 也能在免疫环节中使粒子较为均匀地分布于解空间内, 因而保证了算法的全局寻优能力和鲁棒性。将该算法分别用于求解微电网的孤岛、并网两种运行两种模型实例, 并与其他三种算法进行比较, 实验结果表明该算法可以有效求解微电网经济优化问题。

关键词: 免疫粒子群算法; 经济运行优化; 微电网模型; 微电网运行方式; 免疫机制

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 02-0636-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802033

Optimal Economic Dispatch of Microgrid Based on Immune Particle Swarm Optimization Algorithm

Gao Cong, Wu Dinghui, Pan Tinglong, Ji Zhicheng

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Some restrictions are accompanied when solving the optimal economic dispatch of microgrid, such as multi-constraints, discontinuities and multi-generators. An immune particle swarm optimization (IMPSO) algorithm is proposed, which introduces the artificial immune system into particle swarm optimization (PSO) algorithm and can ensure the PSO convergence as well as exerting the immune mechanism to make the particles uniformly distributed in solution plane. The algorithm possesses the virtues like global probe and robustness and is used to solve two operating modes of island and grid-connected in microgrid respectively. The experimental results show that the IMPSO provides a feasible and advanced method in comparison with other three intelligent algorithms.

Keywords: immune particle swarm optimization; economic dispatch; microgrid model; microgrid operation mode; immune mechanism

引言

随着能源需求的不断扩大, 新能源将替代燃料能源为电网注入更多动力, 而微电网作为新能源的结合体将有更广阔的发展空间。与传统的集中式供

电相比, 微电网有两大优势: 第一, 它提高了能源的利用率; 第二, 它可以与主电网连接起来, 用于平复电网的波动^[1]。经济优化问题是微电网运行研究的一个重要方向。其目的是在满足系统负荷需求和外部约束的条件下, 通过数学方法或人工智能算法来求解其经济最优下的机组组合。然而, 风力发电机(wind turbine, WT)和光伏阵列(photovoltaic, PV)发电量受外界环境(风速、光照强度和外界温度)^[2]变化的影响, 微型燃气轮机(micro turbine,



收稿日期: 2016-01-29 修回日期: 2016-03-29;
基金项目: 国家自然科学基金(61572237, 61573167);
作者简介: 高聪(1993-), 男, 山西太原, 硕士, 研究方向为微电网经济优化; 吴定会(1970-), 男, 安徽合肥, 博士, 副教授, 研究方向为微电网经济优化和物联网技术; 潘庭龙(1976-), 男, 江苏建湖, 博士, 教授, 研究方向为微电网经济优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 636 •

MT)的非凸性和储能电池(battery for energy storage, BE)的强约束, 以及在微电网的建模和运行过程中存在着大量非线性因素, 都使得传统的数学方法无法获得最经济的方案。

在过去的几十年里, 许多先进的智能算法被开发出来并开始逐步用于解决此类问题。Jayabarathi 等^[3]综合考虑到多种燃料选择、环境以及地区多样性的问题, 提出了一种进化规划方法, 成功地解决了单类型机组的多目标优化问题。Dubeyd 等^[4]根据生物行为的启发提出一种改进花朵授粉算法, 通过对花朵的自授粉与交叉授粉行为的模拟计算出授粉距离的长短, 并对长距离授粉行为采用多步跳转的形式, 大大缩短了搜索时间, 也提高了对单类型机组的单目标优化的精度。Akorede 等^[5]运用所提出的分布式公司建立起单种类发电机组的模型, 并利用遗传规划的方法对发电机组的网络布局进行优化, 使网络损失降低到最小。Lin 等^[6]针对多机组约束问题, 采用了改进禁忌搜索算法, 该论文算法在适应度中引入了“距离”的概念, 加快了最优化的求解速度。

尽管以上论文提出了许多经济运行优化的方法, 但都没有解决微电网所特有的多种类机组、储能装置以及与主网交换电能的问题。针对这些问题, 本文提出一种免疫粒子群算法(immune particle swarm optimization, IMPSO), 算法将人工免疫机制引入到粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)中, 它通过对粒子建立免疫系统信息处理机制, 发挥免疫系统具有的全局寻优能力优势, 避免了传统粒子群算法的局部收敛的缺陷, 提高算法前期的收敛速度和后期的收敛精度。该算法既可以发挥人工免疫系统的全局性和多样性, 又保持了粒子群算法的快速收敛的特性。通过测试函数和微电网经济调度模型实例仿真, 验证了免疫粒子群算法求解微电网经济运行问题的可行性和先进性。

1 微电网模型

1.1 微电网数学模型

1.1.1 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机的污染气体排放量远小于集中式发电机组^[7], 目前采用 Captone 公司的 C65 燃气轮机。其数学模型如下:

$$\eta_l = \frac{P_{el} + P_{th,rec}}{m_f LHV_f} \quad (1)$$

式中: P_{el} 是汽轮机输出功率; $P_{th,rec}$ 是热回收值取 0; LHV_f 是燃料低位热值, 取 12.4 MJ/kWh; m_f 是燃料流动速率取 0.5 kg/s。

$$C_{MT} = C_{nl} \sum_{i=1}^T \frac{P_T}{\eta_{IT}} \quad (2)$$

式中: C_{nl} 是燃气的价格, 2.05¥/m³^[8]; P_T 是在 T 时段内的发电功率; η_{IT} 是机组在 T 时段内的发电效率。

1.1.2 电池模型

电池的电荷状态(SOC)是指剩余能量与额定能量的比值, 这个参数对准确控制电池充放电和系统经济调度非常重要。电池的充电公式如下:

$$SOC(t) = (1 - \delta)SOC(t-1) - P_c \Delta t \eta_c / E_c \quad (3)$$

式中: P_c 是充电功率; η_c 是充电效率 95%^[9]; E_c 是电池在 Δt 内的整体容量。电池的放电公式如下:

$$SOC(t) = (1 - \delta)SOC(t-1) - P_d \Delta t / E_c \eta_d \quad (4)$$

式中: P_d 是放电功率; η_d 是放电效率 95%; δ 是电池自放电系数。

1.1.3 风力发电机模型

风力发电机的出力主要由风机轮毂处的风速决定, 风电场的风速主要服从双参数威布尔分布模型, 其概率密度为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (5)$$

