

基于 PSO-BBO 混合优化算法的动态经济调度问题

陈 珍, 胡志坚

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 动态经济调度(Dynamic Economic Dispatch, DED)问题是电力系统运行与控制领域比较经典的多变量、非线性、强约束优化问题。为解决该问题,提出了将粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)和基本生物地理学优化算法(Biogeography-Based Optimization, BBO)相结合的改进生物地理学优化算法,并将该改进方法应用于一天24时段10机39节点标准算例。在考虑网损与不考虑网损两种情况下分别进行仿真分析,并将仿真结果与PSO和基本BBO算法以及参考文献中提出的六种智能算法进行对比,验证了该改进算法的有效性及其在寻优能力上的提高。

关键词: 动态经济调度; 生物地理学优化算法; PSO-BBO混合优化算法; 阀点效应; 约束处理

A modified hybrid PSO-BBO algorithm for dynamic economic dispatch

CHEN Zhen, HU Zhi-jian

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Dynamic economic dispatch (DED) problem is the classic multivariable, nonlinear, strong constrained optimization problem in the area of power system operation and control. To solve this problem, a hybrid Particle Swarm Optimization (PSO) and biogeography-based optimization (BBO) new algorithm is proposed. And the improved method is applied in 10 unit systems for a period of 24 hours. The simulation is done in the two cases with and without considering the net loss, and the simulation results are compared with the results of particle swarm optimization algorithm and the biogeography-based optimization algorithm and the results of other six intelligent algorithms' referred in the literatures, which verify the validity and the improvement in the capability of finding the best of the improved algorithm.

This work is supported by University Special Research Fund of the Doctoral Program (No. 20110141110032) and State Key Laboratory of Electrical Insulation of Power Equipment of Xi'an Jiaotong University (No. EIPE13205).

Key words: dynamic economic dispatch; biogeography-based optimization; PSO-BBO hybrid optimization algorithm; valve point effect; constraint handling

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0044-06

0 引言

电力系统动态经济调度(DED)^[1-3]是电力系统日运行计划中的重要环节,它在调度时段内根据预测负荷需求量决定上网机组的出力,使得在满足众约束条件的前提下达到总的燃料费用最小的目的^[4]。与传统经济调度(Economic Dispatch, ED)^[5-6]不同的是,DED还将把时段间的爬坡速率约束考虑在内,使得调度策略的制作更具有挑战性。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110141110032);西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室资助项目(EIPE13205)

目前,遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[7-9]、进化算法(Evolutionary Program, EP)^[10-12]、粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[13-14]等各种智能算法因其强大的寻优能力而纷纷被应用于DED问题^[15-17]的解决当中。而生物地理学算法(BBO)是2008年由Simon D提出的又一个强大的优化新算法^[18],生物地理学是研究生物地理分布的学科,Simon因从大自然中学习而激发灵感——应用生物地理学来优化实际科研问题。生物地理学是大自然分布物种的方式,类似于一般性问题的解决方法。假设我们提出了一个问题(可以在生活中的任何区域,例如工程设计,经济学,医学,商业,城市规划等)和一些候选解决方案,一个很好的解决方案

类似于具有高适宜度指数的一个岛, 较差的解决方案代表适宜度指数低的一个岛屿。适宜度指数高的解决方案与适宜度指数低的解决方案相比更易抗拒变革, 而且往往有着自己的特点, 所以适宜度指数低的解决方案会从适宜度指数高的解决方案学习这些信息从而改善自身的适宜度指数。这种解决问题的新方法被称为生物地理学算法(BBO)。BBO 算法一经提出得到了国内外研究者的广泛关注, 并在电力系统和函数优化方面得到应用。

BBO 算法虽在迭代初期因迁移操作的高效性收敛快速, 而在迭代后期由于变异操作的概率较小使得各栖息地的适宜度指数趋于不变, 导致算法的全局寻优能力较差, 而容易陷入局部最优。为克服这一缺点, 文献[19]将差分变异算法与生物地理学算法结合, 将其应用于经济负荷调度(Economic Load Dispatch, ELD)问题的求解中得到了良好的效果, 且明显优于基本 BBO 算法的求解效果, 文献[20]将差分进化算法与生物地理学算法融合, 将其应用于最优潮流问题的求解, 并证明了该混合算法是切实有效的。这样通过两种算法的融合互补, 可以有效改善基本 BBO 算法变异能力差的现象, 减小了陷入局部最优的可能性从而增强了算法的全局寻优能力。但是, DE-BBO 在寻优效率上仍然存在一些问题, 它过多地注重了个体的多样性而忽视了寻优效率的提高, 同时 DE-BBO 算法在运行时间上比本文提出的 PSO-BBO 算法要长得多。

