

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.06.004

基于免疫记忆粒子群优化算法的风火联合系统的 多目标优化调度

胡殿刚¹, 秦睿², 黄亭³, 杨俊², 马喜平²

(1. 国网甘肃省电力公司, 兰州 730050; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050;
3. 西安理工大学, 西安 710048)

摘要: 随着清洁可再生的随机性和间歇性风电大规模接入, 其对电力系统发电调度的影响不容忽视。考虑风电机组的环境效益和并网对系统安全造成的影响, 建立基于多目标机会约束规划模型, 将燃煤机组发电成本最小、污染气体排放量最小作为目标, 并计及系统的正、负旋转备用容量约束。使用风电出力的分布函数将随机模型转化为确定模型, 采用模糊化处理技术将多目标优化转化为单目标优化, 利用免疫记忆粒子群优化算法求解模型。最后, 以修改后 IEEE-30 节点系统模型测试算例 MATLAB 仿真为例, 通过算例仿真结果比较分析, 验证了所建立模型的正确性以及算法的快速性、有效性和收敛性。

关键词: 风电; 电力系统; 多目标; 机会约束规划; 模糊化处理技术; 免疫记忆粒子群优化算法

Wind Power Integrated with Thermal System Multi-objective Optimal Dispatch Based on Immune Memory Particle Swarm Optimization Algorithm

HU Diangang¹, QIN Rui², HUANG Ting³, YANG Jun², MA Xiping²

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With clean, renewable randomness and intermittent large-scale wind power connected into the power systems, the influences of it should be considered in power system dispatch. This paper establishes multi-objective chance constrained programming model considering environmental benefits of wind turbines and grid security caused by wind farm into power grid. Minimizing both the fuel cost and emission of atmospheric pollutants of thermal generators are considered as objective functions, the up spinning reserve and the down spinning reserve constraints are included in the model. In order to solve the model, this paper uses the cumulative distribution function of wind power to transform the stochastic optimization problem to a deterministic one, adopts fuzzy technology to transform the multi-objective optimization to a single objective optimization and applies IM-PSO. Finally, by comparing and analyzing the results of simulation, the revised model IEEE 30-bus system MATLAB simulation test studies have demonstrated the correctness of the proposed model and the rapidness, effectiveness, convergence of the proposed algorithm.

Key words: wind power; power system; multi-objective; chance constrained programming; fuzzy technology; immune memory particle swarm algorithm

0 引言

在全球生态环境持续恶化、化石能源逐渐枯竭

形势下, 风力发电作为一种零污染、零排放的可再生能源发电, 已经被列为国家重点扶持的绿色能源发电产业^[1], 是除水力发电外, 新能源发电中技术最成熟、成本较低、最具大规模开发和商业化发展前景的

收稿日期: 2014-12-02; 修回日期: 2015-01-04

基金项目: 国家电网科技项目 (5227221350BR, 5227221300XP); 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (2006CB200303, 2006CB2003056)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (5227221350BR, 5227221300XP), the National Basic Research Program (973 Program) (2006CB200303, 2006CB2003056).

发电方式。但是风速的波动性使得风电出力难以控制,风能资源不能得到充分利用,电力系统各环节运行成本上升,给电力系统发电调度带来了新的挑战,因此,建立灵活、可靠的大规模风电并网系统发电调度模型已成为当今热门研究课题。

随着环境污染问题越来越受到关注,仅考虑发电成本最小已不是一个很合理的准则。在满足系统发电约束条件下,考虑风电的随机性,将发电成本和污染气体排放量一起优化已经成为含风电场电力系统发电调度研究的趋势。文[2]中将发电调度视为旋转备用容量增加后的确定性调度问题,发电调度模型以经济效益为单一优化目标,未考虑燃煤机组的污染物排放对环境造成的负面影响以及风电随机性对系统安全的影响;文[3-5]中均采用保守的优化调度方法,为了应对风电的不确定变化,预留了100%的风电容量水平的旋转备用,这必然会造成备用容量的浪费,增加系统动态经济调度的发电成本;文[6]中建立了基于机会约束规划模型,模型求解时采用了遗传算法和随机模拟综合算法,但遗传算法容易收敛到局部最优解,计算量大,同时该调度方法没有考虑风电的社会经济价值;文[7-8]中均考虑到风电的随机性,约束条件以概率的形式表示,所建模型更加符合发电调度的实际情况;文[9]中建立了含风电场电力系统多目标发电调度模型,采用权重法将多目标优化转化为单目标优化问题,但权重系数往往难以选择。

文中针对风电出力的随机性和间歇性,建立了基于机会约束规划的数学模型,将燃煤机组发电成本最小、污染气体排放量最小作为目标,并且燃煤机组发电成本中计及燃煤机组的阀点效应成本。约束条件主要是系统功率平衡、机组爬坡约束、机组出力约束以及系统旋转备用约束,以概率的形式表示。在求解模型时,使用风电出力的分布函数将随机模型转化为确定模型,采用模糊化处理技术将多目标优化转化为单目标优化,利用免疫记忆粒子群优化算法(IM-PSO)对模型进行求解,该算法中综合随机模拟思想,利用统计学中的概率方法解决了机组启停问题,运用蒙特卡洛方法解决等式约束条件问题,提高了算法的收敛速度和搜索性能。最后以IEEE-30节点算例系统为例,结合九宫山风电场风速预测数据,利用MATLAB仿真,验证所提调度模型的可行性。

