

基于模糊支配的生物地理学优化算法及其在含风电场电力系统调度中的应用

赵 简, 龚庆武, 陈道君, 刘 栋
(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 构建了含风电场电力系统发电成本 and 环境影响的双目标优化调度模型, 应用模糊支配将双目标函数转化为单个评价标准, 提出了基于模糊支配的生物地理学优化算法并对模型进行求解。通过与使用同样支配算法的遗传算法、粒子群优化算法相比较, 验证了所提算法在处理电力系统多目标优化调度问题中的可行性和优越性。算例分析表明, 根据优化调度决策, 在合理的穿透功率范围内, 风电的并网对提高电力生产的经济性具有较明显的效果, 而在改善环境效益方面不是决定性因素。

关键词: 生物地理学优化算法; 风电; 优化; 帕累托最优; 模型

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.021

0 引言

除了各种新能源的并网运行之外, 通过电力系统优化调度, 调整不同机组间的负荷分配也是控制废气排放的有效手段之一。与提高传统化石燃料机组效率、加装脱硫处理装置等方法相比, 电力系统优化调度具有不需要增加硬件、投资少、见效快的优势。因此, 正确和高效地处理含风电场电力系统的优化调度是实现电力生产节能减排的有效手段之一。

传统电力系统优化调度问题考虑经济调度 ED (Economic Dispatch)^[1], 将发电成本作为单一目标。电力系统经济环境优化调度 EED (Economic Environmental Dispatch) 模型, 在传统 ED 问题的基础上加入环境影响函数, 构建电力系统经济环境双目标优化调度模型^[2]。处理多目标优化问题的传统方法是赋权值策略, 通过设定权重因子, 将多目标问题转化为单目标问题求解^[3]。这类方法的缺点在于过分依赖权重参数, 需要多次优化寻找帕累托解集, 无法求出非凸集中的解。另一种方法是使用帕累托最优的概念评价解的优劣^[4], 即解间的支配关系, 将优化目标转化为寻找一组符合评价标准的解。然而, 原始帕累托最优的概念不仅无法评价互不支配的解的优劣, 也不能表示某一解对另一解的支配程度, 使用中非常不便。目前, 解间支配关系的求解方法可分为 NDS (Non-Dominated Sorting)^[5]和 MOR (Multi-Objective Ranking)^[6]2 种。然而 NDS 和 MOR 都依赖于被

支配解的存在, 当目标维数增加时, 解集中含非支配解的概率大幅下降, 对于解的区分度也会随之极大降低^[7]。Farina 和 Amato 提出使用模糊支配的方法求解解间的支配关系^[8]。模糊支配的定义更接近支配的原始概念, 在处理多目标函数的优化问题中具有更好的实用性。

求解优化问题的算法主要分为传统算法和启发式算法 2 种。后者中目前得到广泛研究和应用的有遗传算法 (GA)^[9-11]、进化规划算法^[12]和粒子群优化 (PSO) 算法^[13-15]等。Dan Simon 在 2008 年提出一种新的启发式算法——生物地理学 BBO (Biogeography-Based Optimization) 算法通过模拟自然界不同栖息地种群数量的变化过程寻找优化问题的最优解。文献^[17]的研究表明 BBO 算法在非凸性电力系统经济调度问题上比其他启发式算法具有更好的收敛性、更高的计算效率, 所得解的质量更优。但目前 BBO 算法在电力系统的应用仅限于处理单目标优化模型。

本文提出基于模糊支配的生物地理学 FDCBBO (Fuzzy Dominance-Combined Biogeography-Based Optimization) 算法, 使用模糊支配 (fuzzy dominance) 的方法计算解间的支配关系, 然后用解间的支配关系代替 BBO 算法中的估价函数, 并将其应用于含风电场电力系统双目标优化调度。实例验证表明, FDCBBO 算法同使用同样支配算法的遗传算法 (FDCGA)、粒子群算法 (FDCPSO 算法) 相比, 具有更好的计算性能。

