

9-18-2020

Dynamic Environmental and Economic Dispatching of Wind Farm Based on Multi-objective

Le Wei

Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Xijin Li

Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, 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.

Dynamic Environmental and Economic Dispatching of Wind Farm Based on Multi-objective

Abstract

Abstract: Wind farms are developing rapidly under the new policy on energy resources vigorously advocated by the state. Its output scheduling is very complex, and needs the integration of economic and environmental factors. Aiming at the large prediction error of wind power, in the dynamic environmental economic dispatch of wind farm, the cost of rotating reserve is taken into account within the generation cost, and the demand of wind power prediction error for rotating reserve capacity is taken into account within the constraint condition. *Aiming at the minimum total cost of power generation, the minimum total pollutant emission and minimum total cost of electricity purchase, a dynamic environmental and economic dispatching model of wind farm is established. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-III is used to obtain diverse solution sets and good convergence.* The simulation of a five-machine power system with a wind farm verifies the rationality of the proposed dynamic environmental economic scheduling scheme based on multi-objective wind farms.

Keywords

wind farms, dynamic environmental economic scheduling model, rotating reserve capacity, multi-objective optimization, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-III

Recommended Citation

Wei Le, Li Xijin. Dynamic Environmental and Economic Dispatching of Wind Farm Based on Multi-objective[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1825-1830.

基于多目标的含风电场动态环境经济调度

魏乐, 李希金

(华北电力大学自动化系, 河北 保定 071003)

摘要: 在倡导大力开发新能源的政策下, 含风电场发展迅速。但其出力调度问题很复杂, 需要综合经济和环境因素, 针对风电功率预测误差大, 在研究含风电场动态环境经济调度时, 在发电成本中考虑了旋转备用成本, 在约束条件中考虑风功率预测误差对旋转备用容量的需求, 以发电总成本最小、污染物排放总量最小、购电总费用最小为目标, 建立含风电场动态环境经济调度模型。采用非支配排序遗传算法 III 对模型求解, 以获得多样的解集和良好的收敛性。在含有 1 个风电场的 5 机电力系统算例中的仿真研究验证了所提出的基于多目标含风电场动态环境经济调度方案的合理性。

关键词: 含风电场; 动态环境经济调度模型; 旋转备用容量; 多目标优化; 非支配排序遗传算法 III
中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 09-1825-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0055

Dynamic Environmental and Economic Dispatching of Wind Farm Based on Multi-objective

Wei Le, Li Xijin

(Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Wind farms are developing rapidly under the new policy on energy resources vigorously advocated by the state. Its output scheduling is very complex, and needs the integration of economic and environmental factors. Aiming at the large prediction error of wind power, in the dynamic environmental economic dispatch of wind farm, the cost of rotating reserve is taken into account within the generation cost, and the demand of wind power prediction error for rotating reserve capacity is taken into account within the constraint condition. Aiming at the minimum total cost of power generation, the minimum total pollutant emission and minimum total cost of electricity purchase, a dynamic environmental and economic dispatching model of wind farm is established. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-III is used to obtain diverse solution sets and good convergence. The simulation of a five-machine power system with a wind farm verifies the rationality of the proposed dynamic environmental economic scheduling scheme based on multi-objective wind farms.

Keywords: wind farms; dynamic environmental economic scheduling model; rotating reserve capacity; multi-objective optimization; Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-III

引言

由于在电力产业具有极高的综合价值, 风能已



收稿日期: 2019-01-29 修回日期: 2019-05-09;
基金项目: 国家自然科学基金(51676068), 中央高校
基本科研业务费专项资金(2016MS143);
作者简介: 魏乐(1976-), 女, 满族, 北京, 博士,
教授, 研究方向为火电厂建模与仿真; 李希金
(1994-), 女, 河北沧州, 硕士生, 研究方向为系统
仿真与优化控制。

成为当今最具大规模开发的可再生能源。然而风电具有间歇性和随机性, 实际风电预测的平均绝对百分比误差为 25%~40%, 在风电并网时会造成电力系统失衡, 既而导致弃风现象甚至“反调峰”现象。为了保证可靠供电, 需要进行旋转备用。

含风电场的电力系统调度问题应综合考虑资源消耗、经济效益和环境效益多个因素, 在发电侧

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

• 1825 •

主要应考虑火发电机组的燃料费用、系统旋转备用容量产生的成本和化石能源燃烧产生的污染物排放量；在居民用电侧，为降低居民购电费用(电网的购电成本加上输配电费用)，应考虑购电费用。此外，实际上风电出力的随机波动特性和电网负荷需求的不断改变需要火电机组实时调整出力，维持电力系统平衡，故应针对一天 24 时段考虑火电机组动态出力调度。

