

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.03.007

改进的花朵授粉算法在微网优化调度中的应用

王生生¹, 杜鹏¹, 董如意¹, 李永贺²

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130012; 2. 陆军炮兵防空兵学院, 辽宁 沈阳 100867)

摘要: 研究了用于解决微网优化调度问题的群智能算法. 针对微网优化调度问题的多目标、多约束条件等特点, 对微网优化调度问题建模; 提出了改进的花朵授粉算法, 并将其应用到微网优化调度问题. 在初始化时, 采用对立点方法增加种群多样性和优化搜索空间; 局部更新时, 使用一种新的局部更新算子提高算法收敛速度; 此外, 为了减少计算量和避免陷入局部最优, 定义了是否使用遗传操作的判断条件. 仿真结果表明, 该算法性能优于原始花朵授粉算法和遗传算法等其他算法.

关键词: 微网; 优化调度; 群智能; 花朵授粉算法; 多目标

中图分类号: TP 319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)03-0334-05

Modified Flower Pollination Algorithm and Applications on Optimization Dispatch of Microgrid

WANG Sheng-sheng¹, DU Peng¹, DONG Ru-yi¹, LI Yong-he²

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. College of Army Artillery and Air Defense Crops, Shenyang 100867, China. Corresponding author: DU Peng, E-mail: 1584055676@qq.com)

Abstract: The swarm intelligence algorithm for solving the problem of optimization dispatch of microgrid was investigated. A model for optimization dispatch of microgrid was established under the consideration of the process characteristics, such as multi-objective and multi-constraints. A modified flower pollination algorithm (MFPA) was proposed and applied to the optimization dispatch of microgrid. During initialization, opposition method was utilized to improve the diversity of the population as well as fully explore the space. During local updating, the new operation can accelerate the convergence. In addition, the condition for using genetic operations was defined in order to reduce the calculation and avoid the local optimal solution. Simulation results demonstrated that the performance of MFPA was better than those of FPA, GA and several other algorithms.

Key words: microgrid; optimization dispatch; swarm intelligence; flower pollination algorithm (FPA); multi-objective

微网是由多种分布式电源构成的微电网, 是解决传统电网存在的远距离传输损耗大, 能源使用效率低, 环境污染等问题的有效途径. 微网优化调度是电力系统的一类重要问题^[1]. 其特点是多目标、多约束条件、非线性化, 所以传统数学优化方法难以满足其要求^[2]. 由于群智能算法有不依赖于求解问题本身数学性质的优点^[3], 所以此类算法作为微网系统的优化工具得到了广泛地使用^[4-5]. 但寻找更适合解决微网优化调度问题的

算法仍是研究难点之一.

受自然界中显花植物花朵授粉过程的启发, 2012年 Yang 提出了花朵授粉算法 (flower pollination algorithm, FPA)^[6]. FPA 提出后, 在相关领域得到了广泛的应用^[7-8].

实验发现 FPA 相比其他群智能算法更适合解决微网优化调度问题. 然而 FPA 在解决高维问题时, 存在寻优精度低, 容易陷入局部最优等缺点. 本文在初始化和搜索阶段对 FPA 进行改进;

此外,又增加了对遗传操作时机的判断,提出改进的花朵授粉算法(MFPA).实验表明,MFPA比FPA拥有更高的全局搜索能力和更快的收敛速度.将MFPA应用于微网优化调度问题,对算例的测试验证了MFPA的寻优能力和收敛速度均优于FPA和几种其他群智能算法.

1 改进的花朵授粉算法

FPA所解决的优化问题一般形式如下:

$$\begin{aligned} & \min f(x), x \in \mathbf{R}^n. \\ \text{s. t. } & \begin{cases} h_i(x) = 0, (i=1, 2, \dots, M); \\ g_j(x) \leq 0, (j=1, 2, \dots, N). \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: x 为 n 维变量; $f(x)$ 是目标函数; $h_i(x) = 0$ 和 $g_j(x) \leq 0$ 为约束条件.针对FPA的缺点,从三个方面对其改进.

1.1 对立点初始化

相关学者证明了对立点搜索的有效性^[9]. X_i 的对立点定义为

$$\bar{X}_i = U + L - X_i. \quad (2)$$

式中 L 和 U 分别是搜索变量的上下界.不失一般性,本文采用的方法也是将对立点与原点进行比较,保留较优的作为初始点,即

$$X_i = \begin{cases} X_i, & \text{fit}(\bar{X}_i) > \text{fit}(X_i); \\ \bar{X}_i, & \text{fit}(\bar{X}_i) < \text{fit}(X_i). \end{cases} \quad (3)$$

其中 fit 是适应度函数,一般定义为目标函数.