1 含风电场的电力系统双目标优化调度模型

1.1 目标函数

1.1.1 含风电场电力系统发电成本目标

在含风电场电力系统中, 采用风电全部优先并网

收稿日期: 2011-09-09; 修回日期: 2013-01-20

基金项目: 教育部博士研究生学术新人奖资助项目 (5052011-207016); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2011-20702020009)

Project supported by Academic New Artist Ministry of Education Doctoral Post Graduate (5052011207016) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (2011-20702020009)

策略,发电成本由火电成本和风电成本组成。火电成本主要是煤耗成本,而风电成本主要是风电场运行成本,分别如式(1)和式(2)所示。

$$F_{CT}(P_T) = \sum_{i=1}^N \{a_i + b_i P_{Ti} + c_i P_{Ti}^2 + |d_i \sin[e_i(P_{Ti}^{\min} - P_{Ti})]|\} \quad (1)$$

$$F_{CW}(P_w) = P_w \delta \quad (2)$$

其中, N 为运行火电机组的台数; a_i, b_i, c_i, d_i, e_i 为第 i 台火电机组的发电费用系数; P_{Ti} 为第 i 台火电机组的有功功率输出; P_T 为由 $P_{Ti}(i=1, 2, \dots, N)$ 组成的向量; $P_{Ti}^{\min}$ 为第 i 台火电机组的有功出力下限; P_w 为风电场的等值出力; δ 为风电场运行费用系数。

由式(1)和式(2)可得系统发电成本目标函数:

$$\min F_1(P_T, P_w) = \min(F_{CT}(P_T) + F_{CW}(P_w)) \quad (3)$$

1.1.2 含风电场电力系统环境影响目标

电力生产过程中产生的 CO_2, SO_2, NO_x 等有害气体给生态环境造成了严重的污染和破坏。本文采用环境影响因子 γ 代表电力生产所产生废气排放总量(t/h)^[18]:

$$\gamma(P_T) = \sum_{i=1}^N 10^{-2} [\alpha_i + \beta_i P_{Ti} + \gamma_i (P_{Ti})^2 + \xi_i \exp(\lambda_i P_{Ti})] \quad (4)$$

其中, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \xi_i$ 和 λ_i 为环境影响因子系数。

系统环境影响目标函数为:

$$\min F_2(P_T) = \min \gamma(P_T) \quad (5)$$

1.2 约束条件

1.2.1 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{Ti} + P_w - P_{\text{loss}} = P_D \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

其中, P_{loss} 为网损, P_D 为有功负荷。火电与风电机组总的有功出力应该能够平衡总负荷与线损之和, P_{loss} 由Kron公式计算^[19]。

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (7)$$

其中, B_{ij}, B_{0i}, B_{00} 为系统网损参数, P_i, P_j 分别为第 i, j 台机组的有功出力。

1.2.2 机组出力约束

在稳态运行中,机组有功出力满足上下限限制。

$$P_{Ti}^{\min} \leq P_{Ti} \leq P_{Ti}^{\max} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

其中, $P_{Ti}^{\max}$ 和 $P_{Ti}^{\min}$ 分别为第 i 台机组的有功输出上限值和下限值。

2 FDCBBO 算法

2.1 支配度的数值解法

2.1.1 模糊支配

假设最小化问题有 N_{obj} 个目标函数 f_i ,其中, $i=1, 2, \dots, N_{\text{obj}}$ 。

定义 1 i 维模糊支配。

定义一个非减的隶属度函数 $\mu_i^{\text{dom}}(f_i(X)) \rightarrow [0, 1]$, $i=1, 2, \dots, N_{\text{obj}}$ 。

