

# 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度

陈道君<sup>1</sup>, 龚庆武<sup>1</sup>, 张茂林<sup>2</sup>, 刘栋<sup>1</sup>, 杜亮<sup>1</sup>, 邵青<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072;

2. 云南省电力公司调度通信中心, 云南省 昆明市 650011)

## Multi-objective Optimal Dispatch in Wind Power Integrated System Incorporating Energy-environmental Efficiency

CHEN Daojun<sup>1</sup>, GONG Qingwu<sup>1</sup>, ZHANG Maolin<sup>2</sup>, LIU Dong<sup>1</sup>, DU Liang<sup>1</sup>, SHAO Qing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Yunnan Electric Power Dispatching and Communication Center, Kunming 650011, Yunnan Province, China)

**ABSTRACT:** With the large-scale wind power connected into the power systems, the influence of wind farms penetration should be considered in power system dispatch. A clean development of the power industry was required because of the increasingly serious global climate change and the strategy of sustainable development of human society. Based on the optimal dispatch in traditional power system, the concept of "energy-environmental efficiency" was introduced to modify the optimal dispatch model in wind power integrated system, and the multi-objective optimal dispatch model was proposed on the basis of comprehensively considering the minimum of the resource consumption, the best energy-environmental efficiency and the highest system stability. A hybrid particle swarm and tabu search optimization algorithm with fuzzy technology was presented to solve the optimization model. Experimental results show that the proposed optimization dispatch model is reasonable and the algorithm is feasible.

**KEY WORDS:** power system; wind power; energy-environmental efficiency; multi-objective optimization; fuzzy membership function; tabu search algorithm; particle swarm algorithm

**摘要:** 随着大规模风电场的并网运行, 电力系统调度过程需要考虑风电的影响; 而日益严重的气候变化问题和人类社会可持续发展战略, 也对电力行业提出了清洁化发展的要求。在传统电力系统优化调度的基础上, 引入“能源环境效益”概念对包含风电场的电力系统优化调度模型进行修正, 同时

考虑发电资源消耗最少、能源环境效益最好、系统安全稳定程度最高等因素, 提出了含风电场的多目标优化调度模型。在求解模型时采用模糊化处理技术, 并提出了综合禁忌搜索思想的改进粒子群算法。实例结果表明, 所提出的优化调度模型合理、算法可行。

**关键词:** 电力系统; 风电场; 能源环境效益; 多目标优化; 模糊隶属度函数; 禁忌搜索算法; 粒子群算法

## 0 引言

大规模风电场的并网运行是大力发展新能源的主要形式, 也是中国能源结构调整的一个重要途径, 与其他各种新能源相比较, 风电具有技术更成熟、成本更低、更清洁的优点<sup>[1-2]</sup>, 但是, 风速的波动性使得风电场的功率输出具有很强的随机性, 这就对电力系统的调度运行提出了新的挑战。

传统的电力系统优化调度问题主要考虑在满足系统负荷平衡、备用要求和发电机出力不越限的前提下, 确定一个调度周期内多台机组之间的负荷分配, 使总的发电费用最少。目前这方面已有很多相关研究<sup>[3-10]</sup>, 但是都没有探讨风电场加入系统之后的优化调度问题。在包含风电场的优化调度模型中, 风电的随机波动性和间歇性给系统调度带来的影响则需要从诸多方面进行考虑。文献[11]在风速预测的基础上, 使用随机规划理论建立了含风电场的动态经济调度模型, 并采用混合智能算法对模型进行求解。文献[12]采用对风电场模糊建模的思想和粒子群算法求解含风电场的经济调度, 但没有考虑常规机组的备用问题。文献[13]提出了计及常规火电机组调峰效应的含风电场经济调度模型, 但约

**基金项目:** 中国博士后科学基金(20080430376); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(20082070101000035)。

Project Supported by the Postdoctoral Foundation of China (20080430376); Fundamental Research Funds for the Central Universities (20082070101000035).