从实质上讲，含风电场环境经济调度是具有约束的多目标动态优化问题：

在目标函数选取上：文献[1]以发电成本和购电费用最小化为目标，考虑了系统旋转备用成本，但仅顾及到调度问题的经济性；文献[2-3]考虑污染物排放量环境因素，但忽略了购电费用；文献[4]还将线路网损考虑为目标函数。因此本文全面兼顾电力系统调度中的实际因素，以发电总成本、污染物排放总量和购电总费用均最小为目标函数建立模型；为维持电力系统稳定运行，须同时满足含风电场旋转备用容量和各时段之间的机组爬坡速率约束、机组出力上下限约束、功率平衡约束。

在调度时段选取上：文献[1]仅针对第 17 时段求解电力系统静态调度方案，而未考虑火电机组应实时调整出力以满足电网供需平衡的实际问题；为符合实际问题，文献[5]以一天 24 个时段为调度时段进行动态调度。因此，本文选取 24 时段为调度时段。

在模型求解上：文献[6]采用 2 次规划方法求解，但该方法仅适用于其提出的 2 次规划问题，对于考虑目标更全面的复杂实际问题通用性差；文献[4, 7]采用权重法给各目标分配合适的权重系数转换成单目标问题求解，但是需要充足的经验，不具有严谨的科学性；文献[3]先求解某时段静态调度方案，再解耦得整个周期的动态方案，但可能会累积误差。

基于多目标的含风电场的动态调度模型具有高维度、非线性、多约束、不可微的难点，非支配排序遗传算法-II(NSGA-II)在求解该类问题上应用

广泛，但是其求解模型中目标函数多简化为 2 个，由于本文综合考虑实际问题，建立三目标动态模型，而 NSGA-II 算法在解决三目标动态优化问题时多样性和收敛性会降低。NSGA-III^[8]算法在 NSGA-II 框架的基础上加入了关联参考点和目标函数归一化步骤，使其在并行解决 3 个及其以上目标的多目标动态优化问题时能够保持解集多样性，快速而有效地收敛到最优解集，因此本文选择 NSGA-III 算法对模型求解。

基于以上分析，本文在已知风电功率和电网负荷 24 时段预测情况下，建立模型求解最优调度方案，采用 NSGA-III 算法，求解具有约束的多目标含风电场动态环境经济调度问题，进行仿真分析，以验证该方案的有效性。

1 电力系统动态调度模型的建立

1.1 目标函数

1.1.1 总发电成本最小化

当风电场实际出力低于预测值或电网负荷大于预测值导致电网出力不足时，会调用上升旋转备用，要求原来未达到额定转速的机组增加出力，当前电力市场环境下，增加机组出力带来的这部分成本不再由各开发商无偿供给，因此需要将其加入到发电总成本中。因风电场不消耗燃料成本，故忽略阈值效应的最小化总发电成本目标函数为：

$$\min f_1 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} [a_i P_{G,i}^2(t) + b_i P_{G,i}(t) + c_i + \alpha_{U,i} S_{U,i}(t)] \quad (1)$$

式中： f_1 为发电总成本； a_i 、 b_i 、 c_i 分别为第 i 台火发电机组的燃料费用系数； $P_{G,i}(t)$ 为第 i 台火电机组在第 t 时段的出力； $\alpha_{U,i}$ 为第 i 台火电机组的上升旋转备用成本系数； $S_{U,i}(t)$ 为第 i 台火电机组在第 t 时段的上升旋转备用容量。

1.1.2 污染物排放总量最小化

火电机组在运行过程中会排放大量氮氧化物、硫氧化物、悬浮颗粒物等污染物。仅考虑氮氧化物

的污染物排放总量最小化目标函数为:

$$\min f_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (d_i P_{G,i}^2(t) + e_i P_{G,i} + f_i) \quad (2)$$

式中: f_2 为污染物排放总量; d_i , e_i , f_i 分别为第 i 台火电机组的污染物排放量特性系数。

1.1.3 购电总费用最小化

在目前市场竞价调度模式下, 各机组的上网电价提前以合同方式确定, 因此最小化购电总费用的目标函数为:

$$\min f_3 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} g_i P_{G,i}(t) \quad (3)$$