若 $f_i(X_u) < f_i(X_v)$,则称 X_u 第 i 维模糊支配 X_v ,表示为 $X_u <^F X_v$, X_u 第 i 维模糊支配 X_v 的程度为 $\mu_i^{\text{dom}}(f_i(X_v) - f_i(X_u)) = \mu_i^{\text{dom}}(X_u <^F X_v)$ 。模糊支配可表征为 X_u 与 X_v 之间的模糊关系 $X_u <^F X_v$ 。

定义 2 解的模糊支配。

若 $\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{obj}}\}, X_u <^F X_v$,称解 X_u 模糊支配解 X_v ,记作 $X_u <^F X_v$,模糊支配的程度可通过计算第 i 维模糊关系 $X_u <^F X_v (i=1, 2, \dots, N_{\text{obj}})$ 的交集得出。模糊交集可以通过一系列称为 t-norms 的函数求得,其操作作用 I 表示如下: $\mu^{\text{dom}}(X_u <^F X_v) = I_{i=1}^{N_{\text{obj}}} \mu_i^{\text{dom}}(X_u <^F X_v)$ 。

定义 3 群体模糊支配。

考虑一个包含 M 个解的解集 X 。若 X 中的一个解 X_v 被 X 中剩余的任意一个解 X_u 支配,则称 X_v 在 X 内被模糊支配。这种情况下,模糊支配的程度可通过对每个可能的 $\mu^{\text{dom}}(X <^F X_v)$ 求并集得出。模糊并集的求法由一系列被称为 t-conorms 的函数决定。具体方法参见文献[20]。

2.1.2 解的分布密度

某一解在解空间中的分布密度用每维目标函数上与其相邻 2 点的标准化距离之和表示,如式(9)所示:

$$O(X_v) = \sum_{i=2}^{N_{\text{obj}}-1} [(f_i(X_u) - f_i(X_w)) / (\max(f_i) - \min(f_i))] \quad (9)$$

其中, $O(X_v)$ 为 X_v 处 N_{obj} 维封闭超立方体的大小,此超立方体仅包含 X_v 1 个解; X_u, X_w 为将解集按第 i 维目标函数值 $f_i(X)$ 升序排列后与 X_v 相邻的解。边界解的 O 值赋为无穷。

由上述分析可知,解的分布密度越小,解集的多样性越好。

2.1.3 非支配度排序

对于待优化解集中的解,采取以下策略进行排序:

a. 支配度小的在前;

b. 对于支配度相同的解,分布密度小的在前。

采用以上策略处理多目标优化问题,将解集中的解按照优劣程度排序,可以促进帕累托最优前沿 POF (Pareto Optimal Front) 向理想帕累托曲线收敛及目标解集中的解在 POF 上的均匀分布。

2.2 BBO 算法

BBO 算法的参数包括栖息地的适宜度指数、栖息地的特征变量向量、优化问题中变量、某栖息地容纳的种群数量 s 及概率 P_s 、最大种群数量 $s_{\max}$ 、迁入率 λ 、迁出率 μ 。系统变量包括系统迁移率 P_{mnd} 和系统最大突变率 $m_{\max}$ 。算法中主要包括迁移和变异 2 种操作。

a. 迁移。

BBO 算法的迁移操作用于修正解集中已存在的解。首先根据 P_{mnd} 判断是否对解集中的某个解 K 进

行修正;然后使用 λ 决定是否对此解 $\mathbf{K}$ 中的第 i 个因子进行修正;最后使用 μ 从解集中剩余解中选出一个解 u ,用 u 的第 i 个因子代替 $\mathbf{K}$ 中原有的第 i 个因子。

b. 变异。

变异操作用于增加群体的多样性。变异率由该栖息地种群数量概率决定:

$$m=m_{\max}\frac{1-P_s}{P_{\max}}\tag{10}$$

其中, $m_{\max}$ 为最大变异率,由用户决定; $P_{\max}$ 为栖息地种群数量达到最大时的效率。

2.3 FDCBBO 算法

本文在基本 BBO 算法的基础上,用模糊支配求解解间的支配关系并将解集中的解排序,代替基本 BBO 算法中的栖息地适宜度指数作为解的评价标准,形成 FDCBBO 算法。在算法进化过程中,不再直接用迁移、变异后的个体代替原有个体,而是产生一个新的解集,与原解集融合,重新排序,选择 2 个解集中较好的个体形成下一代解集。FDCBBO 算法流程如图 1 所示。