本文将使用粒子群优化算法(PSO)与 BBO 算法进行融合, 将 PSO 算法中粒子更新策略这一核心部分替代基本 BBO 算法在迁移过程中的寻优策略, 从而进一步提高算法的寻优效率。

1 动态经济调度模型

1.1 目标函数

解决 DED 问题的主要目标是使电力系统在满足各种约束的条件下达到总体的煤耗费用最小。目标函数式可以表达如式 (1)。

$$F = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(P_{i,t}) \quad (1)$$

式中: F 是总调度周期内的煤耗费用; T 是总调度周期内时间间隔数; N 是发电机组数; $P_{i,t}$ 是 t 时段发电机组 i 的出力; $f_i(P_{i,t})$ 是机组 i 在出力为 $P_{i,t}$ 时的煤耗费用。

机组的燃料费用通常描述为机组有功出力的二次函数形式, 如式 (2)。

$$f_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2)$$

其中, a_i , b_i 和 c_i 为发电机组 i 的煤耗参数。

考虑阀点效应的机组燃料费用表达式为

$$f_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \times \sin(h_i \times (P_{i,\min} - P_i))| \quad (3)$$

其中, e_i 和 h_i 是发电机组 i 的煤耗参数。

1.2 约束条件

(1) 电量平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = P_{\text{load},t} + P_{\text{loss},t} \quad (4)$$

其中, $P_{\text{load},t}$ 和 $P_{\text{loss},t}$ 分别是总的负荷需求和网损。

$P_{\text{loss},t}$ 精确值可通过系统潮流方程求出, 但本文为了简便, 采用 Kron's 网损公式计算近似值:

$$P_{\text{loss},t} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{i,t} B_{ij} P_{j,t} + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_{i,t} + B_{00} \quad (5)$$

式中, B_{ij} , B_{i0} 和 B_{00} 为计算网损的 B 参数矩阵。

这里的第二项和第三项的值相对较小, 为了简便本文中直接忽略不计, B_{ij} 的值可以从文献[21]中得到。

(2) 机组有功出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad i=1,2,\dots,N, \quad t=1,2,\dots,T \quad (6)$$

式中, $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别是机组 i 的有功出力上下限值。

(3) 机组有功出力爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq UR_i, & P_{i,t} > P_{i,t-1} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq DR_i, & P_{i,t} < P_{i,t-1} \end{cases} \quad (7)$$

$$i=1,2,\dots,N, \quad t=1,2,\dots,T$$

式中, UR_i 和 DR_i 为发电机组 i 相邻时段间出力的最大升降值。

2 BBO 算法基本思想

BBO 算法的基本思想是通过栖息地中的物种迁移(migration)和突变(mutation)的信息交换机制来寻求全局最优解。在一个区域内, 如果一个栖息地非常适合生存, 那么该栖息地具有较高的适宜度指数(Habitat Suitability Index, HSI), 与 HSI 有关的特征变量形成一个描述栖息地 HSI 的适应性索引, 被

定义为适宜度指数变量(Suitability Index Variables, SIV)。DED 问题中, 各发电机的有功出力 $P'_{i,j}$ ($P'_{i,j}$ 为在时段 t 第 i 个栖息地第 j 台机组对应的有功出力) 被看作栖息地的适宜度指数变量 (SIV), 各发电机 24 时段的总煤耗费用 $\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N f_j(P'_{ibest,j})$ ($ibest$ 对应适宜度指数最高的栖息地) 则被看作栖息地的适宜度指数 (HSI), 变量的上下限构成了搜索空间, 在搜索空间中随机初始化 m 组向量作为初始适宜度指数变量。