1 风电出力的概率模型

研究表明,短期风速概率特性多用正态分布描述,即 $v \sim N(\mu, \sigma_v^2)$, 则其概率密度函数为

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} \exp\left[-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma_v^2}\right] \quad (1)$$

式(1)中: v 为实际风速; μ 为预测风速的期望; σ 为预测风速的标准差。

P_{wt} 为风机在 t 时段的出力,其受风机轮毂高度处风速影响,两者之间的数学关系见式(2)。

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ \frac{P_{WR}}{v_R^3 - v_{in}^3} v^3 - \frac{v_{in}^3}{v_R^3 - v_{in}^3} P_{WR} & v_{in} \leq v < v_{R0} \\ P_{WR} & v_R \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: P_{WR} 为风机的额定功率; v_R 为额定风速; v_{in} 为切入风速; v_{out} 为切出风速。

假设风电场中每台风机是完全一样的,同时忽略尾流效应和电气损耗,风电场在 t 时段总出力为

$$P_{wt} = M P_{wt0} \quad (3)$$

式(3)中, M 为风机台数。

设 $\Phi(v)$ 为风机风速的概率分布函数,由式(1)、(2)可以求得风机输出功率的概率密度函数^[10]:

$$f(P_{wt}) = \begin{cases} 0 & P_{wt} < 0 \text{ 或 } P_{wt} > P_{WR} \\ \Phi\left(\frac{v_{in}-\mu}{\sigma_v}\right) + 1 - \Phi\left(\frac{v_{out}-\mu}{\sigma_v}\right) & P_{wt} = 0 \\ \Phi\left(\frac{v_{out}-\mu}{\sigma_v}\right) - \Phi\left(\frac{v_R-\mu}{\sigma_v}\right) & P_{wt} = P_{WR} \\ \frac{(P_{wt}+b)^{-2/3}}{3\sqrt{2\pi} \sigma_v a^{1/3}} \exp\left\{-\left[\left(\frac{P_{wt}+b}{a}\right)^{1/3} - \mu\right]^2 / 2\sigma_v^2\right\} & 0 < P_{wt} < P_{WR} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{式(4)中: } a = \frac{P_{WR}}{v_R^3 - v_{in}^3}; b = \frac{v_{in}^3}{v_R^3 - v_{in}^3} P_{WR}$$

2 基于机会约束规划的含风电场电力系统动态经济调度数学模型

由于风速的波动性,风电场出力是一个随机变量,进而导致燃煤机组出力是随机的,其发电费用、污染气体排放量都是随机的。传统的确定性建模方法已经不再适用,而采用机会约束规划建模能够很好的描述和解决随机变量带来的不确定性问题,如文[11]中尝试采用机会约束规划建模,并取得一定的成果。

2.1 目标函数

考虑环境因素建立数学模型已经成为一种趋势,如文[12-15]中均考虑环境影响因素建模,将环境成本考虑在目标函数中,更好地体现了风电的社会经济价值。

由于风电不消耗燃料,在不影响电力市场现有运行机制的前提下,采取风电优先调度,风电场发电全额上网,合理地分配电网中各燃煤机组的出力,实现燃煤机组发电成本与污染气体排放量最小。

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。考虑到阀点效应和燃料成本,数学模型^[2]为

$$f(P_{G_{it}}) = a_i + b_i P_{G_{it}} + c_i P_{G_{it}}^2 + e_i \sin[f_i(P_{G_{it}}^{\min} - P_{G_{it}})]l; \quad (5)$$

$$F_1 = \min \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N f(P_{G_{it}}). \quad (6)$$

式(5)、(6)中: $f(P_{G_{it}})$ 为燃煤机组*i*在*t*时段的发电成本; a_i, b_i, c_i 分别为燃料费用系数; e_i, f_i 为阀点效应系数; $P_{G_{it}}$ 为机组*i*在*t*时段的发电出力; F_1 为*T*时间段*N*台燃煤机组发电成本;*T*为周期小时数;*N*为燃煤机组台数。

文[11]中认为机组排污量 $W_{G_{it}}$ 与其发电出力 $P_{G_{it}}$ 呈二次线性关系,即:

$$W(P_{G_{it}}) = \alpha_i + \mu_i P_{G_{it}} + \gamma_i P_{G_{it}}^2. \quad (7)$$

式(7)中, $\alpha_i, \mu_i, \gamma_i$ 为火电机组*i*的排放系数。

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N W(P_{G_{it}}). \quad (8)$$

式(8)中, F_2 为*T*时间段*N*台燃煤机组的污染物排放量。

2.2 约束条件

风电机组出力是一个随机变量,这会使火电机组出力、发电成本及其上下旋转备用容量也是随机变量,因此目标函数的约束条件中含有随机变量,考虑到所做决策在不利情况发生时可能不满足约束条件而采取一种措施,将具有不确定性的约束条件以概率的形式表现,使其满足在一定的置信水平区间即可,其约束条件构建为

1)系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{G_{it}} + P_{Wt} = P_{Lt}. \quad (9)$$

