

# 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

姜文, 严正

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 随着风力发电在电力系统中比重的持续增加, 在电力系统经济调度中需要考虑风电场的影响。提出了一种改进的粒子群优化算法, 用来求解含风电场的电力系统动态经济调度问题。优化模型中引入了正、负旋转备用约束, 以应对风电功率预测误差给系统调度带来的影响, 并在目标函数中计及了常规机组的发电效应带来的能耗成本。以经典的10机系统为算例, 通过与基本的粒子群算法和遗传算法进行比较, 验证了所提算法的可行性和有效性。该方法可以节省较多的发电成本, 具有较高的实用价值。

**关键词:** 风电场; 动态经济调度; 粒子群算法; 旋转备用

## Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on IPSO

JIANG Wen, YAN Zheng

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** With the increase of wind power in power systems, the influence of wind farms penetration should be considered in economic dispatch. In this paper, an improved particle swarm optimization (IPSO) is proposed for solving the problem of dynamic economic dispatch (DED). In this optimization model, the constraints of up spinning reserve and down spinning reserve are introduced to deal with the influence of wind power forecast errors on DED, and energy cost of routine units is considered in the objective function. The case studies are conducted based on a typical 10 units test power system. The effectiveness and feasibility of the proposed method are demonstrated by comparing its performance with that of other approaches. This proposed method can save much fuel cost and has high application value.

**Key words:** wind farm; dynamic economic dispatch; particle swarm optimization; spinning reserve

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0173-06

## 0 引言

近年来,随着能源问题和环境问题的日益突出,可再生能源尤其是风能得到了越来越广泛的发展。然而,由于风速的间歇性以及风力发电机的非线性,使得风电场的出力很难精确预测<sup>[1-2]</sup>。正是由于这种特点,使得风电场并网给系统的动态经济调度带来了巨大的挑战。传统的电力系统经济调度分为静态经济调度和动态经济调度<sup>[3-7]</sup>。静态经济调度是对电力系统的某个时间断面求取目标最优,只考虑静态约束,没有考虑不同时间断面之间的内在联系;而动态经济调度考虑了不同时间断面的耦合性,如发电机爬坡率等,因此计算过程比静态经济调度复杂,但计算结果更符合实际要求。由于风电场具有随机

性特点,因此含风电场的电力系统经济调度更适合采用动态模型。

目前,对于含风电场电力系统动态经济调度的研究还处于起步阶段,急需进一步深入。在含风电场的经济调度模型中,为保证系统的可靠性,需要采取相应的措施以应对风能随机波动性和间歇性对系统带来的影响。文献[8]使用遗传算法优化风电机组和传统发电机组的调度,且考虑风电机组的特性以及传统机组的阀点效应。文献[9]提出了一种含有风电场的经济调度模型,该模型是将风电机组加入到传统的经济调度模型中并用解析法求解。文献[10]使用了模糊最优化的方法解含有风电场和光伏发电系统的经济调度问题。考虑风电场影响以及机组爬坡率的一种随机经济调度模型在文献[2]中被提出。在文献[11-12]中,模型预测控制被用来解含有各种间歇性能源的调度问题。一种考虑风电穿透功率的双目标

基金项目: 国家 863 专项基金项目 (2007AA05Z458)

经济调度模型在文献[1,13]中被提出。文献[14]提出一种模糊模型用来求解含有风电场的动态经济调度问题。在文献[14]中,由于模糊模型中使用隶属度函数,所以有很大的人为因素。在以上的文献中,系统的正旋转备用、负旋转备用以及爬坡率约束并没有同时考虑,因此这些模型并不能准确地描述动态经济调度的实际情况。

本文提出了一种改进的 PSO 算法用于解含有风电场的 DED 模型。引入正、负旋转备用来应对风电场并网对 DED 模型的影响,同时在目标函数中考虑了常规机组的阀点效应。机组的爬坡率、运行约束、以及系统的有功平衡等在最优化模型中同时给予考虑。所提算法的可行性和有效性通过与基本 PSO 以及遗传算法进行比较得到验证。所有算例都是基于典型的 10 机测试系统。