算法通过栖息地中的物种迁移和突变操作实现 HSI 较低的栖息地与 HSI 较高的栖息地之间的信息共享, 从而提高总体的栖息地适应度水平, 寻求最优解。

图 1 给出了简易的物种迁移模型, 图中横坐标表示栖息地的物种数目, λ 和 μ 分别是栖息地的物种迁入率和迁出率, I 和 E 分别是最大迁入率和最大迁出率, I 和 E 可以不相等。

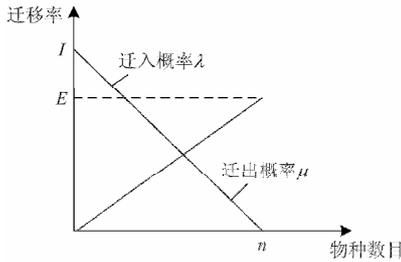


图 1 线性迁移模型

Fig. 1 Linear migration model

由文献[22]可知, 不同迁移模型的选择会对算法的寻优效果有所影响, 符合自然规律的迁移模型的寻优效果相对较优。故本文使用如图 2 所示的余弦迁移模型代替基本 BBO 算法中的线性迁移模型。

余弦迁移模型计算如式(8)、式(9)。

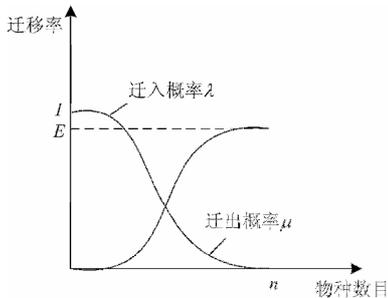


图 2 余弦迁移模型

Fig. 2 Cosine migration model

$$\lambda_k = \frac{I}{2} [1 + \cos(\frac{k\pi}{n})] \quad (8)$$

$$\mu_k = \frac{E}{2} [1 - \cos(\frac{k\pi}{n})] \quad (9)$$

BBO 算法的变异操作可参见文献[18]。

3 PSO-BBO 改进算法

PSO-BBO 算法流程如图 3 所示。

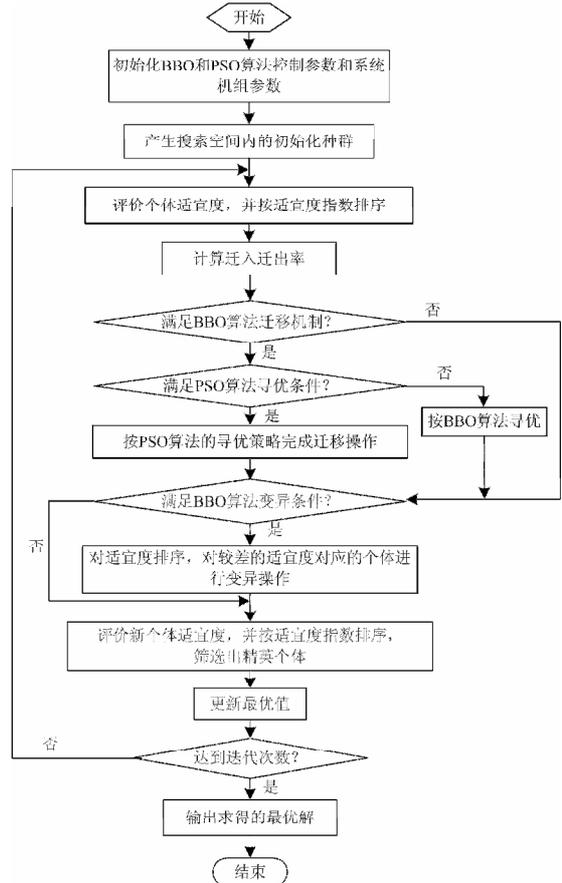


图 3 PSO-BBO 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of PSO-BBO algorithm

该改进算法中, 基本 BBO 算法的迁移条件不变, 即 0~1 之间的随机数 $rand$ 满足 $rand < \lambda_i$ (λ_i 为迁入概率), 则满足 BBO 算法的迁移条件, 在此前提下, 若还满足 $rand < 0.5$, 则按 PSO 算法寻优策略执行迁移操作。

$$\begin{cases} v_{i,j}^{k+1} = \omega v_{i,j}^k + c_1 r_1 (p_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2 r_2 (g_{i,j}^k - x_{i,j}^k), i=1, \dots, m \\ x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1}, j=1, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