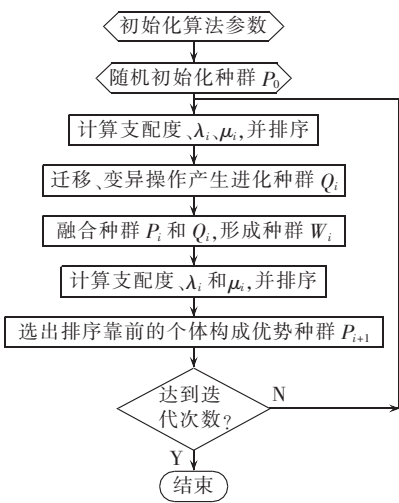


图 1 基于模糊支配的生物地理学算法流程图
Fig.1 Flowchart of proposed algorithm

3 算例分析

本文采用 IEEE 30 节点系统验证所提 FDCBBO 算法的可行性及含风电场电力系统双目标优化模型的有效性。由于阀点效应对火电机组发电费用的影响很小,因此忽略不计。6 台火电机组参数见表 1 和表 2。系统负荷 $P_D=2.834$ p.u.,风电场运行费用系数 $\delta=0.5$ 元/MW,风电场在节点 19 接入系统,其有功出力 $P_w=20\%P_D$ 。设置 3 种算法的种群规模及迭代次数均为 50。GA 采用单点杂交,杂交、变异率分别取 1 和 0.01;PSO 算法中惯性常量取 0.3,学习因子均取 1,邻域粒子数取 7。

基于模糊支配的 PSO 算法、GA、BBO 算法求解

表 1 发电机发电费用系数及有功容量
Tab.1 Cost coefficients of power generation and active power capacities

发电机号	a_i	b_i	c_i	$P_{\max}$	$P_{\min}$
1	10	200	100	0.5	0.02
2	10	150	120	0.6	0.03
3	20	180	40	1.0	0.05
4	10	100	60	1.2	0.06
5	20	180	40	1.0	0.05
6	10	150	100	0.6	0.03

表 2 发电机环境影响因子系数
Tab.2 Environmental influencing factor coefficients of generator

发电机号	α_i	β_i	γ_i	ξ_i	λ_i
1	0.04091	-0.05554	0.06490	0.000200	2.857
2	0.02543	-0.06047	0.05638	0.000500	3.333
3	0.04258	-0.05094	0.04586	0.000001	8.000
4	0.05326	-0.03550	0.03380	0.002000	2.000
5	0.04258	-0.05094	0.04586	0.000001	8.000
6	0.06131	-0.05555	0.05151	0.000050	6.667

模型所得的 POF 分别如图 2—4 所示。POF 两端极值点分别对应最优发电成本解和最优环境影响因子解。图 2 所示 POF 的形状与理想帕累托曲线相差很远,解在曲线上的分布极不均匀,两端分布稀疏,中部稍为密集。图 3 中的 POF 曲线中部较为光滑,但靠近最优发电成本端的曲线光滑程度较差,曲线的形状较接近理想帕累托曲线;解的分布同图 2 相比较均匀,但在 POF 极值点附近的分布仍不够理想。图 4 是基于本文所提出的 FDCBBO 算法所得 POF 曲线,从图中可以看出,该曲线光滑,形状与理想帕累托曲线最接近,且求得的非支配解在曲线上的分布均匀。