式中: f_3 为购电总费用; g_i 为第 i 台火电机组的上网电价。

1.2 约束条件

1.2.1 功率平衡约束

忽略网损的含风电场的功率平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i}(t) + \sum_{m=1}^{N_W} P_{W,m}(t) - P_L(t) = 0 \quad (4)$$

式中: N_W 为并网风电场个数; $P_{W,m}(t)$ 为第 m 个风电场在第 t 时段的输出功率; $P_L(t)$ 为电网在第 t 时段的负荷预测。

1.2.2 机组出力上下限约束

机组出力上下限约束为:

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i}(t) \leq P_{G,i}^{\max} \quad (5)$$

式中: $P_{G,i}^{\min}$ 为第 i 台火电机组的出力下限; $P_{G,i}^{\max}$ 为第 i 台火电机组的出力上限。

1.2.3 机组爬坡速率约束

机组爬坡速率约束为:

$$\begin{cases} P_{G,i}(t) - P_{G,i}(t-1) \leq UR_i \\ P_{G,i}(t-1) - P_{G,i}(t) \leq DR_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: UR_i 为第 i 台火电机组的爬坡上限; DR_i 为第 i 台火电机组的爬坡下限。

1.2.4 旋转备用容量约束

系统的旋转备用容量分为上升旋转备用容量和下降旋转备用容量, 它们受到机组爬坡速率的限

制, 同时还与上一个时段机组的出力以及机组自身出力上下限有关。

(1) 上升旋转备用容量约束

含风电场的电力系统调度中设置上升旋转备用容量主要是: 风电预测水平较低, 风电场出力不稳定, 预测误差较大; 电网负荷随用户需求实时波动, 实际需求和负荷预测值很可能会存在较大差距。因此考虑上升旋转备用容量约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} S_{U,i}(t) \geq P_L(t) \times L\% + P_W(t) \times W_U\% \quad (7)$$

$$S_{U,i}(t) = \min(P_{G,i}^{\max}(t) - P_{G,i}(t), T_{10} \times UR_i) \quad (8)$$

$$P_{G,i}^{\max}(t) = \min(P_{G,i}^{\max}, P_{G,i}(t-1) + T_{60} \times UR_i) \quad (9)$$

式中: $L\%$ 为系统负荷预测误差对上升旋转备用的需求; $W_U\%$ 为风电场出力预测误差对上升旋转备用的需求; $P_{G,i}^{\max}(t)$ 为第 i 台火电机组在第 t 时段所能达到的最大出力; T_{10} 为机组旋转备用响应时间, 取 10 min; T_{60} 为一个研究时段, 取 60 min。

(2) 下降旋转备用容量约束

下降旋转备用容量主要是为了应对风电场实际出力大于预测出力时弃风浪费资源的现象, 此时需减小机组出力, 以消纳多余的风电。由于风电出力被低估时其实际出力在风电场预测出力至最大出力之间, 所以其下降旋转备用容量约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} S_{D,i}(t) \geq \left(\sum_{m=1}^{N_W} P_{W,m}^{\max} - P_{W,m}(t) \right) \times W_D\% \quad (10)$$

$$S_{D,i}(t) = \min(P_{G,i}(t) - P_{G,i}^{\min}(t), T_{10} \times DR_i) \quad (11)$$

$$P_{G,i}^{\min}(t) = \max(P_{G,i}^{\min}, P_{G,i}(t-1) - T_{60} \times DR_i) \quad (12)$$

式中: $W_D\%$ 为风电场出力预测误差对系统下降旋转备用的需求; $P_{G,i}^{\min}(t)$ 为第 i 台火电机组在第 t 时段所能达到的最小出力。

2 多目标环境经济动态调度模型求解

2.1 算法对约束的处理

本文建立的模型以式(4)~(12)为约束条件, 由于包含多个约束, 需要对约束进行处理, 以便于个

体间约束的比较。

首先, 式(4)~(12)计算出种群中每个个体的实际约束函数值, 将其中满足约束的个体的约束置为 0, 违反约束的个体取其实际值与上(或下)限值的差值的绝对值为约束, 然后对种群约束进行归一化处理, 再将本文该个体的 9 个约束相加作为其约束, 算法后续的处理即依据此约束值。