束条件并没有考虑风电穿透功率极限。

传统火电厂燃料燃烧所引起的环境污染问题已经成为制约国家能源可持续发展战略的一大障碍，因此，在系统优化调度中应当考虑电力生产对生态环境的影响。在保证系统安全稳定运行的前提下，如何利用风电来优化电源结构、减少火电机组的资源消耗和环境污染，是当前电力系统研究中要解决的重要课题。

本文为了保证大规模风电并网后系统运行的安全性及最大化利用风电这一清洁能源减少环境污染，引入“能源环境效益”的概念，构建了包含风电场的电力系统多目标优化调度模型。该模型包括发电资源消耗最少、能源环境效益最好、系统安全稳定程度最高 3 个方面，综合考虑了系统功率平衡、系统备用容量、机组爬坡速率、机组启停时间、风电穿透功率极限等约束条件。由于多目标优化问题庞大的维数和求解的复杂性，本文采用模糊化处理技术和综合禁忌搜索思想的改进粒子群算法进行计算，以获得更高质量的解。最后，通过测试算例验证了本文所提优化调度模型的合理性及算法的可行性。

## 1 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度数学模型

### 1.1 目标函数

火电机组资源消耗量目标函数的表达式为

$$\min F_1 = \min \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^G (f_{it}(P_{it}) + (1 - I_{i,t-1})S_{it})I_{it} \right] \quad (1)$$

式中： $T$ 为调度周期内的小时数，本文取  $T=24$ ； $G$ 为参与优化的火电机组台数； $P_{it}$ 为机组  $i$  在  $t$  时段的发电有功功率； $I_{it}$ 为机组  $i$  在  $t$  时段的运行状态， $I_{it}=1$  表示运行， $I_{it}=0$  表示停机； $S_{it}$ 为机组  $i$  在  $t$  时段的启动耗能，它与停机时间  $\tau_i$  的长短有关， $S_{it}$  一般用下式<sup>[14]</sup>表示：

$$S_{it} = \delta_i + \sigma_i(1 - e^{-T_{it}^{\text{off}}/\tau_i}) \quad (2)$$

式中： $\delta_i$ 、 $\sigma_i$ 、 $\tau_i$ 为机组  $i$  的启动成本系数； $T_{it}^{\text{off}}$ 为机组  $i$  在  $t$  时段停运的时间。

$f_{it}(P_{it})$ 为常规机组  $i$  在  $t$  时段的运行耗能，其表达式为

$$f_{it}(P_{it}) = a_i + b_i P_{it} + c_i P_{it}^2 \quad (3)$$

式中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 为运行耗能特性参数。

火电厂各种污染气体的最高允许排放浓度如表 1 所示。将  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  统一折算成等价的  $\text{CO}_2$

排放浓度：

$$(C_{\text{CO}_2})_e = (C_{\text{CO}_2}) + 700(C_{\text{SO}_2}) + 1000(C_{\text{NO}_x})$$

式中  $(C_{\text{CO}_2})_e$ 为折算后的等价  $\text{CO}_2$  排放浓度， $\text{kg/m}^3$ 。

定义等价  $\text{CO}_2$  排放比，其表达式为

$$E_{\text{CO}_2} = \frac{(C_{\text{CO}_2})_e V}{M} \quad (4)$$

式中： $V$ 为单位燃料燃烧所排放污染气体的体积， $\text{m}^3$ ； $M$ 为单位燃料， $\text{kg}$ ； $E_{\text{CO}_2}$ 为等价  $\text{CO}_2$  排放比，它是一个常数，其数值与火电厂具体使用的燃料有关。

表 1 工作环境中几种有害气体最高排放浓度

Tab. 1 Maximum admissible concentration for some harmful gases in the atmosphere of the work place

污染物	平均值( $\text{mg/m}^3$ )	最高排放浓度( $\text{mg/m}^3$ )
$\text{CO}_2$	7000	10000
$\text{SO}_2$	10	15
$\text{NO}_x$	—	10

为了分析不同工况下火力发电的能源环境效益，考虑发电效率  $\eta_e$  与火电机组发电有功功率  $P_{it}$  的函数关系<sup>[15]</sup>，构建能源环境效益指标<sup>[16]</sup>：

$$\varepsilon_{\text{eve}} = \frac{\eta_{ie}\eta_r(P_{it})\theta_\alpha}{\eta_{ie}\eta_r(P_{it})\theta_\alpha + kE_{\text{CO}_2}} \quad (5)$$