式(9)中: P_{Lt} 为系统在*t*时段的发电负荷; P_{Wt} 为风电机组在*t*时段的输出功率。

以概率的形式表示为

$$P\left\{\sum_{i=1}^N P_{G_{it}} + P_{Wt} = P_{Lt}\right\} \geq \lambda_1. \quad (10)$$

式(10)中, λ_1 为满足功率平衡约束的置信水平。

2)机组约束

$$P_{G_{it}}^{\min} \leq P_{G_{it}} \leq P_{G_{it}}^{\max}. \quad (11)$$

式(11)中: $P_{G_{it}}^{\min}, P_{G_{it}}^{\max}$ 分别为发电机组出力的下限和上限。

3)系统的上、下旋转备用容量约束^[7]

①正旋转备用容量约束

$$P\left\{\sum_{i=1}^N (P_{G_{it}}^{\max} - P_{G_{it}}) \geq z_u P_{Lt} + \omega_u P_{Wt}\right\} \geq \lambda_2. \quad (12)$$

②负旋转备用容量约束

$$P\left\{\sum_{i=1}^N (P_{G_{it}} - P_{G_{it}}^{\min}) \geq z_d P_{Lt} + \omega_d P_{Wt}\right\} \geq \lambda_3. \quad (13)$$

式(12)、(13)中: z_u, z_d 分别为在*t*时段负荷预测误差对系统上、下旋转备用的需求系数,一般取5%; ω_u, ω_d 分别为在时段风电场出力对系统的上、下旋转备用的需求系数,一般取7%; λ_2, λ_3 为满足上下旋转备用约束的置信水平。

4)机组爬坡速率约束

$$D_{it} \leq P_{G_{it}} - P_{G_{it}(t-1)} \leq U_{it}. \quad (14)$$

式(14)中: D_{it}, U_{it} 为时段*t*($t \in [1, T]$)时火电机组*i*($i \in [1, N]$)的有功出力下降和上升速率。

3 优化调度模型的求解

3.1 模型的确定性转化

约束条件式(10)–(13)均含有随机变量 P_{Wt} ,根据式(4),风电场出力服从正态分布 $P_{Wt} \sim N(\bar{P}_{Wt}, \sigma_W)$,平均值为 $\bar{a} - b$ 即 $\bar{P}_W, \bar{\nu}$ 为该地区平均风速。偏差为 $a\sigma_v$,

那么 $\frac{P_{Wt} - \bar{P}_{Wt}}{\sigma_W} \sim N(0, 1)$,系统功率平衡约束条件 $\sum_{i=1}^N P_{G_{it}} + P_{Wt} = P_{Lt}$,利用粒子群优化算法随机产生的常规机组出力很难满足条件,运用统计学中的极限思想可以

解决此问题。令 $0 \leq \sum_{i=1}^N P_{G_{it}} + P_{Wt} - P_{Lt} < \xi, \xi$ 为极小数,式

(10)可以转化为

$$P\left\{0 \leq \sum_{i=1}^N P_{G_{it}} + P_{Wt} - P_{Lt} < \xi\right\} = \int_{P_{Lt} - \sum_{i=1}^N P_{G_{it}}}^{\xi + P_{Lt} - \sum_{i=1}^N P_{G_{it}}} f(P_{Wt}) dP_{Wt} \geq \lambda_1. \quad (15)$$

式(12)可以转化为

$$P\left\{\sum_{i=1}^N (P_{G_{it}}^{\max} - P_{G_{it}}) \geq z_u P_{Lt} + \omega_u P_{Wt}\right\} = P\left\{P_{G_{it}} \leq \frac{\sum_{i=1}^N (P_{G_{it}}^{\max} - P_{G_{it}}) - z_u P_{Lt}}{\omega_u}\right\} = \Phi\left(\frac{\sum_{i=1}^N (P_{G_{it}}^{\max} - P_{G_{it}}) - z_u P_{Lt}}{\omega_u} - \bar{P}_{Wt}\right) \geq \lambda_2. \quad (16)$$

式(13)可以转化为

$$P\left\{\sum_{i=1}^N (P_{G_{it}} - P_{G_{it}}^{\min}) \geq z_d P_{Lt} + \omega_d P_{Wt}\right\} = P\left\{P_{Wt} \leq \frac{\sum_{i=1}^N (P_{G_{it}} - P_{G_{it}}^{\min}) - z_d P_{Lt}}{\omega_d}\right\} =$$

$$\Phi\left(\frac{\sum_{i=1}^N (P_{Git} - P_{Git}^{\min}) - z_d P_{Lt}}{\omega_d} - \frac{\overline{P_{Wt}}}{\sigma_w}\right) \geq \lambda_3. \quad (17)$$

$\Phi\left(\frac{P_{Wt} - \overline{P_{Wt}}}{\sigma_w}\right)$ 为风电场出力的概率分布函数, 通过查标准正态分布表可以得到。