1.2 “按需采纳”局部更新

FPA的局部搜索是按式(4)进行的,

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \varepsilon(X_j^t - X_k^t). \quad (4)$$

其中: ε 是在 $[0, 1]$ 服从均匀分布的随机数; X_j^t 和 X_k^t 是随机选取的两个候选解,参照二者的位置对 X_i^t 产生扰动,目的是防止过早收敛.但这样随机的扰动是盲目的,因此本文采用了在一定程度上参照全局最优的方法,将之命名为“按需采纳”.

定义1 个体与最优个体距离差值:

$$d = \sqrt{\sum_{k=1}^D (x_{ik}^t - x_{gk}^t)^2}. \quad (5)$$

其中: x_{ik}^t 和 x_{gk}^t 分别是第 t 次迭代当前个体和最优个体的第 k 维分量; D 是花粉的维数; d 衡量了当前个体和全局最优个体的一种相近程度.改进的局部搜索公式为

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \varepsilon(X_j^t - X_k^t) + \frac{1}{d} \times (g^* - X_i^t). \quad (6)$$

这可以使个体按照自身搜索状况参照最优个体,当 d 越小, $1/d$ 越大,使某一花粉越接近全局

最优时产生的波动越大,不至于过早收敛.另一方面,当 d 越大, $1/d$ 越小,使个体慢速地向全局最优运动时,既能保证进化方向又能够防止过早收敛.

1.3 “趋同值”触发的交叉变异

多数的群智能算法在生成新解之后就进行交叉、变异,其缺点是过于盲目而带来不必要的计算量.本文引入“趋同值”作为判断是否需要种群进行交叉、变异的依据.

定义2 个体“位置趋同值”:

$$D^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i^t - \mu^t)^2. \quad (7)$$

其中:第 t 次迭代个体 i 在搜索空间中的位置为 X_i^t ; μ^t 是第 t 次迭代所有个体位置的均值,定义为

$$\mu^t = \frac{1}{N} (X_1^t + X_2^t + \dots + X_N^t). \quad (8)$$

定义3 个体“适应度趋同值”:

$$D_{\text{fit}}^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{fit}(X_i^t) - \mu_{\text{fit}}^t)^2. \quad (9)$$

其中: $\text{fit}(X_i^t)$ 为第 t 次迭代个体 i 的适应度; μ_{fit}^t 是第 t 次迭代所有个体适应度的平均值,定义为

$$\mu_{\text{fit}}^t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{fit}(X_i^t)). \quad (10)$$

“位置趋同值”反映种群个体在搜索空间中的位置是否发生聚集,并且给出了聚集程度的定量描述.“适应度趋同值”反映在特定问题下,个体的适应度是否趋向于同一个值以及这种趋向性的强弱.本文采用随机加权方法,综合使用二者衡量种群个体分布情况.设随机数 $\tau \in (0, 1)$,则 $(1 - \tau) \in (0, 1)$,设“综合趋同值”为 D^S ,定义如下:

$$D^S = \tau \times D^t + (1 - \tau) \times D_{\text{fit}}^t. \quad (11)$$

若数次迭代过程中 D^S 都呈递减趋势,说明个体分布趋向集中,此时采用交叉、变异遗传算子扰动个体,增加种群多样性,避免陷入局部最优.

2 微网优化调度问题的数学模型

2.1 微网的组成

微网有两种运行模式:一种是孤立模式^[10],另外一种是联网模式^[11].本文讨论的是在联网模式下只考虑微网从大电网购电的情况.

本文所优化的微网系统由光伏阵列(PV)、风力涡轮机(WT)、蓄电池(BT)、微燃机(MT)和燃料电池(FC)组成.由于太阳能和风能发电的间断性和不稳定性,所以把蓄电池与它们联合使

用,以确保满足负载用电需求和减少化学能源使用.