式中: v 为风速; k 为形状指数; c 为规模指数。 k 越大, 曲线的峰值越大, 一般取 1.8–2.8。形状参数 k 和规模参数 c 可由风速的平均值 μ 和标准差 σ 算出:

$$\begin{cases} k = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \\ c = \frac{\mu}{\Gamma(1+1/k)} \end{cases} \quad (6)$$

式中： Γ 是 Gamma 函数。

风电功率的建模需要得到重要的参数，计算发电量与风速关系的函数为：

$$\begin{cases} P_{WT} = 0 & v < V_{ci} \\ P_{WT} = av^2 + bv + c & V_{ci} < v < V_r \\ P_{WT} = 130 & V_r < v < V_{co} \end{cases} \quad (7)$$

式中： P_{WT} 、 V_{ci} 和 V_{co} 分别表示风力发电机功率，切入风速和切出风速； V_r 、 v 分别表示额定和实际风速；系数 $a = 3.4$ ， $b = -12$ ， $c = 9.2$ ； $V_{ci} = 3.5$ ， $V_{co} = 18$ ， $V_r = 17.5$ 取决于发电机固有特性。

1.1.4 光伏阵列模型

光伏阵列将太阳能直接转化为电能。其操作受到了辐射强度和周围环境温度的影响。在一定时间内，太阳的光照强度可以近似看成 Beta 分布，其概率密度如下：

$$f(G(t)) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \left(\frac{G(t)}{G_{max}}\right)^{\alpha-1} \times \left(1 - \frac{G(t)}{G_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (8)$$

式中： $G(t)$ 和 G_{max} 分别表示一段时间内的实际光照强度和最大光照强度(W/m^2)； α 和 β 都是 Beta 分布的形状参数； Γ 是 Gamma 函数。根据一定时间内光照强度的平均值 μ 和标准差 σ 可以得到光照强度 Beta 分布的形状参数 α 和 β ：

$$\begin{cases} \alpha = \mu \left(\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1\right) \\ \beta = (1-\mu) \left(\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1\right) \end{cases} \quad (9)$$

文中主要通过考虑模块的输出功率和太阳的辐射强度来建立模型。在标准测试环境(STC)下，光伏输出的功率可用下式计算：

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_r)] \quad (10)$$

式中： P_{PV} 是发电模块实际输出功率； P_{STC} 是标准测试环境下发电模块输出功率； G_{ING} 是实际光照强度； G_{STC} 是标准测试环境下的光照强度； k 是光

照温度系数取-0.45； T_c 是光伏电池的当前温度； T_r 是光伏电池的参考温度。

光伏发电模块采用 YGE 60 CELL 额定功率 200 W，短路电流 $I_{sc} = 9.35A$ ，开路电压 $V_{oc} = 37.7V$ ，峰值电流 $I_{mpp} = 8.59A$ ，峰值电压 $V_{mpp} = 30.3V$ 。

1.2 目标函数和约束条件

1.2.1 目标函数

微电网的运营成本可以用如下函数来描述：

$$\min C = C_{MT} + C_{WT} + C_{PV} + C_{BE} + C_{GRID} \quad (11)$$

式中： C_{MT} 是微型汽轮机发电所需的燃料成本与发电成本之和； C_{WT} 是风力发电机组发电成本； C_{PV} 是光伏阵列发电成本； C_{BE} 是孤岛模式时电池充放电的总成本； C_{GRID} 是并网阶段微电网与主网购电售电的总成本。

1.2.2 系统约束

功率平衡函数为：

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_{GRID} + P_{BE} = P_{LOAD} \quad (12)$$

式中： P_{LOAD} 是系统负荷需求； P_i 是微电网第 i 个发电设备； P_{GRID} 是网络输出功率，若向微电网输送电能； P_{GRID} 为负，若向微电网吸收电能，则为正； P_{BE} 为电池的功率，若电池释放电能； P_{BE} 为正，若电池储存电能，则为负。功率约束为：

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (13)$$

式中： P_{min} 是发电设备的功率低限； P_{max} 是发电设备的功率高限。电池管理约束为：

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (14)$$

$$-P_{BEmax} \leq P_{BE} \leq P_{BEmax} \quad (15)$$

$$SOC_{end} = SOC_{start} + \sum_{t=0}^{N-1} P_{BE} \Delta t \quad (16)$$

式中：将 $SOC_{min} = 0.1$ 作为 SOC 的低限；将 $SOC_{max} = 0.9$ 作为 SOC 的高限； P_{BEmax} 是电池最大的吸收和释放电能的功率； n 是一天内统计的次数。线路传输功率约束为：

$$-P_L^{max} \leq P_{GRID} \leq P_L^{max} \quad (17)$$

式中： P_L^{max} 是线路传送带最大功率。

2 免疫粒子群算法

免疫粒子群算法将免疫机制引入到粒子群算法中。在免疫机制中, 抗体和抗原分别是最优解和候选解的集合, 二者的亲和力描述了候选解和最优解的相似程度。与抗原亲和力大且浓度小的抗体得以促进, 反之得以抑制, 保证了抗体的多样性^[10]。同时, 将受到抗原刺激的抗体作为记忆细胞保留下来, 当再次受到同类抗原刺激时, 记忆细胞将产生大量抗体^[11-12]。保证了算法的全局性, 避免早熟收敛现象^[13]。本文所提出免疫机制描述如下:

(1) 抗体的产生

初始化粒子的速度与位置, 将每 N 个粒子作为一组解向量, 设定抗原与抗体的最小亲和力。

(2) 亲和力计算

抗原与抗体的亲和力计算公式如下:

$$(A_g)_k = \frac{1}{1+t_k} \quad (18)$$

式中: $(A_g)_k$ 是抗原和抗体 k 之间的亲和力; t_k 是抗原和抗体 k 的结合强度; $(A_g)_k$ 的值位于 0 和 1 之间。 $(A_g)_k = 0$ 时表示抗体与抗原相结合, 得到最优解。该公式也可用于计算抗体和抗体之间的亲和力:

$$ay_{v,w} = \frac{1}{1+H_{v,w}} \quad (19)$$

式中: $H_{v,w}$ 是抗体 v 和抗体 w 的结合强度。 $H_{v,w} = 0$ 时, 抗体 v 和抗体 w 的基因完全匹配, 这种情况下, $ay_{v,w} = 1$ 。

抗原和抗体之间的亲和力为:

$$ax_v = opt_v \quad (0 < opt_v < 1) \quad (20)$$

式中: opt_v 是抗原和抗体 v 之间的结合强度的测量, 这与定义与优化值是一致的。 ax_v 表明当优化值更大时, 抗原抗体能够协调结合。

(3) 交叉与变异

将产生的解向量进行一定概率的交叉与变异, 可能产生更优良的个体。

(4) 结合强度计算

通过运用欧几里得形态空间的欧几里得距离

公式计算结合强度:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^L (x_i - y_i)^2} \quad (21)$$

(5) 抗体的选择

将抗原与抗体的亲和力与结合强度与设定的最小的亲和力与结合强度进行比较, 淘汰亲和力和结合强度较小的抗体。从而保证了粒子较为均匀地分解在求解平面内。

免疫机制机理图如图 1 所示。

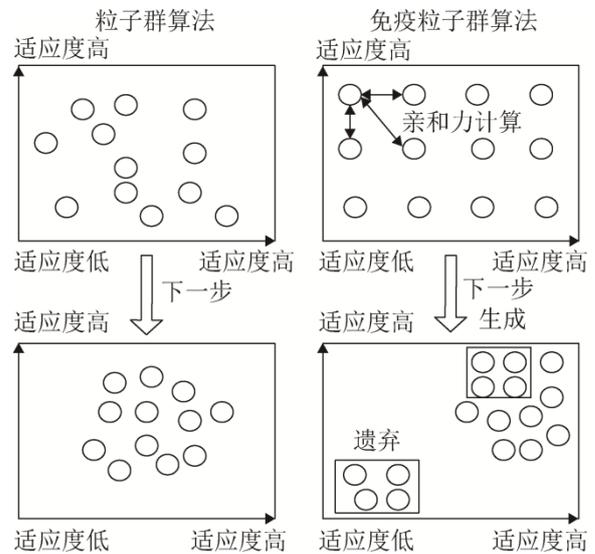


图 1 免疫机制作用机理图

Fig. 1 Schematic diagram of immune mechanism

本文算法的程序流程如图 2 所示, 其中 $F_particle$ 表示粒子的适应度, F_pbest 表示粒子的当前最佳适应度, F_gbest 表示粒子全局最佳适应度。

3 算法对测试函数的求解

为了验证免疫粒子群算法的寻优能力, 算法对 6 个测试函数^[14-15]进行寻优计算, 通过分别求取其最好值、最差值、平均值、标准差和迭代时间来验证算法的寻优性能。表 1 列出了实验所需要的测试函数, n 表示函数决策向量的维数, f_{opt} 表示函数的最小理论值。

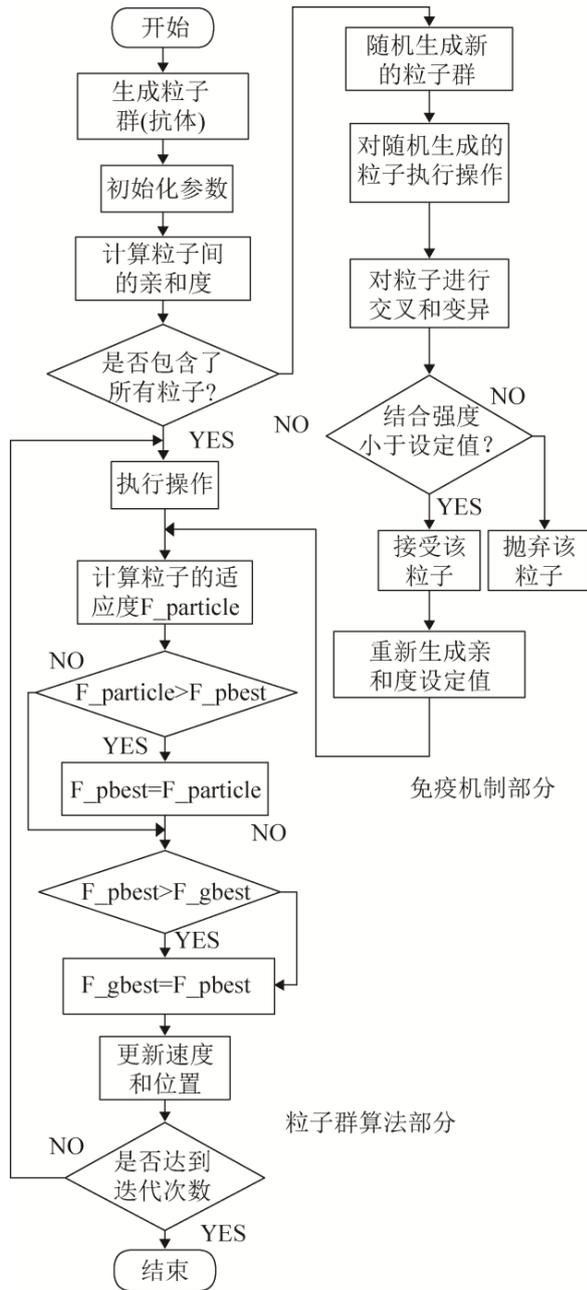


图2 免疫粒子群算法流程
Fig. 2 The process of IMPSO

实验中选取粒子群算法(PSO)^[16]、遗传粒子群算法(GAPSO)^[17]、量子粒子群算法(QPSO)^[18]与免疫粒子群算法(IMPSO)比较。为了体现公平性,采用随机初始化粒子的速度与位置,粒子最大步长为5,种群规模均设为100,每次运行的最大迭代次数均为1000,测试维数都设为10的条件下分别运行。4种算法其他参数列于表2中。其中 c_1 , c_2 表