式中: r_1 、 r_2 为 [0,1] 区间上服从均匀分布的随机数; c_1 、 c_2 为学习因子, 二者均为正常数; ω 为惯性权

重; m 是栖息地个数; n 为发电机台数。

若不满足 $rand < 0.5$, 则仍按原始 BBO 算法执行迁移操作^[18]。如果不满足 $rand < \lambda_i$, 则不进行迁移操作, 直接进行变异操作。基本 BBO 算法的迁移策略过于随机, 在算法的运行效率上无法体现优越性; 而 PSO-BBO 的迁移策略则是在基本 BBO 迁移条件满足的前提下加入了一个新的判别条件 ($rand < 0.5$), 如满足则采用效率更高的 PSO 算法进行寻优, 若不满足则仍按原迁移策略进行迁移, 这样的改进可以做到既不丢失个体多样性, 又提高了算法的运行效率。

4 算例分析

4.1 算例描述及算法参数设置

采用 10 机 39 节点标准算例验证算法的有效性:

机组及负荷参数参见文献[23], 以全天 24 h 为总调度时长, 每 1 h 为一个调度时段。PSO-BBO 算法参数设置如下: 种群规模 $N_p=500$, 优化参数维度 $n=10$, 最大迭代次数 $K=500$, 最大突变率 $m_{\max}=0.005$, 最大迁入迁出率 $I=E=1$, 每次保留的精英数为 3 个。PSO 学习因子取 $C_1=3.3$, $C_2=0.7$ ^[24], 惯性权重 ω 的最大值取 0.9, 最小值取 0.4。

4.2 不同优化算法的实验结果对比

由 PSO-BBO 算法计算得到的 24 调度时段最小煤耗费用是 1 018 478.220 美元, 相应的机组调度出力情况如表 1 所示。算法的收敛特性如图 4 所示, PSO-BBO 算法在寻找最优解和收敛快慢两个方面均优于 BBO 基本优化算法和 DE-BBO 混合优化算法。

表 1 算例 1 采用 PSO-BBO 算法得到的机组调度出力

Table 1 Generation schedule obtained by the PSO-BBO algorithm for case-1

时段	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{load}
1	150	309.5	73	60	73	119	129.5	47	20	55	1 036
2	150	309.5	93.56	60	122.9	122.4	129.6	47	20	55	1 110
3	226.6	309.5	164.9	60	122.9	122.4	129.6	47	20	55	1 258
4	303.3	309.5	186.4	60	172.7	122.5	129.6	47	20	55	1 406
5	379.9	309.5	183.8	60	172.8	122.5	129.6	47	20	55	1 480
6	456.5	309.5	205.3	60	222.6	122.5	129.6	47	20	55	1 628
7	456.5	309.5	279.3	60	222.6	122.5	129.6	47	20	55	1 702
8	456.5	389.5	323.2	60	172.7	122.5	129.6	47	20	55	1 776
9	456.1	396.8	328.1	110	222.7	158	129.7	47.13	20.57	55	1 924
10	456.5	460	330.7	160	222.6	160	129.6	47	50.57	55	2 072
11	456.5	460	340	193.3	222.6	160	129.6	77	52.06	55	2 146
12	456.5	460	340	241.2	240.3	160	129.6	85.31	52.06	55	2 220
13	456.5	396.6	303.1	241.2	222.6	160	129.6	85.32	22.12	55	2 072
14	453.5	396.8	296.1	192.2	172.6	123.8	129	84.75	20.22	55	1 924
15	379.9	396.8	283.3	180.8	122.9	122.4	129.6	85.31	20	55	1 776
16	303.2	316.8	317.8	130.8	73	122.4	129.6	85.31	20	55	1 554
17	226.4	309.5	297.5	111.9	122.3	122.5	129.6	85.3	20	55	1 480
18	303.3	309.5	310.2	120.4	172.3	122.5	129.6	85.31	20	55	1 628
19	379.9	389.5	301.1	120.4	172.7	122.5	129.6	85.31	20	55	1 776
20	456.5	460	312.6	170.4	222.6	160	129.6	85.31	20	55	2 072
21	456.5	396.8	315.3	120.4	222.6	122.5	129.6	85.31	20	55	1 924
22	379.9	316.8	275.8	70.42	172.7	122.4	129.6	85.31	20	55	1 628
23	305.1	237.9	195.8	60	122.7	120.4	129.2	85.44	20.43	55	1 332
24	226.6	222.3	189.7	60	73	122.5	129.6	85.31	20	55	1 184