在快速非支配排序中, 对满足约束(即为 0)的个体按照目标值排序; 之后对违反约束的个体按约束值由小到大排序, 设置每一层为 1 个个体。

2.2 算法在仿真实例中的应用

以包含 5 台火电机组和 1 个风电场的测试系统为例进行仿真^[9], 火电机组各项参数和上升旋转备用成本系数见表 1, 24 时段电网负荷预测见图 1, 风电场功率预测见图 2。风电场功率预测误差随预测时间不断增大, 故为使仿真更接近实际, 将风电场出力预测误差对系统上升、下降旋转备用需求 $W_U\%$ 和 $W_D\%$ 分别在 10%~30%、30%~50% 按照等比例方式设置, 负荷预测误差对上升旋转备用的需求 $L\%$ 取 5%^[10]。

表 1 火电机组参数^[9]
Tab. 1 Parameters of thermal power units^[9]

机组 序号	$P_{G,i}^{\max}$ /MW	$P_{G,i}^{\min}$ /MW	UR_i /(MW/h)	DR_i /(MW/h)	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	g_i	$\alpha_{U,i}$
1	570	310	250	250	0.000 48	15.5	1 000	6.490e-07	-5.554e-07	4.091e-07	270	27.5
2	425	250	200	200	0.001	16	900	5.638e-07	-6.407e-07	2.543e-07	200	26.4
3	700	350	300	300	0.002	16.3	800	4.586e-07	-5.094e-07	4.257e-07	250	25.6
4	610	300	240	240	0.002 8	17	750	3.380e-07	-3.550e-07	5.326e-07	230	25.0
5	660	325	260	260	0.004	17.4	680	4.586e-07	-5.094e-07	4.258e-07	270	24.5

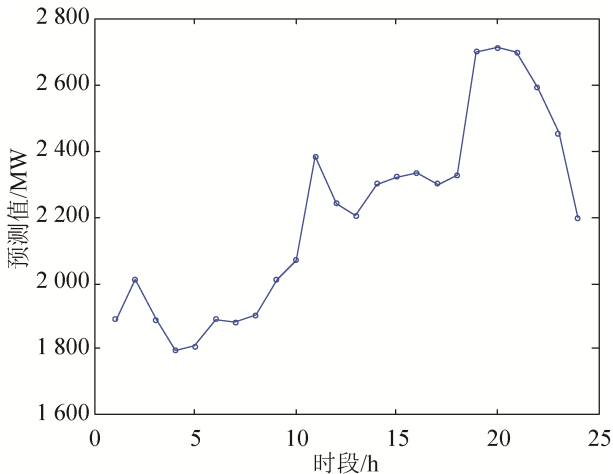


图 1 24 时段电网负荷的预测值

Fig. 1 Predicted values of grid load at 24 periods

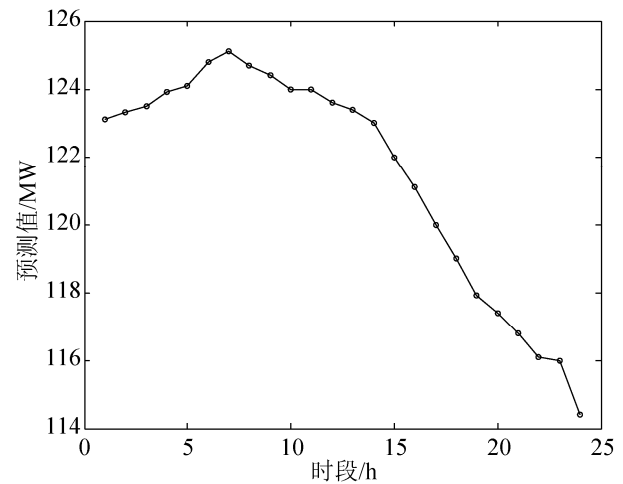


图 2 24 时段风电场出力的预测值

Fig. 2 Predicted values of wind farm output at 24 periods

以式(1)~(3)为目标函数、式(4)~(12)为约束条件建立 3 目标环境经济动态调度模型, 采用 MATLAB (R2013a) 软件编写程序进行仿真实验, 利用 NSGA-III 算法进行模型求解具体步骤如下:

step 1: 种群初始化。设置 NSGA-III 算法的最大迭代次数为 2 000, 种群规模为 500。

step 2: 将 3 个目标函数归一化, 快速非支配排序, 产生父代种群。

step 3: 交叉、变异, 产生子代种群。交叉和变异百分比均为种群规模的 50%, 变异概率、变异步长值分别设置为 0.02, 0.1, 经多次实验验证, 此时目标函数值较小, 故本仿真实验如此设置。

step 4: 子父代种群合并作为下一次迭代的新种群。

step 5: 3 个目标函数归一化, 快速非支配排序。

step 6: 关联参考点。记录此时最后一个非支配层中每个个体关联的参考点。

step 7: 基于参考点的个体选择机制选择父代种群, 交叉、变异, 产生子代种群。

step 8: 判断迭代次数。若大于 2 000 则退出循环, 第一个非支配层中的个体即为最优解, 则可得出 5 台火电机组 24 时段上的最优调度方案见图 3 及 3 个目标函数值见表 2; 否则重复 step 1~8。