2.2 目标函数

微网优化调度是一个多目标优化问题,本文提出的目标函数综合考虑经济成本、环境效益、健康影响等多个指标.采用线性加权法将多目标问题转化为单目标问题.其优化目标函数为

$$\mathbf{C}_{\text{total}} = \mathbf{C}^T \times \mathbf{W}. \quad (12)$$

其中: $\mathbf{C}_{\text{total}}$ 为微网日调度的总费用; \mathbf{C} 是由 C_{MG} (自身经济成本), C_{buy} (购电成本), C_{envi} (环境效益成本)以及 C_{heal} (健康成本)组成的向量; \mathbf{W} 是由权重所构成的向量, $\mathbf{W} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4]^T$. \mathbf{C} 中各项成本的表达式如下:

$$C_{\text{MG}} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_{\text{MG}}(i)}{e(i)} \times K_{\text{run}} + P_{\text{MG}}(i) \times K_{\text{ope}} \right); \quad (13)$$

$$C_{\text{buy}} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^n [P_{\text{buy}} \times K_{\text{buy}}]; \quad (14)$$

$$C_{\text{envi}} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m E_{\text{pollu}}(j) \times \frac{P_{\text{MG}}(i)}{e(i)} \times C_{\text{pollu}}(j); \quad (15)$$

$$C_{\text{heal}} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^n E_{\text{PM2.5}} \times \frac{P_{\text{MG}}(i)}{e(i)} \times C_{\text{PM2.5}}. \quad (16)$$

其中: $P_{\text{MG}}(i)$ 和 $e(i)$ 分别是第 i 个微源的功率和效率; K_{run} 是成本价格; K_{ope} 是运行维护价格; P_{buy} 和 K_{buy} 分别是购电量和电价; $E_{\text{pollu}}(j)$ 和 $C_{\text{pollu}}(j)$ 分别是第 j 种污染物的排放量和惩罚价格; m 是污染物的种类; $E_{\text{PM2.5}}$ 和 $C_{\text{PM2.5}}$ 分别是 PM2.5 的排放量和惩罚价格.

2.3 约束条件

微网优化调度问题是一类约束满足问题,有运行电压约束、容量约束、传输约束、旋转备用约

束等.本文所提出的调度模型中也考虑了这些约束,如式(17)~式(19)分别是容量约束、平衡约束、交换约束.

$$P_{\text{min}} < P_i < P_{\text{max}}, \quad (17)$$

$$P_{\text{load}} = \sum P_i + P_{\text{buy}}, \quad (18)$$

$$P_l < P_{\text{buy}} < P_u. \quad (19)$$

式中: P_i 是第 i 个微源的功率; P_{min} 和 P_{max} 分别是功率上下限; P_{load} 是负载功率; P_l 和 P_u 分别是交换功率的最小值与最大值.

令 $\mathbf{P} = [P_{\text{PV}}, P_{\text{WT}}, P_{\text{FC}}, P_{\text{MT}}, P_{\text{BT}}, P_{\text{buy}}]$,则微网优化调度问题具有如下形式:

$$\begin{aligned} \min C(\mathbf{P}) &= \mathbf{C}_{\text{total}}^T \mathbf{W}. \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum P_i = P_{\text{load}}, \\ \mathbf{P} < P_{\text{max}}, \\ -\mathbf{P} > P_{\text{min}}. \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

3 算例与实验分析

根据本文所提出的优化模型、目标函数以及优化算法,在 CPU 为 3.0 GHz、4 GB 内存、Windows 7 的计算机上采用 Matlab 2010 进行仿真,得出各个微源的最优调度方案以及微网从主网购电的方案.实验所涉及的主要数据综合参照了相关领域的文献^[12-15].

在解决微网优化调度问题之前,首先对高维函数进行测试,分别测试了遗传算法(GA)^[16]、萤火虫算法(FA)^[17]、蝙蝠算法(BA)^[18]、花朵授粉算法(FPA)^[6]和改进的花朵授粉算法(MFPA).表1表明MFPA的平均优化结果明显好于FPA等算法;测试结果说明MFPA对解决高维优化问题有一定优势.

表 1 高维测试函数优化结果

Table 1 Optimization results of higher-dimensions benchmark function

算法	Rosenbrock ($d=16$)			De Jong ($d=256$)			Schwefel ($d=128$)			Ackley ($d=128$)		
	理论值;0	理论值;0	理论值;0	理论值;0	理论值;0	理论值;0	理论值;-418.9829	理论值;0	理论值;0	理论值;0	理论值;0	
	最优值	标准差	运行时间/s	最优值	标准差	运行时间/s	最优值	标准差	运行时间/s	最优值	标准差	运行时间/s
GA	0.0083	3.5942	3.46	0.0379	0.7796	8.97	-372.6583	1.6871	7.06	0.0795	4.6189	6.79
FA	0	2.3604	2.79	0.0041	0.5182	3.65	-406.7352	0.9931	5.35	0.0138	1.0939	4.73
BA	0	1.9377	1.84	0.0054	0.5046	3.47	-408.5581	0.5429	4.71	0.0152	1.2003	4.42
FPA	0	1.7562	1.55	0.00074	0.0427	1.43	-409.1806	0.5469	2.64	0.0099	0.6294	3.42
MFPA	0	1.2703	1.31	0.00002	0.0293	1.26	-416.5371	0.4406	2.27	0.00024	0.4377	3.16