式中： $\eta_{ie}$ 为第台火电机组的发电效率； $\theta_\alpha$ 为燃料的低位发热量， $\text{MJ/kg}$ ； $k$ 为污染物排放造成的热量损失系数， $\text{MJ/kg}$ ，文献[17]通过试验对比研究了氢气和煤炭的燃烧过程，得出标准煤燃烧时的热量损失系数  $k$  近似为 2； $\eta_r(P_{it})$ 为发电效率  $\eta_{ie}$  随有功功率  $P_{it}$  变化的函数关系式，其表达式为

$$\eta_r(P_{it}) = \gamma_i + \beta_i P_{it} + \alpha_i P_{it}^2 \quad (6)$$

式中  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$ 为效率函数关系式的系数。

本文构建的能源环境效益模型为

$$\max F_2 = \max_{t \in T} \sum_{i=1}^G \frac{\eta_{ie}\eta_r(P_{it})\theta_\alpha^i}{\eta_{ie}\eta_r(P_{it})\theta_\alpha^i + 2E_{\text{CO}_2}^i} \quad (7)$$

能源环境效益模型表示在第  $t$  时段参与运行的所有发电机组能源环境效益指标的总和，用来说明在单位时间内生产电能所消耗的能源给生态环境造成污染程度的大小，它的值越大，说明该时段的能源环境效益越好，能源的利用率越高。

风电场输出功率的波动性对整个电力系统的安全稳定造成很大影响。本文借鉴文献[18]提出的多准则综合电压稳定指标建立系统安全稳定模型，用于辨识系统中与风电场相连节点的安全性。

图 1 给出了系统中某一节点在不同工况下运行的  $P-V$  曲线。额定负载时传输功率为  $P_{0i}$ ，节点电压为  $U_{0i}$ ，当传输功率  $P$  增长到临界值  $P_{\text{Acrit}}$  时，系

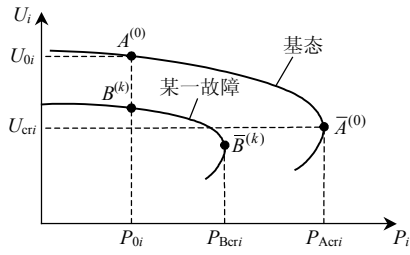


图1 不同工况下的节点P-V曲线

Fig. 1 P-V curves of different operating conditions

统处于电压稳定临界状态,对应的节点电压为  $U_{cri}$ 。由此可以得到电压变化指标表达式:

$$D_{ui} = (U_{cri} - U_{0i}) / U_{0i} \quad (8)$$

式中:  $D_{ui}$  为电压变化指标;  $U_{0i}$  为额定负载时的节点电压;  $U_{cri}$  为临界状态下的节点电压。

图2给出了系统中某一条母线运行的  $Q-V$  曲线,额定负载时对应的无功功率为  $Q_{0i}$ ,曲线底部  $dQ/dU=0$  的点即为电压稳定临界点,对应的无功功率临界值为  $Q_{cri}$ 。无功变化指标为

$$D_{Qi} = |Q_{0i} - Q_{cri}| \quad (9)$$

式中  $D_{Qi}$  为无功变化指标。

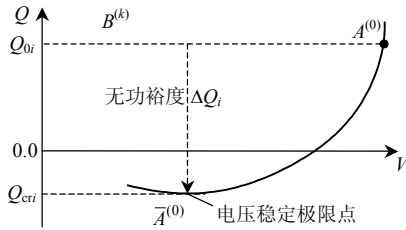


图2 某一条母线的Q-V曲线

Fig. 2 Q-V curves of a specified bus

采用理想点法综合考虑式(8)、(9),建立优化调度的系统安全稳定模型(具体求解过程参考文献[18]):

$$\min F_3 = \min[\omega_1 (D'_{ui} - D_{ui}^*)^2 + \omega_2 (D'_{Qi} - D_{Qi}^*)^2] \quad (10)$$

式中:  $D'_{ui}$  和  $D'_{Qi}$  分别为经过一致化和无量纲化处理后的电压变化指标与无功变化指标;  $D_{ui}^*$  和  $D_{Qi}^*$  分别为求取  $D'_{ui}$  和  $D'_{Qi}$  的最大值所组成的理想点;  $\omega_1$  和  $\omega_2$  为权重系数,且满足  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ;  $(\cdot)^2$  表示求取欧氏距离。

## 1.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束。

$$P_{it} + P_{wt} - U_i^t \sum_{j=1}^N U_j^t (G_{ij} \cos \varphi_{ij} + B_{ij} \sin \varphi_{ij}) = 0 \quad (11)$$

$$Q_{it} + Q_{wt} + C_i^t - U_i^t \sum_{j=1}^N U_j^t (G_{ij} \sin \varphi_{ij} - B_{ij} \cos \varphi_{ij}) = 0 \quad (12)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_{it} \leq Q_i^{\max} \quad (13)$$