本文涉及的四中算法及参考文献中涉及的 CSADHS(Proposed)、CSAPSO、CDE method 3、ICPSO、AHDE和Proposed IPSO算法的结果对比

情况如表2所示。从表2可以看出, 本文提出的 PSO-BBO算法在满足约束条件下的优化结果优于PSO算法、BBO算法、DE-BBO混合优化算法

以及参考文献中的各种算法的优化结果。

表 2 算例 1 不同算法结果对比

Table 2 Comparison of results of different algorithms for case-1

方法	最小煤耗 费用/美元	平均煤耗 费用/美元
PSO	1 022 135.766	1 023 093.888
BBO	1 019 785.887	1 019 548.547
DE-BBO	1 018 922.675	1 019 283.196
PSO-BBO	1 018 478.220	1 018 833.370
CSADHS(Proposed) ^[25]	1 018 681.872	1 018 718.461
CSAPSO ^[26]	1 018 767.000	1 019 874.000
CDE method 3 ^[27]	1 019 123.000	1 020 870.000
ICPSO ^[24]	1 019 072.000	1 020 027.000
AHDE ^[28]	1 020 082.000	1 022 476.000
Proposed IPSO ^[29]	1 023 807.000	1 026 863.000

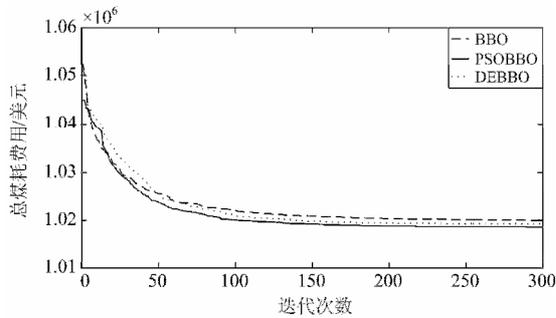


图 4 三种算法的收敛特性曲线

Fig. 4 Convergence characteristic curve of three algorithms

5 结论

在考虑各项约束的条件下，本文将 PSO-BBO 算法成功地应用到了 10 机 39 节点标准算例中去，并且将该混合算法的 24 时段最优机组调度出力以及相应的总体机组煤耗费用与参考文献中算法得到的结果做了对比。在算例中，PSO-BBO 算法的仿真结果均优于其他文献中算法的结果；并且也优于基本 PSO 和基本 BBO 算法以及 DE-BBO 混合算法的优化结果。这表明了本文提出的 PSO-BBO 混合算法是有效的，且在寻找最优解方面和收敛特性上与其他算法相比具有较大的优势。

参考文献

[1] 周玮, 孙辉, 顾宏, 等. 含风电场的电力系统经济调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 148-153.
 ZHOU Wei, SUN Hui, GU Hong, et al. A review on economic dispatch of power system including wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 148-153.

[2] 姜文, 严正. 基于一种改进粒子群算法的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 173-178.
 JIANG Wen, YAN Zheng. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on IPSO[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 173-178.

[3] 夏澍, 周明, 李庚银. 含大规模风电场的电力系统动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 71-77.
 XIA Shu, ZHOU Ming, LI Geng-yin. Dynamic economic dispatch of power system containing large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 71-77.

[4] GIANG Z. Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1187-1195.

[5] ATTAVIRIYANUPAP P, KITA H, TANAKA E, et al. A hybrid EP and SQP for dynamic economic dispatch with nonsmooth fuel cost function[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 411-416.

[6] 杨朋朋, 韩学山. 一种考虑时间关联约束的安全经济调度解法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 30-34.
 YANG Peng-peng, HAN Xue-shan. A security economic dispatch method considering time correlation constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 30-34.

[7] BASKAR S, SUBBARAJ P, RAO M. Hybrid real coded genetic algorithm solution to economic dispatch problem[J]. Computer Electric Eng, 2003, 29(3): 407-419.