3.2 多目标优化调度模型的模糊化处理

模糊化处理通过确定各目标的隶属度函数将多目标优化问题转化为非线性单目标优化问题求解^[13]。根据优化调度模型极小化型的特点, 文中选用降半直线形为燃煤机组燃料成本模型和污染气体排放量模型的隶属度函数:

$$\mu[F(x)] = \begin{cases} 1 & F(x) \leq \min F(x) \\ \frac{\max F(x) - F(x)}{\max F(x) - \min F(x)} & \min F(x) \leq F(x) \leq \max F(x) \\ 0 & F(x) \geq \max F(x) \end{cases} \quad (18)$$

设定目标函数 F_1, F_2 一个期望达到的参考隶属度值 μ_m , 则将双目标函数转化为单目标函数数学模型:

$$\begin{cases} F = \min \{ \max | \mu_m - \mu[F(x)] | \} & m=1, 2 \\ \text{s.t. } \mu[F_m(x)] \geq \mu_m \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中: $\text{s.t. } \mu[F_m(x)] \geq \mu_m$, 约束条件为式(14)–(17)。

3.3 优化调度模型的求解方法

文中算法流程图见图 1, 在模型模糊化处理的基础上, 采用粒子群优化算法进行模型求解, 将机组的优化调度分为两部分: 机组组合优化和负荷分配优化^[16], 使用机组机会停机策略解决了机组的启停问题。粒子群优化算法进行负荷分配, 由于粒子群优化算法容易陷入局部最优, 把免疫系统的免疫信息处理机制引入到粒子群优化算法中, 给出了免疫粒子群优化算法^[9]。

粒子群优化算法的关键就是粒子的初始化, 粒子速度选择不好就会使粒子偏离全局最优点, 最后无法运行, 因此每一维粒子的速度都会被限制在一个最大速度 $v_{\max}$ 内(通过大量实验, 粒子群的最大速度被限制在 10% 的最大波动范围内)。粒子的位置一般也应该满足一定的约束条件, 文中所研究的含风电场电力系统动态经济调度是一个多变量, 多约束的问题, 而随机产生的数据很难完全满足所有条件。以前的许多学者都是将约束条件以罚函数的形式引入到目标函数来淘汰不可行解^[17], 得到最优解, 但考虑到动态经济调度约束条件的复杂性, 仅引用罚函数的计算效率、优化结果已经不能满足电力系统经济调度要求。使用风电出力的分布函数处理约束条件, 采用启发式调整策略对不满足约束条件的

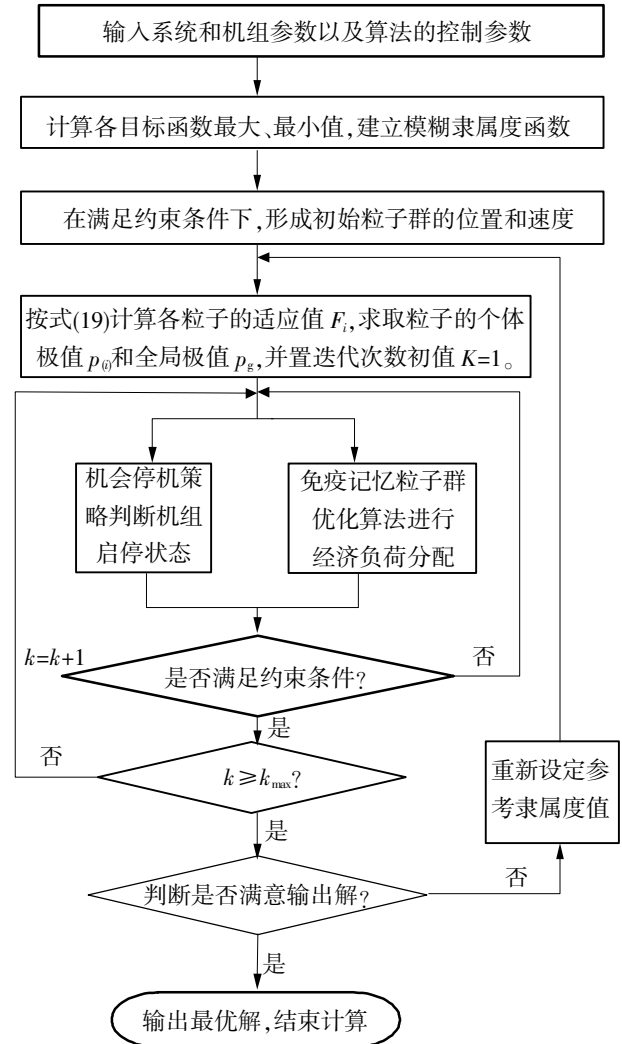


图 1 基于疫苗记忆粒子群优化算法求解流程图

Fig. 1 The flow chart of particle swarm optimization algorithm based on vaccine memory

粒子进行修正。

4 算例结果与分析

为了验证文中所建模型的合理性和提出的算法的有效性, 以修改后的 IEEE-30 节点算例系统仿真为例, 系统节点图见文[13]中的图 2。假设风电场共有 45 台额定功率为 1 MW 的风力发电机, 不考虑风力发电机组旋转备用及其强迫停运的可能性, 风力发电机全额投网, 风电场在节点 25 处接入系统, 风机风速预测数据参考九宫山风电场风机数据, 风机切入风速 v_{in} 为 3 m/s; 切出风速 v_{out} 为 25 m/s; 额定风速 v_R 为 15 m/s; 平均风速 $\bar{v}$ 为 6.859 m/s; 标准偏差 σ_v 为 0.5。