## 1 数学模型

### 1.1 目标函数

由于风力发电不需要消耗日益减少的燃料,电力公司应该首先调度风电。含风电场的电力系统动态经济调度的目标是在满足负荷和运行约束的前提下,合理地分配电网中各发电机组的出力使得调度期间发电总成本最小。在汽轮机进气阀突然开启时出现的拔丝现象会在机组耗量曲线上叠加一个脉动效应,产生阀点效应。因此,在不考虑风电运行费用的情况下,优化目标的表达式为:

$$\min F = \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N F_{id}(P_{id}) \quad (1)$$

其中:  $F$  是整个调度运行的总体费用;  $D$  为调度运行时间;  $N$  为发电机个数;  $P_{id}$  为发电机  $i$  在时段  $d$  的出力;  $F_{id}(P_{id})$  为发电机  $i$  在出力为  $P_{id}$  时的费用。其中

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

其中:  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  是机组  $i$  燃料费用系数;  $e_i$ ,  $f_i$  为阀点效应系数。

### 1.2 约束条件

#### 1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{id} + WT_d - P_{Ld} = LD_d \quad (3)$$

式中:  $WT_d$ ,  $LD_d$  是  $d$  时段风电场出力以及系统负荷值;  $P_{Ld}$  为系统网损。

#### 2) 运行约束

$$P_i^{\min} \leq P_{id} \leq P_i^{\max} \quad (4)$$

式中,  $P_i^{\min}$ ,  $P_i^{\max}$  是发电机  $i$  的出力上下限。

#### 3) 旋转备用约束

两种旋转备用: 正旋转备用 ( $USR$ )、负旋转备用 ( $DSR$ ) 分别表示为

$$USR_d = \sum_{i=1}^N UR_{id} \geq LSR_d + WT_d \times wu\% \quad (5)$$

$$UR_{id} = \min(P_i^{\max} - P_{id}, T10 \times RU_i) \quad (6)$$

$$DSR_d = \sum_{i=1}^N DR_{id} \geq (\sum_{y=1}^{NW} W_y^{\max} - WT_d) \times wd\% \quad (7)$$

$$DR_{id} = \min(P_{id} - P_i^{\min}, T10 \times RD_i) \quad (8)$$

式中:  $USR_d$ ,  $DSR_d$  是时段  $d$  的正、负旋转备用;  $UR_{id}$ ,  $DR_{id}$  分别为各个机组  $i$  在时段  $d$  所提供的正、负旋转备用;  $wu\%$  表示风电出力预测误差对正旋转备用的需求;  $T10$  表示旋转备用响应时间 10 min;  $NW$  表示风机台数;  $W_y^{\max}$  表示风机  $y$  的最大出力;  $wd\%$  表示风电出力预测误差对负旋转备用的需求;  $RU_i$ ,  $RD_i$  分别表示机组  $i$  的上下爬坡率。

#### 4) 发电机爬坡率约束

$$P_{id} - P_{i(d-1)} \leq RU_i \times T60 \quad (9)$$

$$P_{i(d-1)} - P_{id} \leq RD_i \times T60 \quad (10)$$

式中,  $T60$  表示一个运行时段 1 h, 即 60 min。

## 2 改进的粒子群算法

PSO 算法已经广泛地应用于各种优化问题<sup>[15-17]</sup>。本文为了求解含风电场的 DED 模型, 提出了一种改进的 PSO 方法。为了使最优粒子能够将信息与其他粒子进行分享, 本文提出了信息分享策略。此外, 为了提高粒子的搜索能力, 提出了精英学习策略。