表 3、表 4 列出了使用 3 种算法分别进行 10 次独立运算得到的最优发电成本解和最优环境影响因子解(表中 P_T 为标么值)。通过比较可知,使用 FDCBBO 算法得到的最优发电成本解与使用 FDCGA 和 FDCPSO 算法所得的相应解相比,发电成本和环境 影响因子均最小,因此更靠近原点。使用 FDCBBO 算法得到的最优环境影响因子解的环境影响因子虽然与使用 FDCGA 求得的相应值同为最小,但其发电成本仍为最小,因此更靠近原点。

综合以上分析可以得知,FDCBBO 算法在收敛性和解的多样性方面均优于 FDCGA 和 FDCPSO 算法。

在不同风电场有功出力的情况下,使用 FDCBBO 算法所得的 POF 曲线如图 5 所示。负荷一定时,随着风电场有功出力的增加,火电厂的总出力 P_{Ts} 减小。由图 5 可以看出,随着 P_{Ts} 的减小,发电成本减小的趋势较为明显,而环境影响因子则有缓慢的增加趋势,这是由于发电成本表达式和环境影响因子表达式均由火电机组有功出力的二次函数近似,函数值在最低点附近变化缓慢,远离最低点处变化快。虽然

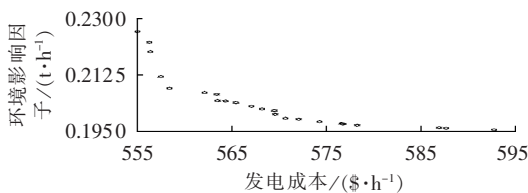


图 2 基于模糊支配的粒子群优化算法所得的 POF
Fig.2 POF derived by PSO with fuzzy dominance

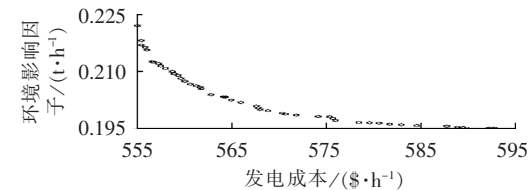


图 3 基于模糊支配的遗传算法所得的 POF
Fig.3 POF derived by GA with fuzzy dominance

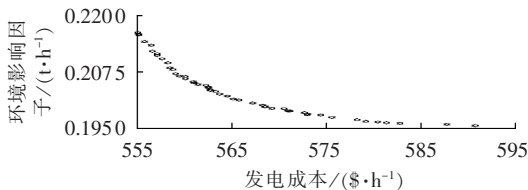


图 4 基于模糊支配的生物地理学算法所得的 POF
Fig.4 POF derived by BBO with fuzzy dominance

表 3 不同算法所得最优发电成本

Tab.3 Optimal generation cost obtained by different algorithms

发电机号	P_{B}		
	FDCPSO	FDCGA	FDCBBO
1	0.0200	0.0200	0.1066
2	0.2354	0.2813	0.2683
3	0.5085	0.3305	0.3618
4	0.8676	0.9284	0.9129
5	0.4202	0.4203	0.3870
6	0.2155	0.2868	0.2306
发电成本/(\$·h ⁻¹)	508.7323	508.0747	507.9543
环境影响因子/(t·h ⁻¹)	0.2244	0.2262	0.2231

表 4 不同算法所得最优环境影响因子

Tab.4 Optimal environmental influencing factor obtained by different algorithms

发电机号	P_{B}		
	FDCPSO	FDCGA	FDCBBO
1	0.2796	0.3434	0.3078
2	0.4095	0.4178	0.3692
3	0.4738	0.4110	0.4043
4	0.2313	0.2617	0.2902
5	0.4008	0.4161	0.4504
6	0.4722	0.4171	0.4192
发电成本/(\$·h ⁻¹)	550.3854	548.7332	543.2179
环境影响因子/(t·h ⁻¹)	0.1981	0.1977	0.1977