调度周期为一天, 分为 24 个时段, 运用 MATLAB7.8 编程仿真软件, 对上述模型和算法进行验证。参考文[6, 13]火电机组的相关参数见表 1, 日负荷预测数据见表 2, 取功率基值 100 MV·A。

表 1 不同置信水平下的最优解
Table 1 The optimal solution under
different confidence level

置信水平	发电成本/\$	污染气体排放量/t	风电出力/p.u.
$\lambda_2=\lambda_3=0.99$	48 935	83.027 5	4.247 7
$\lambda_2=\lambda_3=0.80$	48 875	82.217 9	4.467 7
$\lambda_2=\lambda_3=0.70$	48 692	81.233 9	4.800 3

表 2 常规机组参数

Table 2 The conventional unit parameter

机组	$a_i/$ (\$·h ⁻¹)	$b_i/$ [\$·(MW·h ⁻¹) ⁻¹]	$c_i/$ [\$·(MW ² ·h ⁻²) ⁻¹]	$e_i/$ (\$·h ⁻¹)	$f_i/$ (rad·MW ⁻¹)	$P_{\max i}/$ p.u.	$P_{\min i}/$ p.u.	$D_i/$ (p.u.·h ⁻¹)	$U_i/$ (p.u.·h ⁻¹)	α_i	β_i	γ_i
1	786.798 8	38.539 7	0.152 4	450	0.041	2.0	0.50	-0.50	0.50	5.23	-4.07	5.72
2	945.633 2	46.159 1	0.105 8	600	0.036	1.0	0.25	-0.30	0.30	4.78	-4.63	5.36
3	1 049.997 7	40.396 5	0.028 0	320	0.028	0.6	0.15	-0.15	0.15	4.26	-5.10	4.64
4	1 243.531 1	38.305 5	0.035 4	260	0.052	0.8	0.20	-0.20	0.20	5.45	-3.92	6.49
5	1 658.569 6	36.327 8	0.021 1	280	0.063	0.4	0.10	-0.15	0.15	4.09	-5.55	4.59
6	1 356.659 2	38.270 4	0.017 9	310	0.048	0.4	0.10	-0.15	0.15	4.15	-5.32	4.89

为使粒子能够更好地在全局范围搜索最优解,采用异步时变的学习因子,使两个学习因子在优化过程中随时间进行不同的变化。

$$c_1=(c_{1f}-c_{1i})\frac{k}{K}+c_{1i} \quad (21)$$

$$c_2=(c_{2f}-c_{2i})\frac{k}{K}+c_{2i} \quad (22)$$

式(21)、(22)中: c_{1i} 、 c_{1f} 分别为 c_1 的初始值和最终值,是两个常数, $c_{1i}=2.5$, $c_{1f}=0.5$; c_{2i} 、 c_{2f} 分别为 c_2 的初

免疫粒子群优化算法的参数:种群规模 N 为 40,最大迭代次数 $K=100$,在迭代过程采用一种逐步递减惯性系数的方式

$$\omega=\omega_{\max}-\frac{\omega_{\max}-\omega_{\min}}{K}\times k \quad (20)$$

式(20)中: k 、 K 分别为当前的迭代次数和总的迭代次数; $\omega_{\max}=0.9$; $\omega_{\min}=2.5$ 。

始值和最终值是两个常数, $c_{2i}=0.5$, $c_{2f}=2.5$ 。

取 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 置信水平均为 0.99,通过多次程序运行实验,研究得出粒子之间最小距离取 10~15 m,粒子替换概率取 0.6,得出最优解。

表 3 为优化调度中考虑常规机组污染气体排放量模型前后 2 种情况下,常规机组和风电场输出有功功率对比。常规机组接入对环境污染因素的发电成本为 48 935.334 3 \$,反之发电成本为 35 995.444 5 \$,由此可看出,考虑该因素加大了发电成本。

表 3 负荷数据

Table 3 The load data

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
负荷/p.u.	2.699 0	2.500 0	2.500 0	3.110 0	3.710 0	3.710 0	3.699 0	3.599 0	3.899 0	3.910 0	3.455 0	2.730 0
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
负荷/p.u.	2.730 0	2.730 0	2.689 0	2.700 0	2.901 0	2.934 0	2.934 0	3.910 0	3.715 1	3.452 0	3.069 0	2.685 0

图 2 为考虑污染气体排放量模型前后风电场各时段出力情况对比。从图 2 可以看出,线 2 在 24 个时段内总的出力高于线 1,反映了风电的清洁与环保,风电场的接入给社会带来了良好的环境效益,减少了污染气体的排放对大气的污染。

文中为了说明免疫记忆粒子群优化算法求解机会约束规划模型的有效性和优越性,采用粒子群优化算法作为参考,比较两种方法的收敛速度和搜索性能,结果见图 3。

基于 IM-PSO 算法的程序运行时间 1 677 s,目标函数最优值 0.08,基于 PSO 算法的程序运行时间 3 677 s,目标函数最优值 0.09,在置信水平相同的情况下,IM-PSO 算法在第 43 次时已趋近于最小值,而 PSO 算法在第 58 次才趋近于最小值,收敛速度远远