### 2.1 信息分享策略

在信息分享策略中, 使用式 (11) 来更新粒子的速度:

$$v_{i,d}^{k+1} = \begin{cases} \omega v_{i,d}^k + c_1 \cdot rand_1^k \cdot (pbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + \\ c_2 \cdot rand_2^k \cdot (gbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) & \text{if } rand \geq P_{si} \\ \omega v_{i,d}^k + c_1 \cdot rand_1^k \cdot (pbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + \\ c_2 \cdot rand_2^k \cdot (pbest_{r,d}^k - x_{i,d}^k) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_{si}$  表示信息分享率; 在粒子速度更新之前, 首先产生一个随机数, 如果此随机数大于等于  $P_{si}$ , 则粒子速度的更新将趋向于全局最优值, 否则利用  $pbest_{r,d}$  代替全局最优值。本文信息分享率被定义为:

$$P_{si} = \frac{(N_1 - 1) \times \exp(\frac{t-1}{IT_{\max}}) - 1}{4N} \quad (12)$$

式中:  $N_1$  表示所求问题的维数;  $t$  表示当前的仿真

次数;  $IT_{\max}$  表示最大仿真次数。

$pbest_{r,d}$  按下列原则产生:

- 1) 从所有的粒子中随机地选择三个;
- 2) 比较它们的适应值, 选最好的一个为  $pbest_{r,d}$ ;
- 3)  $pbest_{r,d}$  将会分享它的所有信息(各个维数)。

## 2.2 精英学习策略

和其他的粒子不同, 全局最优粒子没有更好的粒子为目标, 因此需要新的动力来推动它朝向潜在的最优解靠近。如果找到一个比全局最优粒子较优的解, 则用此解代替全局最优解, 然后其余的粒子跳出局部最优, 往新的全局最优解收敛。

在精英学习策略中, 设置参数  $k$  为全局最优解连续没有被更新的次数,  $Nk$  是参数  $k$  的阈值。当参数  $k$  值增加到  $Nk$  时, 精英学习策略开始起作用。本文精英学习策略中, 选取全局最优解的一维  $P^d$  (根据机组出力费用灵敏度大小选取) 作为扰动项。之所以仅仅选择一维, 是考虑到局部最优很有可能具有全局最优的部分结构, 因此这部分应该给予保护。精英学习策略通过 Bata 分布表示如下:

$$P^d = P^d + (X_{\max}^d - X_{\min}^d) \cdot \text{Betarnd}(\alpha, \beta) \quad (13)$$

搜索范围  $[X_{\min}^d, X_{\max}^d]$  是所求问题的上下限值。  $\text{Betarnd}(\alpha, \beta)$  是一个参数为  $\alpha$  和  $\beta$  的随机 Bata 分布。在 Bata 分布中, 均值  $\mu = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$ , 方差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \beta}{(\alpha + \beta)^2 \cdot (1 + \alpha + \beta)}}, \text{ 本文选 } \beta \text{ 为 } 1. \text{ 类似于}$$

一些时变的神经网络训练策略, 设  $\alpha$  随着仿真次数线性变化:

$$\alpha = \alpha_{\text{initial}} - (\alpha_{\text{initial}} - \alpha_{\text{final}}) \cdot \frac{t}{IT_{\max}} \quad (14)$$

式中:  $\alpha_{\text{initial}}$ 、 $\alpha_{\text{final}}$  分别是  $\alpha$  的初始值和终值, 根据经验取  $\alpha_{\text{initial}} = 1.0$ 、 $\alpha_{\text{final}} = 0.2$ , 精英学习策略流程图如图 1 所示。

## 3 算法流程

改进的粒子群算法将信息互享策略和精英学习策略相结合, 进而增强了搜索能力以及跳出局部最优的能力。利用所提算法求解含风电场的动态经济调度的流程如下:

### Step 1:

根据预测风速计算各个时段风电场的出力。

### Step 2: 初始化 IPSO 参数

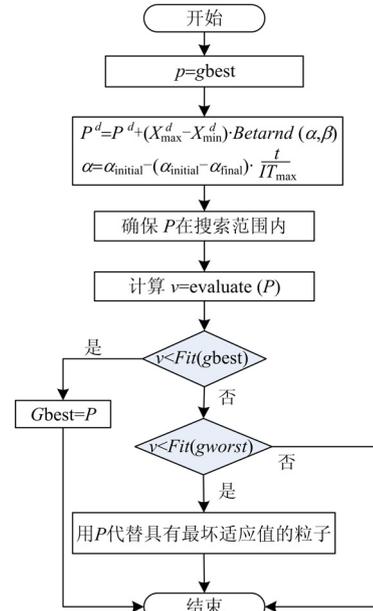


图 1 精英学习策略流程图

Fig.1 Flowchart of ELS for gbest

设置参数: 粒子总数  $J = 40$ , 最大仿真次数  $IT_{\max} = 2500$ , 本文使用动态惯性系数为:

$$\omega = \omega_{\text{initial}} - \frac{\omega_{\text{initial}} - \omega_{\text{final}}}{IT_{\max}} \times t \quad (15)$$

式中:  $t$  表示仿真次数;  $\omega_{\text{initial}}$ 、 $\omega_{\text{final}}$  分别表示惯性系数的初始值和终值, 分别设置为 0.9 和 0.4; 使用时变的加速度系数为:

$$c_1 = (c_{1f} - c_{1i}) \times \frac{t}{IT_{\max}} + c_{1i} \quad (16)$$

$$c_2 = (c_{2f} - c_{2i}) \times \frac{t}{IT_{\max}} + c_{2i} \quad (17)$$

式中:  $c_{1f}$ 、 $c_{1i}$ 、 $c_{2f}$  和  $c_{2i}$  分别是  $c_1$ 、 $c_2$  的终值和初始值; 从经验值来看, 当  $c_1$  从 2.5 到 0.5 变化、 $c_2$  从 0.5 到 2.5 变化时, 可以得到最优值;  $Nk$  取 4。

### Step 3: 产生初始值

随机的产生初始值  $x_j^k, j = 1, 2, 3, \dots, J$ , 每个粒子  $x_j^k$  包含发电机的有功出力, 是一个  $N \times D$  的矩阵, 其中每个元素  $P_{n,d}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $d = 1, 2, \dots, D$ ) 在整个可行域内均匀分布。

### Step 4: 评估每个粒子的适应值

适应值是评估每个粒子优劣的标准。式 (18) 描述了动态经济调度函数适应值:

$$FT(x_j^k) = F + \sum_{e=1}^6 (\lambda_e \sum_{d=1}^D CS_{j,e,d}^k) \quad (18)$$

式中:

$$CS_{j,1,d}^k = \left| \sum_{i=1}^N P_{i,d}^k + WT_d - LD_d \right| \quad (19)$$

$$\theta(q) = \begin{cases} q, & q \geq 0 \\ 0, & q < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$CS_{j,2,d}^k = \sum_{i=1}^N [\theta(P_{i,d}^{\min} - P_{i,d}) + \theta(P_{i,d} - P_{i,d}^{\max})] \quad (21)$$

$$CS_{j,3,d}^k = \sum_{i=1}^N \theta(P_{i,d} - P_{i,(d-1)} - RU_i \times T60) \quad (22)$$

$$CS_{j,4,d}^k = \sum_{i=1}^N \theta(P_{i,(d-1)} - P_{i,d} - RD_i \times T60) \quad (23)$$

$$CS_{j,5,d}^k = \theta(LSR_d + WT_d \times wu\% - \sum_{i=1}^N UR_{i,t}) \quad (24)$$

$$CS_{j,6,d}^k = \theta((\sum_{y=1}^{NW} W_y^{\max} - WT_t) \times wd\% - \sum_{i=1}^N DR_{i,t}) \quad (25)$$

其中:  $\lambda_e$  是约束惩罚因子;  $CS_{j,e,d}^k$  是惩罚函数。

**Step 5: 更新粒子速度与位置**

产生一个随机数  $r$ , 然后根据公式 (11)、(12) 更新粒子的速度, 再根据式 (26) 更新粒子的位置。

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1} \quad (26)$$

**Step 6: 精英学习策略**

判断  $k$  是否等于  $Nk$ , 如果是, 则采用精英学习策略使最优粒子跳出局部最优。

**Step 7: 结束判断**

如果满足结束条件, 程序停止, 否则由式 (15)、(16)、(17) 更新惯性系数和加速度系数, 然后循环 step 4~step 6, 直至程序结束。

### 4 算例及结果分析

为了证明所提算法的有效性, 本文采用典型的 10 机测试系统, 系统的负荷采用 6 个时段, 机组的参数可以通过文献[4]获得。风电场是由 100 台双馈异步风机 V90-2MW 组成, 风速数据来至东海风电场。风速采用滑动平均-自回归 (Auto Regressive Moving Average Model, ARMA) 模型预测, 在系统运行时段, 风电场出力如图 2 所示。