示粒子的学习因子; ω_{max} 、 ω_{min} 分别表示粒子速度更新的最大最小惯性权重 p_c 、 p_m 分别表示粒子的交叉和变异概率; α 为控制收敛速度的缩放系数; aff 为粒子间的最小亲和度, DS 为生成新粒子群的粒子个数。粒子群算法的参数同样适用于其他三个粒子群优化算法。

表1 标准测试函数
Tab. 1 The benchmark functions

测试函数	代号	界限	f_{opt}
Sphere	F1	$[-100,100]^n$	0
Rosenbrock	F2	$[-30,30]^n$	0
Rastrigrin	F3	$[-5.12,5.12]^n$	0
Schaffer	F4	$[-100,100]^n$	0
Griewank	F5	$[-600,600]^n$	0
Ackley	F6	$[-32,32]^n$	0

表2 四种算法的参数
Tab. 2 Parameters of four algorithms

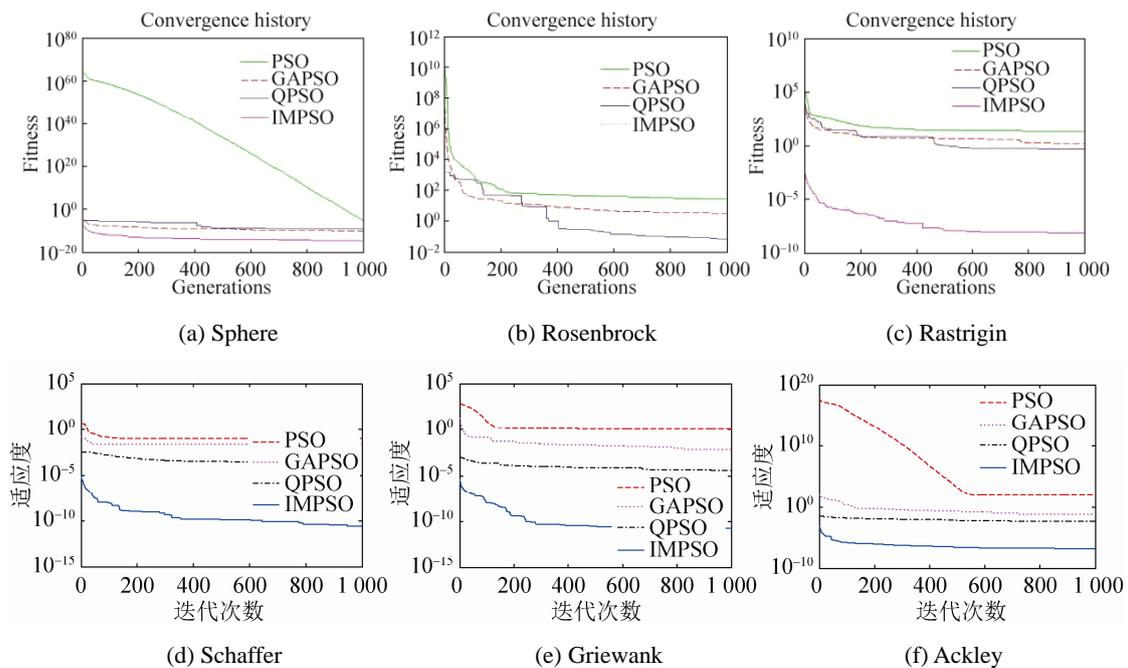
相关算法	参数
PSO	$c_1 = c_2 = 2.0$ $\omega_{max} = 0.9$ $\omega_{min} = 0.4$
GAPSO	$p_c = 0.5$ $p_m = 0.1$
QPSO	$\alpha = 1.77$
IMPSO	$p_c = 0.9$ $p_m = 0.1$ $aff = 1e-5$ $DS = 10$

四种算法中粒子适应度的最好值、最差值、平均值、标准差和迭代时间列于表3中。

从图3(a)~(f)可以看出,在早期阶段,相比于其他算法,IMPSO算法可以搜寻到更好的解。而在图3(b)~(f)图中随着迭代次数的不断增加,IMPSO算法的收敛速率也更快。这主要是因为免疫机制可以更好地将较好的的粒子筛选出来并较为均匀的分布在平面内。从表3看出,除连续多峰且被指数项覆盖表面的测试函数 Ackley^[19]之外,IMPSO算法对其他测试函数的标准差均处于最小值。这进一步说明人工免疫机制的引入既提高了算法的全局探索能力和鲁棒性,也增强了算法的寻优能力。

表 3 算法对测试函数的仿真
Tab. 3 Simulation of algorithms for benchmarks

测试函数	测试算法	最好值	最差值	平均值	标准差	迭代时间/s
F1	PSO	5.0478e-10	6.8423e-04	3.8738e-05	1.5285e-04	0.7815
	GAPSO	1.1355e-10	1.8073e+00	3.1947e-02	6.6313e-02	0.8851
	QPSO	5.3448e-11	8.5061e-02	5.8057e-03	1.9172e-02	0.7617
	IMPSO	6.1782e-20	1.6407e-14	3.2278e-15	4.7021e-15	0.8745
F2	PSO	1.4449+02	1.9451e+03	2.3999+02	5.7970e+02	0.8314
	GAPSO	1.5978e-01	2.1234e+01	2.1232e-01	3.3986e+00	0.9155
	QPSO	5.3708e-08	5.5529e-02	3.5235e-02	1.2970e-02	0.8216
	IMPSO	0	0	0	0	0.8914
F3	PSO	0	4.9748e+01	2.2387e+01	1.2024e+01	0.8470
	GAPSO	1.6083e+00	1.9071e+01	1.3280e+01	7.3571e+00	0.9246
	QPSO	1.8547e-03	8.3833e+00	4.5075e-01	1.8677e+00	0.8482
	IMPSO	6.2894e-14	5.7587e-08	1.1152e-08	1.7813e-08	0.8908
F4	PSO	9.7124e-02	9.7124e-02	9.7124e-02	7.2236e-14	1.9500
	GAPSO	7.8147e-03	4.9947e-02	2.3703e-02	4.2338e-02	2.2693
	QPSO	9.7159e-05	1.2700e-03	3.1422e-04	2.8891e-04	1.9207
	IMPSO	1.6179e-15	1.1991e-10	2.9262e-11	3.4051e-11	2.1423
F5	PSO	0	2.6808e+00	1.1194e+00	6.6964e-01	1.8517
	GAPSO	1.5014e-03	3.7472e-01	6.9047e-03	2.3257e-02	2.1575
	QPSO	5.6173e-06	1.6434e-04	4.0543e-05	4.1015e-05	1.7905
	IMPSO	2.2181e-15	1.5688e-10	2.0574e-11	3.9381e-11	2.0823
F6	PSO	2.6645e-14	1.9999e+02	8.7775e+01	1.0001e+02	1.6411
	GAPSO	1.0027e-03	2.1070e+00	6.5664e-02	3.5921e-01	1.8075
	QPSO	3.9612e-04	2.0000e-02	4.5328e-03	6.7130e-03	1.6966
	IMPSO	6.3886e-09	6.6504e-07	1.3602e-07	1.4705e-07	1.7883