不如 IM-PSO 算法,且其最优解比 IM-PSO 算法的结果大,表明搜索性能和收敛性能皆不如后者。

改变置信水平 λ_2 、 λ_3 的值,风火联合系统的调度方案将随着改变,发电成本、污染气体排放量随之变化,见表 1。

考虑常规机组污染气体排放量模型前后常规机组和风电场输出有功功率对比见表 4。由表 4 可以看出,随着满足系统正负旋转备用置信水平的下降,最小发电成本随之下降,污染气体排放量随之下降,风电机组出力比重升高,虽然有利于经济性和环保性,但同时也加大了电力系统承担不确定性的风险。

5 结语

考虑风电随机性和间歇性,建立风火联合系统

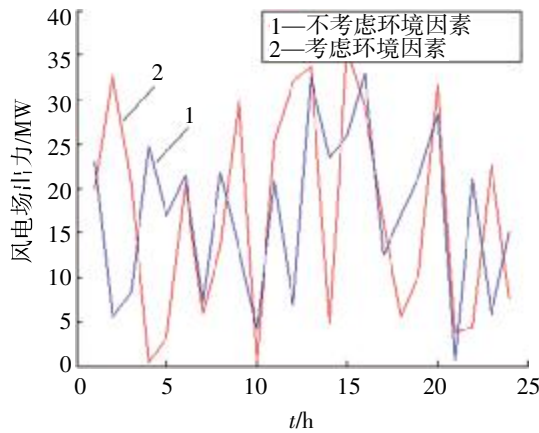


图2 考虑污染气体排放量模型前后风电场各时段出力情况对比
Fig. 2 The contrast of wind farm output in each period before and after considering the model of pollution emissions

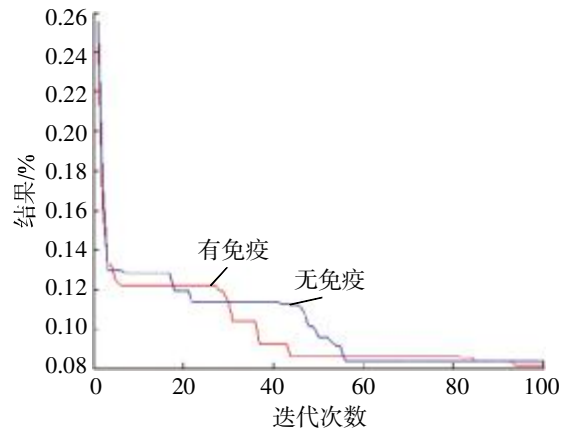


图3 PSO算法和IM-PSO算法性能比较
Fig. 3 The performance comparison of PSO algorithm and IM-PSO algorithm

表4 考虑常规机组污染气体排放量模型前后常规机组和风电场输出有功功率对比

Table 4 The contrast of conventional units and wind farm output active power before and after considering the model of pollution emissions