为了弥补风电场出力的随机波动性, 系统的正旋转备用随着风电场的增加而增加, 本文假设风电场的并网使得正旋转备用增加  $wu\% = 20$ , 负旋转备用增加  $wd\% = 40$ 。仿真经验表明, 当  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$  分别取 4 000, 3 000, 2 000, 2 000, 2 500 和 2 500 时, 可以获得最优解。IPSO 初始化见第三部分。

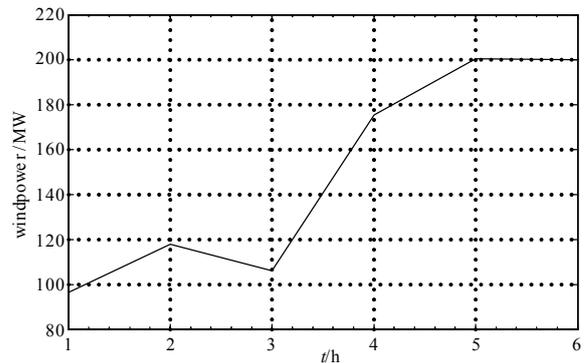


图 2 预测的风电场出力

Fig.2 The forecasted wind power output during 6 intervals

利用 IPSO 算法计算 50 次, 其最优结果如表 1 所示。

表 1 IPSO 算法最优结果

Tab.1 Best solution of the IPSO method

Unit number	各常规机组有功出力 / MW					
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6
Unit 1	150.01	157.02	274.32	312.55	387.50	166.44
Unit 2	145.45	135.02	177.61	135.90	154.38	167.09
Unit 3	121.21	144.39	121.72	204.99	77.52	293.29
Unit 4	64.64	102.16	67.30	120.00	243.59	140.96
Unit 5	157.69	121.85	117.51	92.97	93.22	207.33
Unit 6	125.59	122.64	158.19	108.03	123.40	120.31
Unit 7	22.87	23.85	57.26	54.64	55.78	125.77
Unit 8	63.68	78.11	47.41	89.08	47.09	111.64
Unit 9	33.46	52.11	75.68	57.52	42.51	40.17
Unit 10	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
Cost/\$	231 915.92					

表 1 给出了 50 次计算过程中的最优解。为了证明所提算法的有效性, 本文将所提的 IPSO 算法和基本的 PSO 算法以及遗传算法进行了比较。表 2 给出了基本 PSO 算法的最优解。比较表 1 和表 2, 可以看出所提算法明显地优于基本的 PSO 算法, 总费用从 243 091.45 \$ 降到 231 915.92 \$, 节省了 4.6%。表 3 给出了使用遗传算法所得到的最优解。通过比较可知, IPSO 算法使系统运行的总费用明显地降低, 节省了 8.85% 的总成本。

常规机组的阀点效应在动态经济调度模型中是一个重要的因素。在汽轮机进气阀突然开启时出现的拔丝现象会在机组耗量曲线上叠加一个脉动效应, 产生阀点效应, 这会增加机组耗能费用函数的非凸性。因此, 考虑阀点效应更符合实际情况。表 4 给出了没有考虑阀点效应的系统运行最优值。从表 1 和表 4 可知, 没有考虑阀点效应要比考虑阀点效应时, 系统总的运行费用少 5.23%, 因此, 如果不考虑阀点效应, 将会存在很大的误差。