图 3 测试函数的平均收敛曲线
Fig. 3 Average convergence curves of benchmark functions

<http://www.china-simulation.com>

4 微电网模型算例分析

为了检验免疫粒子群算法在求解电力经济调度问题的寻优能力, 本节参考文献[20]中微电网设备的具体参数和风速, 光照强度、温度对两个典型策略进行了测试, 其数据如图4~6所示。

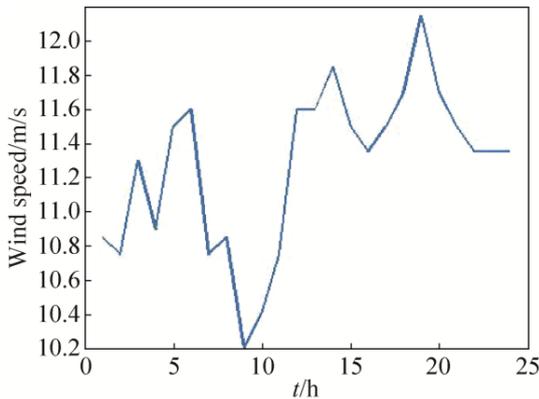


图4 某地24h风速变化
Fig. 4 24 hour wind speed change in a place

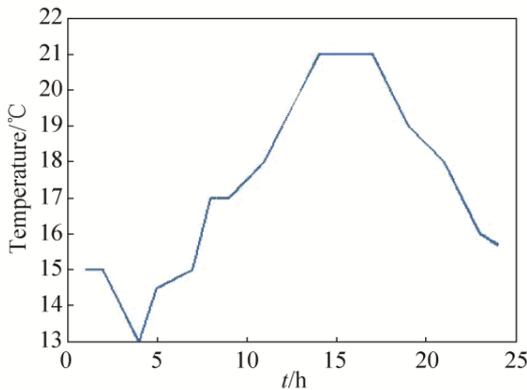


图5 某地24h温度变化
Fig. 5 24 hour temperature change in a place

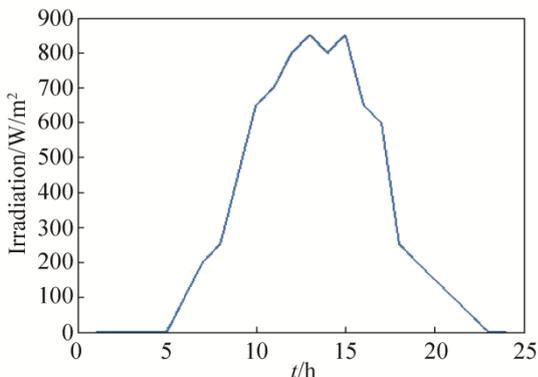


图6 某地24h光照强度变化
Fig. 6 24 hour illumination intensity change in a place

在微电网的应用过程中, 首先要确定微电网规模, 并在满足安全稳定性的前提下优先使用诸如风能、太阳能等可再生资源, 其中微型燃气轮机的花费包含了燃料花费和发电费用。设备技术参数和发电的单位花费如表4所示。

所有程序均在 MATLAB R2010 环境下运行, 运行时间为从程序开始迭代到计算出当前算法的最小费用。根据微电网调度的优先级和与电网之间的相互关联性, 动态经济调度的策略可分为孤岛运行方式和并网运行方式。

表4 微电网设备技术参数和单位花费
Tab. 4 Components parameters and unit cost of microgrid

机组设备名称	额定功率	花费(元/kWh)
微型燃气轮机	65 kW	0.35
风力发电机组	4×20 kW	0.35
光伏阵列	400×200 W	0.38
储能电池	20×5 kW	0.8

4.1 优化的目标函数

在孤岛运行方式下, 优化的目标函数为:

$$\min C_{isl} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N (C_{fue} + C_{MT}) + \sum_{i=1}^N C_{WT} + \sum_{i=1}^N C_{PV} + \sum_{i=1}^N (C_{cha} + C_{dis}) \right) \quad (22)$$

式中: T 是调度时段总数; N 是微电网中机组的个数; C_{MT} 、 C_{WT} 和 C_{PV} 分别表示各时段机组发电的花费; C_{fue} 表示微型燃气轮机在各时段的燃料费用; C_{cha} 和 C_{dis} 表示各时段储能电池充放电的费用。

在并网运行方式下, 优化的目标函数为:

$$\min C_{gri} = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N (C_{fue} + C_{MT}) + \sum_{i=1}^N C_{WT} + \sum_{i=1}^N C_{PV} + \sum_{i=1}^N (C_{buy} + C_{sel}) \right) \quad (23)$$