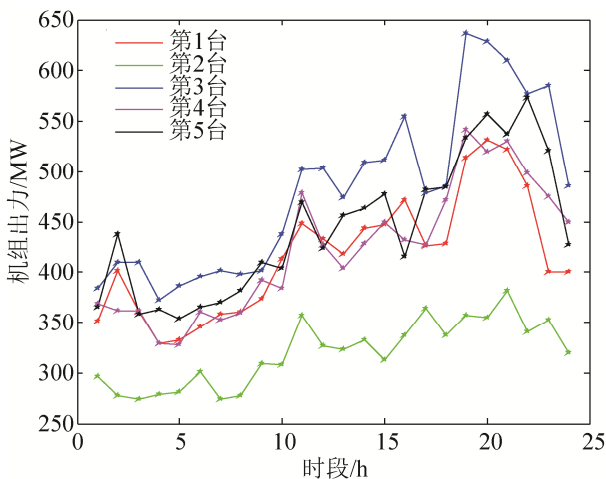


图 3 NSGA-III 算法下火电机组最优出力调度方案
Fig. 3 Optimal output scheduling scheme for thermal power generating units based on NSGA-III algorithm

表 2 考虑购电总费用的目标函数值
Tab. 2 Objective function values considering total electricity purchase cost

算法	总发电成本/\$	污染物排放总量/t	购电总费用/\$
NSGA-III	1.098 1e+06	10.425 7	1.231 7e+07
NSGA-II	1.158 8e+06	12.116 1	1.322 8e+07

3 结果分析

图 1 是电网负荷 24 时段预测值, 可见电网负荷在不同时间段的需求有很大差异; 图 2 是风电场 24 时段出力预测值, 显示了风电场出力随时间波动大, 故预测误差大。所以需要火电机组在 24 个时段的出力实时调度, 考虑环境经济因素的最优

动态调度方案如图 3 所示。因风电场出力水平较低, 而电网负荷需求较大, 由图 3 可见火电机组随时段变化的出力与电网负荷预测趋势相近。

表 2 中还给出了采用文献[9]的 NSGA-II 算法求解本问题的结果, 为了对比实验的科学性, 最大迭代次数、种群规模和变异概率设置为与采用 NSGA-III 算法求解时相同, 交叉和变异分布指数设置为 20(经验表明交叉和变异分布指数设置为 20 或 30 对搜索最优解最有效)。表 2 NSGA-III 算法和 NSGA-II 算法对比可得, NSGA-III 算法求得的系统总发电成本、污染物排放总量、购电总费用 3 个目标函数值均小于 NSGA-II 算法的结果, 即 NSGA-III 算法优化的调度方案优于 NSGA-II 算法, 所以 NSGA-III 算法在处理电力系统的三目标环境经济动态调度优化问题上具有比 NSGA-II 算法更加良好的性能。

为了进一步验证 NSGA-III 算法在处理 3 个及以上多目标优化调度问题上较 NSGA-II 算法的优异性, 因一般电力系统出力调度问题中常忽略购电费用也具有一定的适用性, 故以式(1)~(2)为目标函数, 式(4)~(12)为约束条件建立二目标环境经济动态调度模型, 分别采用 NSGA-III 算法和 NSGA-II 算法求解, 最优调度方案下的 2 个目标函数值见表 3。

表 3 不考虑购电总费用的目标函数值
Tab. 3 Objective function values without considering of total electricity purchase cost

算法	总发电成本/\$	污染物排放总量/t
NSGA-III	1.0987e+06	10.418 3
NSGA-II	1.1236e+06	11.214 2

表 3 与表 2 相比, 虽然 NSGA-III 算法优化方案中的目标函数值均比 NSGA-II 算法优化的结果小, 但是表 3 中 NSGA-III 算法比 NSGA-II 算法在对应目标函数值上小得更多, 即 NSGA-III 算法在优化目标为 2 个时不如优化目标为 3 个时的优异性明显。由此证明了 NSGA-III 算法在处理电力系统多目标环境经济动态调度优化问题上的优异性和有效性。