时段	机组出力(考虑环境因素)/p.u.							机组出力(不考虑环境因素)/p.u.						
	机组1	机组2	机组3	机组4	机组5	机组6	风机	机组1	机组2	机组3	机组4	机组5	机组6	风机
1	1.461 0	0.291 1	0.000 0	0.254 3	0.365 1	1.461 0	0.199 9	1.067 9	0.753 1	0.000 0	0.251 6	0.327 5	0.233 7	0.229 3
2	0.778 3	0.887 0	0.224 3	0.000 0	0.100 8	0.778 3	0.328 2	0.689 9	0.598 6	0.347 9	0.249 7	0.194 9	0.155 4	0.054 8
3	1.127 5	0.729 1	0.000 0	0.275 7	0.000 0	1.127 5	0.205 2	0.701 0	0.397 1	0.534 6	0.510 9	0.168 2	0.123 8	0.084 2
4	1.814 6	0.795 3	0.000 0	0.000 0	0.360 3	1.814 6	0.004 0	1.022 9	0.665 6	0.365 5	0.241 0	0.297 4	0.199 2	0.247 2
5	1.811 1	0.818 8	0.541 3	0.246 8	0.106 8	1.811 1	0.032 1	1.850 7	0.259 6	0.255 0	0.792 2	0.000 0	0.342 4	0.169 0
6	1.997 8	0.318 7	0.568 1	0.446 6	0.174 8	1.997 8	0.204 0	1.470 9	0.946 3	0.245 4	0.413 4	0.330 1	0.246 6	0.214 4
7	1.870 4	0.594 8	0.490 5	0.252 9	0.257 5	1.870 4	0.223 7	1.396 1	0.593 4	0.366 0	0.495 0	0.296 6	0.387 3	0.071 9
8	1.990 9	0.870 2	0.000 0	0.230 1	0.269 0	1.990 9	0.059 9	1.731 4	0.631 4	0.252 8	0.200 9	0.230 5	0.324 3	0.218 6
9	1.888 0	0.290 7	0.450 4	0.704 1	0.156 7	1.888 0	0.135 4	1.739 8	0.573 9	0.364 0	0.552 8	0.329 8	0.204 5	0.130 6
10	1.890 4	0.613 5	0.392 2	0.680 1	0.111 5	1.890 4	0.301 1	1.792 6	0.794 0	0.499 4	0.000 0	0.364 4	0.126 5	0.041 8
11	1.346 4	0.372 4	0.417 4	0.650 3	0.259 5	1.346 4	0.004 9	1.691 6	0.771 4	0.172 7	0.559 8	0.105 0	0.000 0	0.208 1
12	0.638 1	0.750 4	0.348 3	0.216 8	0.331 9	0.638 1	0.253 5	1.529 3	0.385 6	0.171 6	0.217 4	0.112 2	0.000 0	0.068 3
13	1.250 5	0.811 5	0.000 0	0.000 0	0.172 0	1.250 5	0.320 1	0.647 7	0.685 4	0.493 8	0.375 6	0.331 2	0.000 0	0.324 6
14	1.979 5	0.000 0	0.000 0	0.585 5	0.000 0	1.979 5	0.337 4	1.201 5	0.391 2	0.588 4	0.308 9	0.000 0	0.000 0	0.234 6
15	1.413 4	0.396 7	0.000 0	0.270 6	0.150 0	1.413 4	0.048 6	0.537 5	0.408 1	0.518 3	0.695 4	0.300 4	0.000 0	0.259 5
16	1.530 1	0.403 4	0.000 0	0.237 4	0.000 0	1.530 1	0.356 0	0.701 4	0.512 6	0.329 8	0.710 4	0.310 1	0.000 0	0.329 3
17	1.357 1	0.000 0	0.527 8	0.412 4	0.296 1	1.357 1	0.291 6	1.395 1	0.406 8	0.000 0	0.760 6	0.000 0	0.000 0	0.124 0
18	1.198 8	0.473 2	0.499 1	0.290 2	0.313 6	1.198 8	0.160 3	1.237 9	0.676 8	0.000 0	0.660 2	0.310 1	0.000 0	0.170 7
19	0.705 8	0.928 3	0.585 3	0.284 6	0.151 7	0.705 8	0.055 3	1.104 6	0.843 3	0.237 0	0.234 7	0.348 5	0.000 0	0.214 0
20	1.940 5	0.375 7	0.288 8	0.561 4	0.306 3	1.940 5	0.103 2	1.532 1	0.494 6	0.542 5	0.769 9	0.374 5	0.000 0	0.284 2
21	1.910 4	0.264 6	0.526 5	0.777 6	0.000 0	1.910 4	0.316 2	1.771 1	0.550 0	0.313 2	0.274 2	0.364 8	0.141 7	0.006 8
22	1.896 1	0.850 0	0.213 4	0.000 0	0.205 9	1.896 1	0.037 5	1.362 9	0.542 6	0.440 1	0.470 1	0.310 3	0.230 1	0.209 9
23	1.399 2	0.000 0	0.504 8	0.681 4	0.118 4	1.399 2	0.043 4	0.848 0	0.456 1	0.353 5	0.636 3	0.376 0	0.117 0	0.057 7
24	1.270 1	0.694 1	0.000 0	0.223 7	0.136 8	1.270 1	0.226 2	1.192 2	0.357 5	0.292 1	0.550 6	0.223 6	0.000 0	0.151 0

的随机优化调度模型,采用免疫记忆粒子群优化算法求解模型,基本保持了粒子群优化算法简单、容易实现的特点,而且增强了粒子群优化算法的全局寻优能力,加快了算法的进化速度,提高了收敛精度,避免了粒子群优化算法易陷入局部最优的问题。通过IEEE-30标准算例验证表明IM-PSO算法能够满足实时性的要求,所建立的模型合理、有效,对实际电力系统大规模风电的实时消纳具有一定的参考价值和指导意义。

参考文献:

- [1] 蒙万兴. 含风电场电力系统条件风险约束节能调节[D]. 长沙:长沙理工大学,2012.
MENG Wanxing. Power system containing wind farm risk constraint energy regulation[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2012.
- [2] 周 玮,彭 昱,孙 辉. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(25): 13-18.
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 13-18.
- [3] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化,2006,30(2): 22-26.
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. 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.
- [4] 高 鹰,谢胜利. 免疫粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用,2004(6): 4-6.
GAO Ying, XIE Shengli. Particle swarm optimization algorithms with immunity [J]. Computer Engineering and Applications, 2004(6): 4-6.
- [5] LEE T Y. Optimal spinning reserve for a wind-thermal power system using EIPSO [J]. IEEE Transactions on Power System, 2007, 22(4): 1612-1621.
- [6] 孙元章,吴 俊,李国杰. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-48.
SUN Yuanzhang, WU Jun, LI Guojie. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed for ecasting and stochastic programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 41-48.
- [7] 雷亚洲,王伟胜,印永华. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报,2002,22(5): 33-36.
LEI Yazhou, WANG Weisheng, YIN Yonghua. Wind power penetration limit calculation based on chance constrained programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 32-36.
- [8] 周 玮,孙 慧,顾 宏,等. 计及风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 47-55.
ZHOU Wei, SUN Hui, GU Hong, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk reserve constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 47-55.
- [9] 张晓辉,董兴华,钟嘉庆. 考虑风险成本的含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 华东电力,2012,40(3): 49-52.
ZHANG Xiaohui, DONG Xinghua, ZHONG Jiaqing. Study on dynamic economic dispatching for wind power integrated system based on risk cost [J]. East China Electric Power, 2012, 40(3): 49-52.
- [10] 杨 楠,王 波,刘涤尘,等. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法 [J]. 电工技术学报,2013,28(11): 231-238.
YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 231-238.
- [11] CARDELL J B, ANDERSON C L. Estimating the system costs of wind power forecast uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 700-706.
- [12] 邱 威,张建华,刘 念. 含大型风电场的环境经济调度模型与解法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(19): 8-16.
QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian. Model and solution for environmental/economic dispatch considering large-scale wind power penetration [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 8-16.
- [13] 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-en vironmental efficiency [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 10-17.
- [14] 田 廓,曾 鸣,鄢 帆,等. 考虑环保成本和风电接入影响的动态经济调度模型[J]. 电网技术,2011,35(6): 55-59.
TIAN Kuo, ZENG Ming, YAN Fan, et al. A dynamic economic scheduling model considering environmental protection cost and impact of connecting wind power to power grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 55-59.
- [15] 袁铁江,晁 勤,吐尔逊·伊不拉音,等. 面向电力市场的含风电电力系统的环境经济调度优化[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 131-135.
YUAN Tiejiang, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin, et al. Electricity market-oriented optimization of environmental economic dispatching for power grid containing wind power [J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 131-135.