式中: C_{buy} 和 C_{sel} 分别表示各时段微电网从主电网处购买和销售电能的费用。 C_{buy} 为正, C_{sel} 为负。

4.2 免疫粒子群算法的求解步骤

4.2.1 求解步骤

第一步 初始化参数

$$pc = 0.9, \quad pm = 0.1, \quad aff = 1e-5, \quad DS = 10, \\ N = 50, \quad D = 100, \quad c_1 = c_2 = 2.0, \quad \omega_{max} = 0.9, \quad \omega_{min} = 0.4.$$

第二步 编码

用免疫粒子群算法解决微电网经济运行优化问题,对粒子位置的编码是其关键部分。在本文中,粒子的位置向量包含两部分。第一部分表示发电设备的序列;第二部分表示时间序列。如图 7 所示,编码 1–24 表示微型燃气轮机在 24 个小时的发电量,编码 25–48 表示风力发电机在 24 个小时的发电量,以此类推。位置向量的长度为 $\sum_{i=1}^N 24 \times N_i$ 。这个编码方法的优点是可以清楚地了解发电机组在每一时刻的出力,缺点是存储空间的复杂度比较高^[18]。

微型燃气轮机			风力发电机			光伏阵列			储能电池										
1	2	3	...	24	25	26	27	...	48	49	50	51	...	72	73	74	75	...	96

图 7 粒子的位置向量编码

Fig. 7 Coding the particle position vectors

第三步 粒子位置初始化

粒子的初始位置对计算结果有较大影响,为确保粒子较为均匀地分布在求解平面内,通过计算粒子间的亲和力,并与所设定的亲和力最大值进行比较,小于亲和力最大值的粒子得以保留,反之则废弃并生成同样数目的粒子。

第四步 免疫机制操作

(1) 交叉与变异

交叉和变异则是一种有效的信息交换的方式。对新生成的粒子进行交叉和变异操作,有助于得到更好的解。如图 8 所示,粒子中的数值表示不同机组在不同时刻的出力情况。随机选择 3 个交叉点,使子粒子 C 在这 3 个交叉点中从父粒子 P 处复制一部分基因。该操作只能在同一微源的同时刻下的不同粒子间操作。粒子的变异操作如图 9 所示,在同一机组的同时刻下不同粒子之间任意选取两个位置,然后颠倒这两个位置的顺序。

(2) 粒子亲和力评估

对粒子之间的亲和力和结合强度进行评估,亲和力和集合强度较小的粒子与粒子群混合,反之则被抛弃。

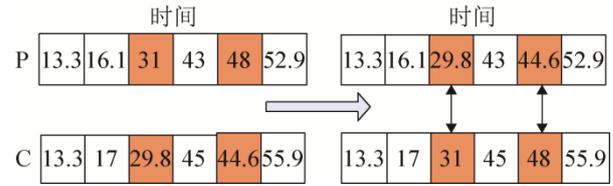


图 8 粒子的交叉操作

Fig. 8 Crossover operation of particles

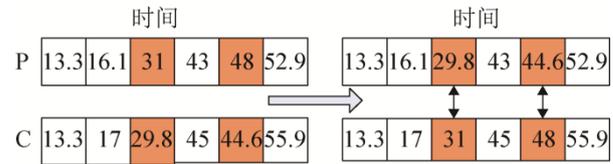


图 9 粒子的变异操作

Fig. 9 Mutation operation of particles

第五步 适应度值求取

(1) 当微电网运行在孤岛状态时,首先计算平衡功率,若输入侧大于需求侧,多余功率由蓄电池吸收,微型燃气轮机保持低功率运行,若输入侧小于需求侧,由蓄电池补足剩余功率。计算每一时刻下各发电机组的出力,通过(22)得出每一时刻的最经济费用,并将所有时刻的最经济费用相加得出当前的最佳适应度 F_pbest_i , $i=1,2,\dots,N$ 。

(2) 当微电网运行在并网状态时,首先计算平衡功率,若输入侧大于需求侧,多余的功率售卖给主电网,微型燃气轮机保持低功率运行,若输入侧小于需求侧,则通过主电网购电补足短缺的功率。计算每一时刻下各发电机组的出力、当前时刻与主电网的交换功率和交换费用,通过(23)得出每一时刻的最经济费用,并将所有时刻的最经济费用相加得出当前的最佳适应度 F_pbest_i , $i=1,2,\dots,N$ 。

第六步 最经济费用的求取

$i=i+1$, 若 $i < N$, 则返回第一步。

得出全局最佳适应度 $F_gbest = \min(F_pbest_i)$, $i=1,2,\dots,N$, 既全局最经济费用。

4.2.2 算法流程

IMPSO 算法求解微电网经济运行的流程为:

步骤 1 设置 IMPSO 算法的控制参数;

步骤 2 计算风力发电机和光伏阵列的负荷,

并对负荷需求做出预测;

步骤 3 对粒子进行编码操作并初始化粒子群 $x_{N,D}$ 的位置和速度,使其均处于约束范围内。并将 DS 个粒子分为一组,设置迭代次数 $k=0$;

步骤 4 计算粒子间的亲和力 aff_i ($i=1, 2, \dots, N$),并与所设定的亲和力进行对比。若 $aff_i < aff$,直接进入步骤 6;

步骤 5 对粒子进行交叉变异操作,生成新的粒子,并对粒子间的亲和力进行评估,强度小于设定值的予以保留,反之则抛弃;

步骤 6 计算粒子当前的局部最优解和全局最优解,其公式如下:

步骤 6.1 如果微电网运行在孤岛方式下,适应度值由式(22)得出;

步骤 6.2 如果微电网运行在并网方式下,适应度值由式(23)得出;

步骤 7 判断迭代次数 k 是否达到最大迭代次数,若是,直接进入步骤 9,若否, $k = k + 1$;

步骤 8 更新粒子当前的速度与位置,并返回步骤 4;

步骤 9 更新粒子的全局最优解与所对应的粒子位置,即单元机组的负荷,算法结束。

4.3 两种策略的仿真

策略 1: 孤岛方式

孤岛方式: 孤岛模式是指微电网与主电网独立运行,是微电网的一个重要特征。孤岛运行方式可以保证重要用户的电力需求。

在孤岛方式中,主要通过微型燃气轮机和储能电池来保证发电量与负荷需求的平衡。而储能电池的费用远高于燃气轮机的费用,所以如何在二者功率约束的条件下逐步探索到最优负荷分配则是求解此运行方式下最经济方案的关键。四种算法的迭代过程平均收敛曲线图如图 10 所示。