表 2 基本 PSO 算法的最优解

Tab.2 Optimization solution with the basic PSO

Unit number	各常规机组有功出力/MW					
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6
Unit 1	150.34	223.73	179.68	286.96	249.34	167.25
Unit 2	148.62	139.45	141.16	190.16	192.82	436.77
Unit 3	80.33	73.34	152.80	139.37	125.04	85.43
Unit 4	60.00	77.01	206.16	112.37	286.99	106.04
Unit 5	109.89	82.78	81.73	181.24	147.53	233.66
Unit 6	95.43	97.37	117.58	90.46	80.58	156.12
Unit 7	103.53	101.40	63.02	48.76	43.36	83.66
Unit 8	75.74	87.84	75.56	50.59	66.63	70.89
Unit 9	60.72	54.23	79.40	76.02	32.40	33.18
Unit 10	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
Cost/ \$	243 091.45					

表 3 遗传算法最优解

Tab.3 Optimization solution with genetic algorithm

Unit number	各常规机组有功出力/MW					
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6
Unit 1	150.57	158.58	150.37	206.00	365.91	283.54
Unit 2	219.41	151.99	191.25	233.64	135.00	185.56
Unit 3	74.35	243.48	187.78	134.00	254.34	272.82
Unit 4	127.53	74.04	146.00	138.85	73.43	119.26
Unit 5	73.00	92.20	139.51	122.88	153.51	101.43
Unit 6	86.94	83.19	67.09	105.46	53.50	159.05
Unit 7	20.00	57.58	24.88	78.54	95.25	111.08
Unit 8	65.14	49.23	103.23	120.00	67.66	111.48
Unit 9	67.67	26.84	86.88	36.29	28.00	28.81
Unit 10	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
Cost/ \$	254 442.26					

表 4 没有考虑阀点效应时系统的最优值

Tab.4 Optimal solution without considering valve point effect

Unit number	各常规机组有功出力/MW					
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6
Unit 1	150.19	273.32	183.55	232.27	274.62	210.05
Unit 2	135.12	135.04	135.76	233.69	135.85	377.22
Unit 3	73.96	85.47	76.68	113.80	140.61	80.66
Unit 4	107.02	70.42	267.71	114.27	300.00	158.12
Unit 5	102.34	73.27	112.41	209.88	121.30	249.38
Unit 6	100.23	79.02	129.81	130.58	75.90	119.72
Unit 7	81.92	94.32	60.34	41.01	44.41	92.23
Unit 8	76.16	106.10	50.71	63.66	66.57	61.24
Unit 9	57.66	20.19	80.00	36.52	65.72	24.37
Unit 10	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
Cost/ \$	219 779.26					

由于风能具有随机性和间歇性, 本文引用正旋转备用和负旋转备用以保证系统的安全可靠。表 5

是在备用约束中没有考虑风能影响的最优解, 和表 1 比较可知系统总的运行费用从 231 915.92 \$ 降到 221 506.05 \$, 减少了 10 409.87 \$。由此可知, 应对风电不稳定是以增加常规机组运行费用为代价。

表 5 备用中没有考虑风能影响的最优值

Tab.5 Optimization results without considering the wind effect in the reserve constraint

Unit number	各常规机组有功出力/MW					
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6
Unit 1	150.43	154.48	196.17	221.06	183.09	154.81
Unit 2	166.87	153.00	208.10	265.03	291.38	362.35
Unit 3	104.84	78.24	110.03	93.16	275.54	292.88
Unit 4	67.30	60.37	158.42	117.94	89.42	181.29
Unit 5	96.54	92.40	175.11	182.02	127.20	98.67
Unit 6	60.90	125.86	62.86	103.41	78.55	57.56
Unit 7	119.02	122.03	57.04	77.51	30.47	101.63
Unit 8	77.47	82.39	53.29	52.23	94.49	75.18
Unit 9	41.24	68.36	75.98	63.34	54.55	48.62
Unit 10	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
Cost/ \$	221 506.05					

随着风能的增加, 常规机组必须提供较多的备用以便应对风能的波动, 从而保证系统的安全稳定运行, 这势必增加常规机组燃煤费用, 与此同时, 风能的增加分担了部分负荷, 从而减少了常规机组的燃煤费用。表 6 给出了不含风电场的系统最优值。从表 1 和表 6 可知, 加入风电场之后使得系统的运行费用从 275 204.71 \$ 下降到 231 915.92 \$, 节省了 15.763% 的费用。