将 MFPA 应用到微网优化调度问题上得到如图 1 所示的各微源最优调度.由图 1 可知,PV, WT,FC 和 MT 在用电高峰期出力较大以满足用

户负载(242 kW)需求;BT 在用电高峰期放电,低谷期充电,起到了削峰填谷的作用;Buy 的走向说明微网在电价高的峰时段(11~15h,17~19h)购

电量少, 电价低的谷时段购电量大, 满足经济性要求.

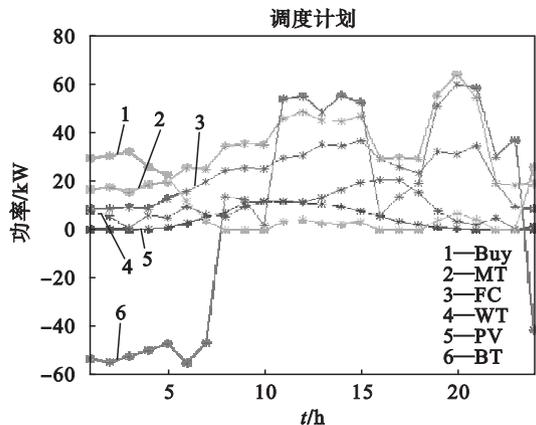


图 1 微网最优调度结果

Fig. 1 Best result of microgrid dispatch

图 2 体现了 5 种算法的运行效果, 可知当迭代次数较少时 FPA 和 MFPA 的效果相差不多, 随着迭代次数增加 MFPA 的收敛性要优于 FPA 和 GA 等其他算法, 并且 MFPA 得到的最优值要优于其他算法. 可见 MFPA 能够获得更优的结果和更快的收敛性.

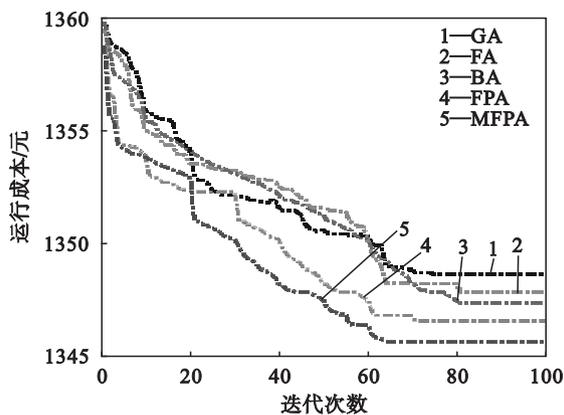


图 2 5 种算法迭代过程

Fig. 2 Iteration process of the five algorithms

表 2 5 种算法运行结果比较

算法	最小值	平均值
GA	1 348. 61	1 352. 13
FA	1 347. 86	1 351. 82
BA	1 347. 34	1 351. 57
FPA	1 346. 52	1 349. 36
MFPA	1 345. 63	1 347. 84

表 2 为算法 GA, FA, BA, FPA, MFPA 的 100 次运行所产生的最小值和平均值. 从运行结果可以得出结论: MFPA 的寻优能力和搜索精度要优

于 FPA 和其他算法, 改善了原始算法的迭代效率.

4 结 语

对微网优化调度问题建模, 针对花朵授粉算法存在的问题, 提出了改进的花朵授粉算法并将其应用到微网优化调度问题上. 通过对高维度测试函数的测试, 验证了算法性能优于原始算法. 通过算例实验, 验证了改进的花朵授粉算法能够较好地解决微网优化调度问题, 提高了算法的性能.