由图 10 可以看出, **IMPSO** 算法求解出的机组负荷分配是最经济的。其收敛速度相比其他三种算法速度更快,且收敛精度更高。而相比于 **QPSO**, **IMPSO** 达到最优值的迭代次数更小。花费的最终求解结果与算法运行时间如表 5 所示。

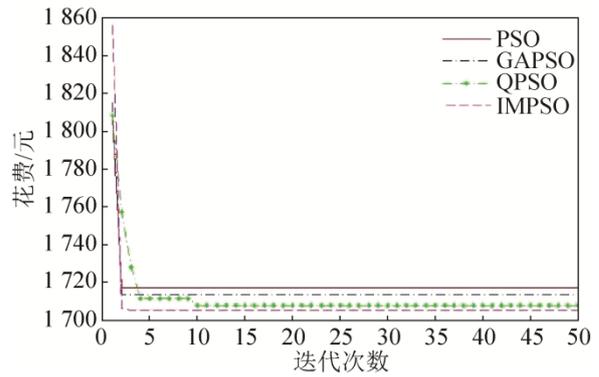


图 10 四种算法的孤岛运行方式迭代过程
Fig. 10 Iterative process of island operation mode for four algorithms

表 5 四种算法孤岛运行方式花费与时间对比
Tab. 5 Cost and time of four algorithms comparison for island operation mode

算法	PSO	GAPSO	QPSO	IMPSO
花费/元	1716.7	1713.1	1707.7	1705.0
迭代时长/s	2.5044	2.5807	2.4925	2.5121

其中总负荷与各发电单元的负荷如图 11 所示。

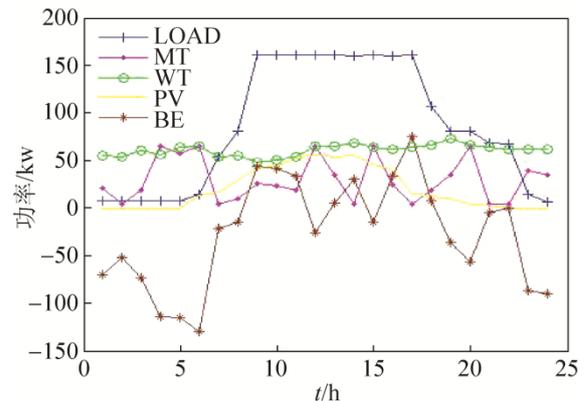


图 11 孤岛运行方式总负荷与各发电单元负荷
Fig. 11 Total and each unit loads of the island operation mode

策略 2: 并网方式

并网方式: 并网运行方式是指将微电网与大电网通过 PCC 点相连,与主电网进行功率交换。当微电网负荷小于发电能力时,从大电网中吸收电能,并支付相关费用;反之,则售电给电网,获得相应的费用。这样可以利用市场规律来控制微电网的运行,以此获取更大的经济效益。

其中,电能交换的分时段价格如图 12 所示。

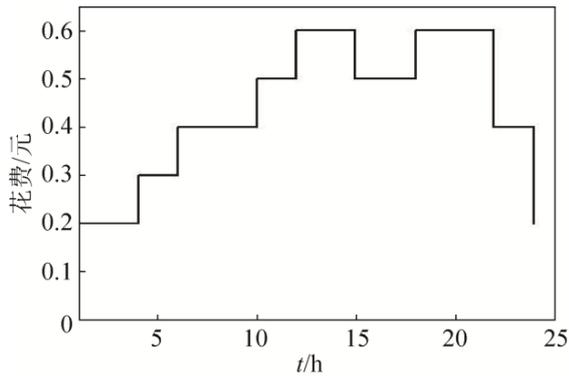


图 12 并网方式下微电网与主电网功率交换花费
Fig. 12 Cost of power changed between the microgrid and main grid in the grid-connected operation mode

在并网方式中, 主要通过微型燃气轮机和微电网与主电网间的功率交换来保证发电量与负荷需求的平衡。由于微电网与主电网间的功率交换费用在不同时段内所产生的经济效益不同, 所以如何在不同时段内平衡微型燃气轮机和微电网与主电网交换的功率则是求解此运行方式下的关键。四种算法的迭代过程平均收敛曲线图如图 13 所示。

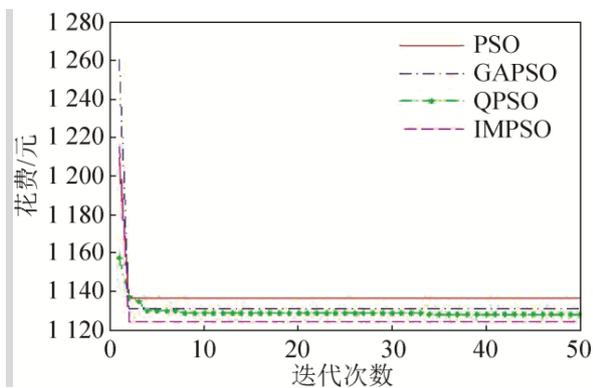


图 13 四种算法的并网运行方式迭代过程
Fig. 13 Iterative process of grid-connected operation mode for four algorithms

从图 13 可以看出, IMPSO 算法获得的最优经济成本是最低的。其收敛速度慢于 GAPSO, 而快于 PSO 和 QPSO, 这正是免疫机制中亲和力所产生的作用。通孤岛运行方式一样, IMPSO 达到最优值的迭代次数比 QPSO 更小。花费的最终求解结果与算法运行时间如表 6 所示。

总负荷与各发电单元的负荷如图 14 所示。

表 6 四种算法并网运行方式花费与时间对比
Tab. 6 Cost and time of four algorithms comparison for grid-connected operation mode

算法	PSO	GAPSO	QPSO	IMPSO
花费/元	1137.1	1131.2	1128.3	1124.4
迭代时长/s	2.9039	2.9442	2.7709	2.9375