表 6 不含风电场时的最优值

Tab.6 Optimization solution without considering wind power

Unit number	各常规机组有功出力/MW					
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6
Unit 1	179.15	210.14	211.44	431.05	326.18	263.12
Unit 2	179.23	156.36	289.15	323.63	187.39	260.10
Unit 3	126.63	203.74	104.26	112.25	80.82	196.43
Unit 4	98.44	91.06	198.38	65.98	191.16	164.10
Unit 5	88.48	89.67	81.86	89.94	194.52	116.99
Unit 6	70.41	96.76	57.46	58.68	98.39	115.94
Unit 7	23.26	20.96	83.43	20.25	26.99	64.75
Unit 8	98.72	47.71	51.00	47.24	78.69	114.91
Unit 9	20.28	20.70	20.04	26.65	40.56	76.67
Unit 10	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
Cost/ \$	275 204.71					

图 3 给出了风机加入台数所对应的费用节省曲线图。

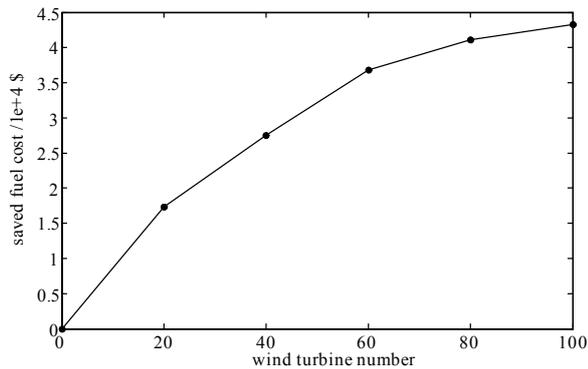


图3 不同风机台数所对应的费用节省曲线图

Fig.3 Curve of fuel cost saved under various number of wind turbines

## 5 结语

本文研究了含风电场的电力系统动态经济调度问题。在优化模型中,考虑了风电功率的波动性对动态经济调度旋转备用的约束,引入了正、负旋转备用约束。在优化目标中,计及了火电机组调点效应对发电成本的影响,使得模型更趋合理性。本文提出了一种改进的粒子群优化方法,用来解决风电场的电力系统动态经济调度问题。通过和基本的PSO以及遗传算法进行仿真比较,验证了所提算法的可行性和有效性,证明了本调度方案以及求解方法可以节省更多的发电成本,具有较高的实用价值。

## 参考文献

- [1] Wang L F, 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: 1-7.
- [2] Ciornei I, Kyriakides E. Heuristic solution for the nonconvex dispatch of generation in power systems with high wind power share[C]. //Power and Energy Society General Meeting. 2009.
- [3] Han X S, Gooi H B, Kirschen D S. Dynamic economic dispatch: feasible and optimal solutions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16 (1): 22-28.
- [4] 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.
- [5] Victoire T A A, Jeyakumar A E. Reserve constrained dynamic dispatch of units with valve-point effects[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1273-1282.
- [6] Abdelaziz A Y, Mekhamer S F, Kamh M Z, et al. A hybrid hopfield neural network-quadratic programming approach for dynamic economic dispatch problem[C]. //Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East. 2008: 565-570.
- [7] Gaing Z L, Ou T C. Dynamic economic dispatch solution using fast evolutionary programming with swarm direction[C]. //4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009. 2009: 1538-1544.
- [8] Liu Y, Shang T. Economic dispatch of power system incorporating wind power plant[C]. //Power Engineering Conference. 2007: 159-162.
- [9] Hetzer J, Yu D C, Bhattarai K. An economic dispatch model incorporating wind power[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23 (2): 603-611.
- [10] Liang R H, Liao J H. A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1665-1673.
- [11] Le X, Ilie M D. Model predictive dispatch in electric energy systems with intermittent resources[C]. //IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2008: 42-47.
- [12] Le X, Ilie M D. Model predictive economic/environmental dispatch of power systems with intermittent resources[C]. //Power and Energy Society General Meeting. 2009: 1-6.
- [13] Wang L F, Singh C. PSO-based multi-criteria economic dispatch considering wind power penetration subject to dispatcher's attitude[C]. //Power Symposium, NAPS 2006. 38th North American. 2006: 269-272.
- [14] C H Y, C J F, D X Z. Fuzzy modeling and optimization algorithm on dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (2): 22-26.
- [15] Zhan Z H, Zhang J, Li Y. Adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 2009, 39 (6): 1362-1381.
- [16] Ratnaweera A, Halgamuge S K, Watson H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 2004, 8 (3): 240-255.
- [17] Wang L F, Singh C. Reserve-constrained multiarea environmental/economic dispatch based on particle swarm optimization with local search[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009 (22): 298-307.