[8] CHIANG C. Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1690-1699.

[9] WON J, PARK Y. Economic dispatch solutions with piecewise quadratic cost functions using improved genetic algorithm[J]. Electric Power Energy Systems, 2003, 25(5): 355-361.

[10] JAYABARATHI T, JAYAPRAKASH K, JEYAKUMAR D. Evolutionary programming techniques for different kinds of economic dispatch problems[J]. Elect Power Syst Res, 2005, 73(2): 169-176.

[11] SOMASUNDARAM P, KUPPUSAMY K. Application of evolutionary programming to security constrained economic dispatch[J]. Elect Power Energy Syst, 2005,

- 27(5): 343-351.
- [12] SINHA N, CHAKRABARTI R, CHATTOPADHYAY P. Evolutionary programming technique for economic load dispatch[J]. IEEE Trans Evol Comput, 2003, 7(1): 83-94.
- [13] CAI J, MA X, LI L. Chaotic particle swarm optimization for economic dispatch considering the generator constraints[J]. Energy Conversion Manage, 2007, 48(2): 645-653.
- [14] GAING Z. Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1187-1195.
- [15] 喻洁, 黄学良, 夏安邦. 基于分区协调优化的环境经济调度策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 129-136.
YU Jie, HUANG Xue-liang, XIA An-bang. Environmental economic dispatch based on sub-area[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 129-136.
- [16] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58-65.
HU Guo-wei, BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.
- [17] 郑晓, 张静, 马韬韬, 等. 基于改进决策方法的电力系统多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 151-156.
ZHENG Xiao, ZHANG Jing, MA Tao-tao, et al. Power system multi-objective optimization dispatch based on an improved decision-making method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 151-156.
- [18] SIMON D. Biogeography-based optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2008, 12(6): 702-713.
- [19] BHATTACHARYA A, CHATTOPADHYAY P K. Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization for solution of economic load dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(4): 1955-1964.
- [20] 李静文, 赵晋泉, 张勇. 基于改进差分进化-生物地理学优化算法的最优潮流问题[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 115-119.
LI Jing-wen, ZHAO Jin-quan, ZHANG Yong. Optimal power flow on basis of combining improved differential evolution algorithm with biogeography-based optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 115-119.
- [21] VICTOIRE T A A, JEYAKUMAR A E. A modified hybrid EP-SQP approach for dynamic dispatch with valve-point effect[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(8): 594-601.
- [22] MA Hai-ping. An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization[J]. Information Sciences, 2010, 180(18): 3444-3464.
- [23] BALAMURUGAN R, SUBRAMANIAN S. Differential evolution-based dynamic economic dispatch of generating units with valve-point effects[J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36(8): 828-843.
- [24] WANG Ying, ZHOU Jian-zhong, QIN Hui, et al. Improved chaotic particle swarm optimization algorithm for dynamic economic dispatch problem with valve-point effects[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2893-2900.
- [25] ARUL R, RAVI G, VELUSAMI S. Chaotic self-adaptive differential harmony search algorithm based dynamic economic dispatch[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 50: 85-96.
- [26] WANG Ying, ZHOU Jian-zhong, LU You-lin, et al. Chaotic self-adaptive particle swarm optimization algorithm for dynamic economic dispatch problem with valve-point effects[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(11): 14231-14237.
- [27] LU You-lin, ZHOU Jian-zhong, QIN Hui, et al. Chaotic differential evolution methods for dynamic economic dispatch with valve-point effects[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(2): 378-387.
- [28] LU You-lin, ZHOU Jian-zhong, QIN Hui, et al. An adaptive hybrid differential evolution algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(7): 4842-4849.
- [29] YUAN Xiao-hui, SU An-jun, YUAN Yan-bin, et al. An improved PSO for dynamic load dispatch of generators with valve-point effects[J]. Energy, 2009, 34(1): 67-74.

收稿日期: 2013-12-09; 修回日期: 2013-12-30

作者简介:

陈 珍 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统环境经济调度方面的研究; E-mail: chenchen19891015@163.com

胡志坚 (1969-), 男, 博士, 教授, 博导, 从事互联电力系统鲁棒协调控制、输电线路参数带电测量、新能源与分布式发电等研究工作。