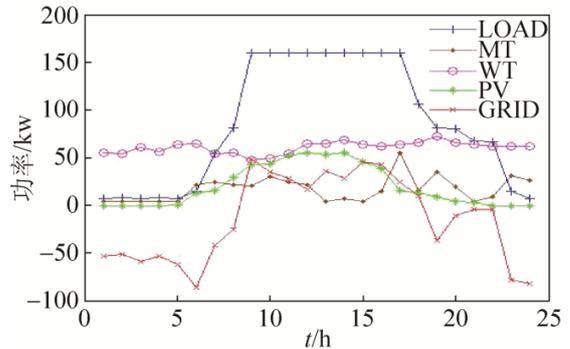


图 14 并网运行方式总负荷与各发电单元负荷
Fig. 14 Total and each unit loads of the grid-connected operation mode

5 结论

文中讨论了免疫粒子群算法的原理和其在动态微电网经济运行优化问题的应用。通过建立包含微型燃气轮机、风力发电、光伏阵列以及储能电池的微电网模型, 将该模型分为孤岛模式和并网模式两种运行策略分别讨论, 得出了每个单元最佳运行的负荷以及总体经济最优时的花费, 通过与其它三种改进粒子群算法对比, 充分证明了所提算法的可行性和先进性。免疫粒子群算法为研究微电网经济运行优化问题提供了一种新的解决方法。

然而, 在实际情况下对微电网的经济优化往往需要强调算法的实时性, 在复杂情况下很难对微电网建立精确的模型, 所以通过在数据驱动下对微电网功率的预测就成为了将来研究的一个课题。

参考文献:

- [1] Huang D Z, Gong R X, Gong S. Constrained multi-objective optimization for microgrid based on non-dominated immune algorithm[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (S1931-4973), 2015, 10(4): 376-382.
- [2] Bhuiyan F A, Yazdani A, Primak S L. Optimal sizing approach for islanded microgrids[J]. Renewable Power

- Generation, IET (S1752-1416), 2015, 2(9): 166-175.
- [3] Jayabarathi T, Jayaprakash K, Jeyakumar D N, et al. Evolutionary programming techniques for different kinds of economic dispatch problems[J]. Electric Power Systems Research (S0378-7796), 2005, 73(2): 169-176.
- [4] Dubey H M, Pandit M, Panigrahi B K. A biologically inspired modified flower pollination algorithm for solving economic dispatch problems in modern power systems[J]. Cognitive Computation (S1866-9956), 2015, 5(7): 594-608.
- [5] Akorede M F, Hizam H, Aris I, et al. Ab Kadir. Effective method for optimal allocation of distributed generation units in meshed electric power systems[J]. Generation, Transmission and Distribution, IET (S1751- 8687), 2010, 5(2): 276-287.
- [6] Lin W M, Cheng F S, Tsay M T. An improved tabu search for economic dispatch with multiple minima[J]. IEEE Trans. on Power Systems (S0885-8950), 2002, 17(1): 108-112.
- [7] Gu W, Wu Z, Rui B, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating, and power microgrid: a review[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems (S0142-0615), 2014, 54: 26-37.
- [8] Wu H B, Liu X Y, Ding M. Dynamic economic dispatch of a microgrid: Mathematical models and solution algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems (S0124-0615), 2014, 63: 336-346.
- [9] Obara S, El-Sayed A G. Compound microgrid installation operation planning of a PEFC and photovoltaics with prediction of electricity production using GA and numerical weather information[J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2009, 19(34): 8213-8222.
- [10] Mahapatra P K, Ganguli S, Kumar A. Hybrid particle swarm optimization and artificial immune system algorithm for image enhancement[J]. Methodologies and Application (S1432-7643), 2015, 19(8): 2101-2109.
- [11] Kuo R J, Chen C M, Liao T W, et al. Hybrid of artificial immune system and particle swarm optimization-based support vector machine for Radio Frequency Identification-based positioning system[J]. Computers and Industrial Engineering (S0360-8352), 2013, 1(64): 333-341.
- [12] Mahapatra P K, Sethi S, Kumar A. Comparison of artificial immune system and particle swarm optimization techniques for error optimization of machine vision based tool movements[J]. Journal of the Institution of Engineers (S2250-0545), 2015, 4(96): 363-372.
- [13] Ouyang P R, Pano V. Comparative study of DE, PSO and GA for position domain PID controller tuning[J]. Algorithms (S1999-4893), 2015, 3(8): 697-711.
- [14] 孔飞, 吴定会. 一种改进的鸡群算法[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2015, 14(6): 681-688.
Kong F, Wu D H. An improved chicken swarm optimization algorithm[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2015, 14(6): 681-688.
- [15] 张明, 田娜, 纪志成. 基于适应值欧式距离比的均衡蜂群算法[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(5): 980-989.
Zhang M, Tian N, Ji Z C. Balanced bee colony algorithm based on fitness euclidean-distance ratio[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 980-989.
- [16] 李旭芳, 王士同. 一种自适应粒子群算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 2582-2585.
Li X F, Wang S T. Landscape adaptive particle swarm optimizer[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(5): 2582-2585.
- [17] 彭晓波, 桂卫华, 黄志武, 等. GAPSO:一种高效的遗传粒子混合算法及其应用[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 5025-5031.
Peng X B, Gui W H, Huang Z W, et al. GAPSO: Effective genetic particle swarm algorithm and its application[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(18): 5025-5031.
- [18] 田娜, 纪志成. 改进量子粒子群求解多目标柔性作业车间调度[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 2950-2957.
Tian N, Ji Z C. Improved quantum-behaved particle swarm optimization for solving multi-objective flexible job-shop scheduling problems[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 2950-2957.
- [19] S Siva Sathya, M V Radhika. Convergence of nomadic genetic algorithm on benchmark mathematical functions [J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2013, 5(13): 2759- 2766.
- [20] F A Mohamed, H N Koivo. System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search[J]. Electrical Power and Energy Systems (S0142-0615), 2010, 32(5): 398-407.