4 结论

以机组出力上下限、爬坡速率限制、旋转备用容量约束为不等式约束,以电力系统功率平衡为等式约束,建立了以发电总成本、污染物排放总量、购电总费用均最小为目标的动态调度模型,采用 NSGA-III 算法对模型求解,并与 NSGA-II 算法作比较,表明了 NSGA-III 算法在处理多目标动态环境经济调度问题上的有效性和优异性。

与以往研究相比,创新点有 3 方面:

(1) 选取的目标函数不同:兼顾资源消耗、经济效益和环境效益多个实际因素,全面考虑电力调度过程中的待优化问题,以发电总成本最小、污染物排放总量最小、购电总费用最小这 3 个目标为目标函数;

(2) 选取的模型求解算法不同:采用的 NSGA-III 算法,相比 NSGA-II 算法增加了目标函数归一化和关联参考点步骤,解集多样性和收敛快速性更加良好,更适合解决多个目标优化的问题,解决了以往不能直接处理或处理效果不好的多目标动态调度难题;

(3) 选取的数据时段不同:进行一天 24 时段上的整体动态调度,更具有实际意义。

在证明 NSGA-III 算法在解决 3 个及 3 个以上目标的电力调度优化问题上的优异性时,没有验证在 3 个以上多目标调度问题上与 NSGA-II 算法的对比结果,这将是下一步研究的内容。

参考文献:

- [1] 童纪新,朱颖,冯浩.考虑风电机组旋转备用的风电场多目标优化[J].人民长江,2015,46(10):19-23,33.
Tong Jixin, Zhu Ying, Feng Hao. Multi-objective Optimization of Wind Farm Considering Wind Turbine Rotating Standby[J]. People's Yangtze River, 2015, 46(10): 19-23, 33.
- [2] 杨凤惠,张向锋,陈舒婷,等.基于协同进化多目标优化算法的含风电场的电力系统经济调度研究[J].电力学报,2015,30(4):349-355.
Yang Fenghui, Zhang Xiangfeng, Chen Shuting, et al. Study on Economic Scheduling of Power System including Wind Farm based on Coevolutionary Multi-objective Optimization Algorithm[J]. Acta

Electrica Sinica, 2015, 30(4): 349-355.

- [3] 傅利,周步祥,林虹江,等.基于混合变量动态优化算法的含风电电力系统多目标动态优化调度[J].电测与仪表,2015,52(10):1-7.
Fu Li, Zhou Buxiang, Lin Hongjiang, et al. Multi-objective dynamic optimal scheduling for wind power systems based on hybrid variable dynamic optimization algorithm[J]. Electron Measurement and Instrument, 2015, 52(10): 1-7.
- [4] 孙伟卿,叶磊,涂轶昀.基于 GAMS 的电力系统有功无功综合优化[J].系统仿真学报,2018,30(8):3082-3091.
Sun Weiqing, Ye Lei, Tu Yiyun. Comprehensive Optimization of Active-reactive Power System based on GAMS[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3082-3091.
- [5] 翁振星,石立宝,徐政,等.计及风电成本的电力系统动态经济调度[J].中国电机工程学报,2014,34(4):514-523.
Weng Zhenxing, Shi Libao, Xu Zheng, et al. Dynamic economic scheduling of power systems with wind power costs in mind [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(4): 514-523.
- [6] Qian M, Qian M, Zhao D, et al. Optimal Power Dispatch Considering Deep Cycling and Carbon Emission for Wind-Coal Intensive Power Systems[C]. 2018 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). Beijing: IEEE, 2018: 134-139.
- [7] 赵文清,覃智补.采用改进型智能水滴算法的电力环境经济调度[J].系统仿真学报,2018,30(8):3213-3218.
Zhao Wenqing, Tan Zhibu. Power Environmental and Economic Dispatching Using Improved Intelligent Water Drop Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3213-3218.
- [8] Deb K, Jain H. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation (S1089-778X), 2014, 18(4): 577-601.
- [9] 常鹏.基于多目标优化的含风电场的电力系统经济调度[D].北京:华北电力大学,2012.
Chang Peng. Economic Scheduling of Power System including Wind Farm based on Multi-objective Optimization[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [10] 郝晓弘,何侃.基于 NSGA-II 算法的含风电场的电力系统动态经济调度[J].电子设计工程,2017,25(11):170-175.
Hao Xiaohong, He Kan. Based on the NSGA-II algorithm dynamic economic dispatch of power systems which contain wind farms[J]. Journal of Electronic Design Engineering, 2017, 25(11): 170-175.