每台机组有独立的有功功率-发电成本特性曲线和有功功率-环境影响因子特性曲线,但是在火电总负荷波动达到一定值时,POF 曲线会随火电机组运行特性曲线的总体变化趋势移动。由于火电机组的发电费用系数均为正,在功率的负半轴取到其发电费用

特性曲线极小值点,所以在实际运行中火电发电总成本与火电总负荷大小成正比。同时,由于风电发电成本很小,系统发电成本近似与风电场等值出力大小成反比。环境影响因子系数中, α_i 、 γ_i 为正值,而 β_i 为负值,在功率的正半轴取到环境影响因子极小值点,所以随着火电机组总出力增大,环境影响因子经历一个先递减再递增的过程。由于风电穿透极限功率有限,负荷一定时,火电机组的总出力变化不大,因此,风电的并网对电力生产环境效益影响十分有限。

随着 P_{B} 的变化,POF 中发电成本和环境影响因子最大值的变化如表 5 所示。由于 POF 形状变化极小,发电成本和环境影响因子最大值的变化即可代表 POF 位置的变化。

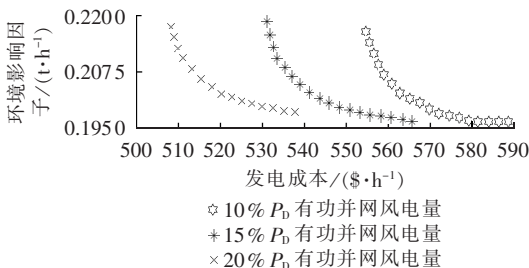


图 5 风电并网功率不同时的优化曲线

Fig.5 Optimal curves for different grid-connected wind power

表 5 发电成本和环境影响因子最大值随火电总负荷的变化

Tab.5 Maximum of generation cost and environment influencing factor for different total thermal loads

P_{B}	发电成本/(\$·h ⁻¹)	环境影响因子/(t·h ⁻¹)
30% P_{D}	231.6893	0.2495
50% P_{D}	348.0268	0.2385
80% P_{D}	509.1032	0.2207
85% P_{D}	542.4951	0.2202
90% P_{D}	631.1519	0.2150
100% P_{D}	636.7370	0.2188
150% P_{D}	841.0832	0.2310
200% P_{D}	1071.2300	0.2433

综上所述,风电的加入对于减少发电成本有显著作用,而电力生产的环境效益则更多依赖于火电总负荷的大小、火电机组的环境影响因子特性曲线及负荷分配方案的选择。

4 结论

本文提出了应用 BBO 算法求解含风电场电力系统双目标优化调度问题的方法,并通过实例验证了算法的有效性,分析了不同风电场等值出力对含风电场电力系统电力生产经济效益和环保效益的影响,由此可得出如下几点结论。

a. 在传统发电成本目标函数中加入风电发电成本,同时考虑污染物排放量作为环保目标,构建了含

风电场的电力系统双目标优化调度模型。

b. 将模糊支配与 BBO 算法结合,用于电力系统双目标优化调度问题的求解,实例验证表明,本文所提 FDCBBO 算法在解集收敛性及多样性方面均优于 FDCGA 和 FDCPSO 算法。

c. 不考虑风电出力,当火电总出力由小增大时,系统电力生产的废气排量先减小后增大,环境效益先增加再降低。这说明电力生产环境效益的改善与火电总出力及环境效益因子特性曲线有关。

d. 当系统内风电全部优先并网时,风电场等值出力的增加会显著降低发电成本,增加经济效益,但是对环境效益的改善则不明显;这也说明电力生产环境效益的改善更依赖于负荷分配方案的选择,同时,更突出了电力系统优化调度研究的重要性。

本文将 FDCBBO 算法用于双目标电力系统优化调度的求解,并未充分体现出模糊支配与其他支配度数值解法的优势。在本文的基础上,可以进一步改进优化模型,增加目标函数维数,更全面地考虑影响优化调度的诸多因素,体现 FDCBBO 算法的优越性。