参考文献:

- [1] Wu Z, Tazvinga H, Xia X. Demand side management of photovoltaic-battery hybrid system [J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 294 – 304.
- [2] 李鹏, 徐伟娜, 周泽远, 等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34 (19): 3073 – 3079.
(Li Peng, Xu Wei-na, Zhou Ze-yuan, et al. Optimal operation of microgrid based on improved gravitational search algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34 (19): 3073 – 3079.)
- [3] Othman M M, El-khattam W, Hegazy Y G, et al. Optimal placement and sizing of voltage controlled distributed generators in unbalanced distribution networks using supervised firefly algorithm [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 82: 105 – 113.
- [4] Tharakeshwar T K, Seetharamu K N, Prasad B D. Multi-objective optimization using bat algorithm for shell and tube heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1029 – 1038.
- [5] Reddy S S, Rathnam C S. Optimal power flow using glowworm swarm optimization [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 80: 128 – 139.
- [6] Yang X S. Flower pollination algorithm for global optimization [C] // *International Conference on Unconventional Computation and Natural Computation*. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 240 – 249.
- [7] Dubey H M, Pandit M, Panigrahi B K. A biologically inspired modified pollination algorithm for solving economic dispatch problems in modern power systems [J]. *Cognitive Computation*, 2015, 7 (5): 1 – 15.
- [8] Abdelaziz A Y, Ali E S, Elazim S M A. Implementation of flower pollination algorithm for solving economic load dispatch and combined economic emission dispatch problems in power systems [J]. *Energy*, 2016, 101: 506 – 518.
- [9] Rahnamayan S, Tizhoosh H R, Salama M M A. Opposition versus randomness in soft computing techniques [J]. *Applied Soft Computing*, 2008, 8 (2): 906 – 918.
- [10] Abedini M, Moradi M H, Hosseini S M, et al. Optimal management of microgrids including renewable energy sources using GPSO-GM algorithm [J]. *Renewable Energy*, 2016, 90: 430 – 439.
- [11] Malysz P, Sirospour S, Emadi A. An optimal energy storage control strategy for grid-connected microgrids [J]. *IEEE*

Transactions on Smart Grid,2014,5(5):1785-1796.

- [12] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析 [J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
(Qian Ke-jun, Yuan Yue, Shi Xiao-dan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation [J]. *Proceedings of the CSEE*,2008,28(29):11-15.)
- [13] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-14.
(Ding Ming, Zhang Ying-yuan, Mao Mei-qin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage [J]. *Proceedings of the CSEE*,2011,31(4):7-14.)
- [14] 陈洁,杨秀,朱兰,等. 微网多目标经济调度优化 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
(Chen Jie, Yang Xiu, Zhu Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization [J]. *Proceedings of the CSEE*,2013,33(19):57-66.)
- [15] 毛晓明,陈深,吴杰康,等. 分时电价机制下含蓄电池微网的优化调度 [J]. 电网技术,2015,39(5):1192-1197.
(Mao Xiao-ming, Chen Shen, Wu Jie-kang, et al. Optimal dispatching of microgrid containing battery under time-of-use price mechanism [J]. *Power System Technology*,2015,39(5):1192-1197.)
- [16] Holland J. Adaptation in natural and artificial systems [J]. *The Quarterly Review of Biology*,1975,6(2):126-137.
- [17] Yang X S. Firefly algorithms for multimodal optimization [C]//Proceeding of the 5th International Symposium on Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. Berlin: Springer-Verlag,2009:169-178.
- [18] Gandomi A H, Yang X S, Alavi A H, et al. Bat algorithm for constrained optimization tasks [J]. *Neural Computing and Applications*,2013,22(6):1239-1255.

(上接第 319 页)

- [4] Candes E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*,2008,25(2):21-30.
- [5] Al-Haj A. Combined DWT-DCT digital image watermarking [J]. *Journal of Computer Science*,2007,3(9):740-746.
- [6] Johansson E M, Mast J E. Three-dimensional ground-penetrating radar imaging using synthetic aperture time-domain focusing [C]//Spies International Symposium on Optics. San Diego,1994:205-214.
- [7] 屈乐乐,方广有,杨天虹. 压缩感知理论在频率步进探地雷达偏移成像中的应用 [J]. 电子与信息学报,2011,33(1):21-26.
(Qu Le-le, Fang Guang-you, Yang Tian-hong. The application of compressed sensing to stepped-frequency ground penetrating radar migration imaging [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*,2011,33(1):21-26.)
- [8] 刘福来,彭沪,汪晋宽,等. 基于加权 L_1 范数的 CS-DOA 算法 [J]. 东北大学学报(自然科学版),2013,34(5):655-657.
(Liu Fu-lai, Peng Lu, Wang Jin-kuan, et al. CS-DOA algorithm based on weighted L_1 norm [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2013,34(5):655-657.)
- [9] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization [M]. Oxford: Cambridge University Press,2004.