度下, 改进算法显著减少计算时间, 且具有良好的收敛性。

我国的电网近年来发展很快, 网络的容量不断增加, 网络的规模越来越大, 对可靠性评估的灵活性及计算速度的要求也越来越高, 因此, 对蒙特卡洛算法及其改进算法的研究将有更广泛的应用。

### 参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
GUO Yong-ji. Power system reliability evaluation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(6): 68-75.  
BIE Chao-hong, WANG Xi-fan. The application of Monte Carlo method to reliability evaluation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 68-75.
- [3] 任震, 谌军, 黄雯莹, 等. 大型电力系统可靠性评估的模型及算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 25-28.  
REN Zhen, CHEN Jun, HUANG Wen-ying, et al. Model and algorithm of reliability evaluation for large power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 25-28.
- [4] 温兴文, 张焰, 陈煜. 基于可靠性定量分析的输电网规划软件包开发及应用[J]. 供用电, 2006, 23(2): 22-24.  
WEN Xing-wen, ZHANG Yan, CHEN Yu. Based on the reliability of quantitative analysis in transmission network plan software package development and application[J]. Distribution & Utilization, 2006, 23(2): 22-24.
- [5] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 电力系统可靠性评估的混合方法研究[J]. 中国电力, 2001, 34(3): 25-28.  
BIE Chao-hong, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Study of hybrid method on power system reliability evaluation[J]. Electric Power, 2001, 34(3): 25-28.
- [6] 魏战线. 线性代数与解析几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.  
WEI Zhan-xian. Linear algebra and analytic geometry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [7] IEEE RTS task force of APM subcommittee. The IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans, 1996, 14(3): 1010-1020.
- [8] SONG Xiao-tong, TAN Zhen-yu. Power system reliability evaluation under reactive power adequacy constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 169-177.
- [9] 张硕, 李庚银, 周明. 基于序贯蒙特卡罗仿真的发输电系统充裕度评估算法[J]. 中国电力, 2009, 42(7): 10-15.  
ZHANG Shuo, LI Geng-yin, ZHOU Ming. Research on adequacy evaluation algorithm of generation and transmission systems based on the sequential Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power, 2009, 42(7): 10-15.
- [10] 赵渊, 沈智健, 周念成, 等. 大电网可靠性蒙特卡洛仿真的概率不确定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 61-67.  
ZHAO Yuan, SHEN Zhi-jian, ZHOU Nian-cheng, et al. Probabilistic uncertainty analysis of Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 61-67.
- [11] Billinton R, Tang X. Selected considerations in utilizing Monte Carlo simulation in quantitative reliability evaluation of composite power systems[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(20): 205-211.

收稿日期: 2010-08-05; 修回日期: 2010-09-08

作者简介:

黄殿勋(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统可靠性评估、智能电网及调度自动化等领域的研究工作;  
E-mail: huangdianxun@ha.sgcc.com.cn

张文(1985-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统调度自动化及电力系统可靠性评估等领域的研究工作。

(上接第 178 页 continued from page 178)

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

姜文(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新

能源、优化算法、电力系统可靠性分析; E-mail: clintonjiang@sjtu.edu.cn

严正(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析。