参考文献:

- [1] 秦梁栋. 基于 Queen-bee 进化的遗传算法在电力系统经济调度中应用[J]. 电力自动化设备,2005,25(5):64-66.
QIN Liangdong. Queen-bee evolution based genetic algorithm to economic dispatch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005,25(5):64-66.
- [2] 陈功贵,陈金富,段献忠. 考虑备用约束和阀点效应的电力系统环境经济优化调度[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):18-22.
CHEN Gonggui, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Environmental and economic dispatch with reserve constraints and valve-point effects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(8):18-22.
- [3] PALANICHAMY C, BABU N S. Analytical solution for combined economic and emissions dispatch[J]. Electr Power Syst Res, 2008, 78(7):1129-1137.
- [4] 孙伟卿,王承民,张焰,等. 基于 Pareto 最优的电力系统有功-无功综合优化[J]. 电力系统自动化,2009,33(10):38-42.
SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZHANG Yan, et al. Active/reactive power coordinated optimization of power system based on Pareto optimality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(10):38-42.
- [5] 高媛. 非支配排序遗传算法(NSGA)的研究与应用[D]. 杭州:浙江大学,2006.
GAO Yuan. Non-dominated sorting genetic algorithm and its applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [6] 王一,程浩忠,胡泽春,等. 计及过负荷风险的输电网多目标期望值规划[J]. 中国电机工程学报,2009,29(1):21-27.
WANG Yi, CHENG Haozhong, HU Zechun, et al. Multi-objective transmission expected value planning considering risk of overloading[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(1):21-27.
- [7] KOPPEN M, VICENTE-GARCIA R, NICKOLAY B. Fuzzy-Pareto-

dominance and its application in evolutionary multi-objective optimization[C]//EMO'05 Proceedings of the Third International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005:399-412.

- [8] FARINA M, AMATO P. Fuzzy optimality and evolutionary multi-objective optimization[C]//EMO'03 Proceedings of the 2nd International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003:58-72.
- [9] 崔春雷,方彦军. 加速遗传算法在电厂动态负荷优化分配中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):63-66.
CUI Chunlei, FANG Yanjun. Application of AGA in dynamic load dispatch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(1):63-66.
- [10] 赵亮,吕剑虹. 基于改进遗传算法的风电场多目标无功优化[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):84-88.
ZHAO Liang, LÜ Jianhong. Multi-objective reactive power optimization of wind farm based on improved genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010,30(10):84-88.
- [11] 张秀霞,王爽心,吴冠玮. 基于混沌遗传和模糊决策算法的多目标负荷经济调度[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):94-99.
ZHANG Xiuxia, WANG Shuangxin, WU Guanwei. Multi-objective economic load dispatching based on chaos genetic algorithm and fuzzy decision[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(1):94-99.
- [12] 颜伟,熊小伏,徐国禹. 基于进化规划方法的新型电压无功优化模型和算法[J]. 电网技术,2002,26(6):14-17.
YAN Wei, XIONG Xiaofu, XU Guoyu. Evolutionary programming based novel voltage and reactive power optimization model and its algorithm[J]. Power System Technology, 2002,26(6):14-17.
- [13] 唐剑东,熊信银,吴耀武,等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):81-84.
TANG Jiandong, XIONG Xinyin, WU Yaowu, et al. Power system reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(7):81-84.
- [14] 陈道君,龚庆武,张茂林,等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报,2011,31(13):10-17.
CHEN Daojun, GONG Qingwu, ZHANG Maolin, et al. Multi-objective optimal dispatch in wind power integrated system incorporating energy-environmental efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(13):10-17.
- [15] 沈茂亚,丁晓群,王宽. 自适应免疫粒子群算法在动态无功优化中应用[J]. 电力自动化设备,2007,27(1):31-35.
SHEN Maoya, DING Xiaqun, WANG Kuan. Application of adaptive immune PSO in dynamic reactive power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007,27(1):31-35.
- [16] SIMON D. Biogeography-based optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2008,12(6):702-713.
- [17] BHATTACHARYA A, CHATTOPADHYAY P K. Economic dispatch solution using biogeography-based optimization[C]//2009 Annual IEEE India Conference (INDICON). Gujarat, India: [s.n.], 2009:1-4.
- [18] LIU Xian, XU W. Minimum emission dispatch constrained by stochastic wind power availability and cost[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010,25(3):1705-1713.
- [19] WANG Lingfeng, SINGH C. Tradeoff between risk and cost in economic dispatch including wind power penetration using particle swarm optimization[C]//International Conference on

Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. Chongqing, China: [s.n.], 2006: 1-7.

[20] KODURU P, DONG Zhanshan, DAS S, et al. A multiobjective evolutionary-simplex hybrid approach for the optimization of differential equation models of gene networks[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2008, 12(5): 572-590.

作者简介:

赵 简(1988-),女,湖北宜昌人,硕士研究生,研究方向

为风电并网运行调度(E-mail:zhaojianpopo@126.com);

龚庆武(1967-),男,湖南新邵人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统运行与控制、电力系统仿真、风力发电并网运行与控制等;

陈道君(1986-),男,河南商城人,博士研究生,研究方向为风电并网调度运行;

刘 栋(1979-),男,河北邢台人,讲师,研究方向为电力系统运行与控制。

Fuzzy-dominance combined biogeography-based optimization algorithm and its application in dispatch of power system with wind farm

ZHAO Jian, GONG Qingwu, CHEN Daojun, LIU Dong

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

Abstract: A bi-objective optimal dispatch model of power system with wind farm is established, i.e. power production cost and environment impact. The fuzzy-dominance method is employed to convert the bi-objective function into single criterion, and the BBO (Biogeography-Based Optimization) algorithm combined with fuzzy-dominance method is proposed to solve the model. The applicability and superiority of BBO algorithm are verified by the comparison among BBO algorithm, PSO algorithm and GA combined with same dominance method. Case analysis shows that, within the reasonable range of wind power penetration, the grid-connected wind power improves significantly the economy of power production according to the optimal dispatch strategy, but it is not the decisive factor in environmental improvement.

Key words: biogeography-based optimization algorithm; wind power; optimization; Pareto optimal; models

广 告 索 引

南京钛能电气有限公司	(封面)
科大智能科技股份有限公司	(封二, 前插 1)
济南无线电十厂有限责任公司	(前插 2)
南京南瑞集团公司	(前插 3)
广州虹科电子科技有限公司	(前插 4)
南京南瑞继保电气有限公司	(前插 5)
绵阳市维博电子有限责任公司	(前插 6)
上海安科瑞电气股份有限公司	(前插 7)
广州致远电子股份有限公司	(前插 8)
福建顺昌虹润精密仪器有限公司	(前插 9)
国电南京自动化股份有限公司	(前插 10, 11)
珠海优特电力科技股份有限公司	(前插 12)
南京科明自动化设备有限公司	(前插 13)
上海良信电器股份有限公司	(前插 14, 15)
广东雅达电子股份有限公司	(前插 16)

重庆新世纪电气有限公司	(前插 17)
国电南京自动化股份有限公司	(前插 18, 19)
艾默生网络能源有限公司	(前插 20)
武汉百年基业通信科技有限公司	(文前页)
日东工业(中国)有限公司	(封三)
北京博电新力电气股份有限公司	(封底)
航天长峰朝阳电源有限公司	(后插 1)
珠海博威电气有限公司	(后插 2)
武汉市豪迈电力自动化技术有限责任公司	(后插 3)
浙江中凯科技股份有限公司	(后插 4)
中国工控网	(文后 1)
第 13 届中国哈尔滨国际工业自动化及仪器仪表展览会	(文后 2)