(下转第 30 页)

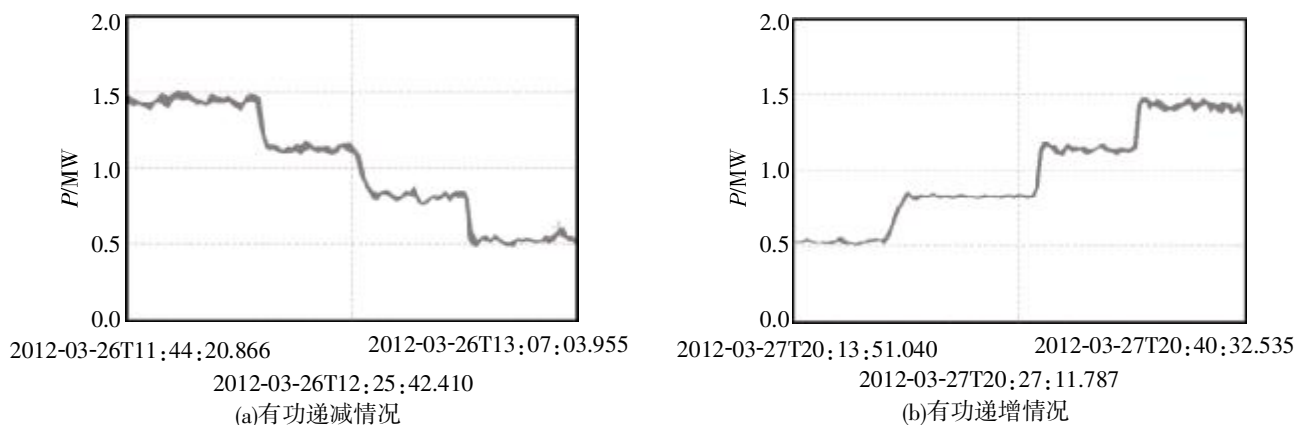


图6 风电场有功功率设定值控制能力录波图

Fig. 6 The wave record of wind active power set point control

- [2] Q/GDW 392—2009 风电场接入电网技术规定[S].2009.
Q/GDW 392—2009 Technical rule for connecting wind farm into power grid[S].2009.
- [3] Q/GDW 630—2011 风电场功率调节能力和电能质量测试规程[S].2011.
Q/GDW 630—2011 Measurement standard of wind farm power regulation capability and power quality[S].2011.
- [4] 甘肃电网风电调度管理规定 (试行)[EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-646530777665.html>, 2013-07-12.
- [5] 李雪明,行舟,陈振寰,等.大型集群风电有功智能控制系统设计[J].电力系统自动化,2010,34(17):59-63.
LI Xueming, XING Zhou, CHEN Zhenhuan, et al. Design of large clusters of wind power active intelligent control

system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (17): 59-63.

李臻(1978—),男,高级工程师,主要研究方向为新能源发电及并网技术。

胡殿刚(1975—),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化。

董开松(1966—),男,硕士,高级工程师,国网工程技术专家,主要研究方向为新能源发电及并网技术。

杨俊(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事新能源并网技术研究工作。

沈渭程(1984—),男,硕士,研究方向为电力系统自动化。

(编辑 赵彩莉)

(上接第26页)

- [16] 娄素华,余欣梅,熊信良,等.电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 30-35.
LOU Suhua, YU Xinmei, XIONG Xingen, et al. Unit commitment using improved discrete particle swarm optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (8): 30-35.
- [17] 胡家声,郭创新,曹一家.一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24-28.

HU Jiasheng, GUO Chuangxin, CAO Yijia. A hybrid particle swarm optimization method for unit commitment problem [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 24-28.

胡殿刚(1975—),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化。

秦睿(1967—),男,高级工程师,主要从事电气工程领域相关技术研究。

黄亭(1989—),女,硕士研究生,主要研究方向电力系统新能源。

(编辑 赵彩莉)