式中:  $i \in G$ ;  $t \in T$ ;  $P_{it}$  和  $Q_{it}$  分别为发电机  $i$  在  $t$  时段的有功和无功出力;  $P_{wt}$  和  $Q_{wt}$  分别为风电场在  $t$

时段的有功和无功出力;  $Q_i^t$  为  $t$  时段风电场的无功补偿容量;  $U_i^t$  为节点  $i$  的电压幅值;  $Q_i^{\max}$  和  $Q_i^{\min}$  分别为机组  $i$  无功的上、下限;  $N$  为系统中所有的发电机组总台数。

2) 系统旋转备用约束。

$$\sum_{i=1}^G (P_{it}^{\max} - P_{it}) \geq \eta_1 P_{Dt}^{\text{up}}, \quad t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^G (P_{it} - P_{it}^{\min}) \geq \eta_2 P_{Dt}^{\text{down}}, \quad t \in T \quad (15)$$

式中:  $\eta_1$  和  $\eta_2$  为系统的上、下旋转备用率;  $P_{Dt}^{\text{up}}$  和  $P_{Dt}^{\text{down}}$  分别为上、下备用时对应的系统总负荷;  $P_{it}^{\max}$  和  $P_{it}^{\min}$  为常规机组在  $t$  时段的出力上、下限。

3) 常规发电机爬坡速率约束。

$$r_i^{\text{down}} \Delta T \leq P_{it} - P_{i(t-1)} \leq r_i^{\text{up}} \Delta T, \quad i \in G, t \in T \quad (16)$$

式中:  $r_i^{\text{up}}$  和  $r_i^{\text{down}}$  为常规机组  $i$  每小时输出有功功率的允许最大上爬坡和下爬坡速率;  $\Delta T$  为常规机组  $i$  运行的一个时段,本文  $\Delta T = 1 \text{ h}$ 。

4) 线路的有功功率约束。

$$P^{L\min} \leq P_l \leq P^{L\max} \quad (17)$$

式中  $P_l$ 、 $P^{L\max}$  和  $P^{L\min}$  为线路  $l$  输送有功功率及其上、下限值。

5) 常规机组出力约束。

$$P_i^{\min} \leq P_{it} \leq P_i^{\max}, \quad i \in G, t \in T \quad (18)$$

式中  $P_i^{\max}$  和  $P_i^{\min}$  分别为机组  $i$  出力的上、下限。

6) 机组启停时间约束。

$$\sum_{t=1}^T |I_{it} - I_{i(t-1)}| \leq N_i, \quad i \in G \quad (19)$$

$$(I_{it} - I_{i(t-1)}) (T_{it}^{\text{off}} - T_{i\min}^{\text{off}}) \geq 0, \quad i \in G \quad (20)$$

$$(I_{i(t-1)} - I_{it}) (T_{it}^{\text{on}} - T_{i\min}^{\text{on}}) \geq 0, \quad i \in G \quad (21)$$

式中:  $T_{it}^{\text{off}}$  和  $T_{it}^{\text{on}}$  分别为机组  $i$  在时段  $t$  的停机持续时间和开机持续时间;  $N_i$ 、 $T_{i\min}^{\text{off}}$ 、 $T_{i\min}^{\text{on}}$  分别为机组  $i$  在调度周期内的最大允许启停次数、最小连续停运小时数和最小连续运行小时数。

7) 风电穿透功率极限约束。

$$P_{wt} \leq \delta_w P_{Dt}, \quad t \in T \quad (22)$$

式中:  $\delta_w$  为风电穿透功率系数;  $P_{Dt}$  为  $t$  时段系统的负荷值; 忽略不同风机之间出力的差别,用  $P_{wt}$  表示风电场的有功输出。

## 2 风电场输出功率的数学模型

风力发电机的有功功率  $P_w$  主要取决于风电场风速的大小,  $P_w$  与轮毂高度处的风速  $v_w$  之间的关系可以用以下分段函数<sup>[19]</sup>近似表示:

$$P_w = \begin{cases} 0, & v_w \leq v_{Cl}, v_w \geq v_{Co} \\ \frac{P_R}{v_R^3 - v_{Cl}^3} v_w^3 - \frac{v_{Cl}^3}{v_R^3 - v_{Cl}^3} P_R, & v_{Cl} \leq v_w \leq v_R \\ P_R, & v_w \geq v_R \end{cases} \quad (23)$$

式中： $P_R$  为风机额定输出功率； $v_w$  为风机轮毂高度处的风速； $v_{Cl}$  为切入风速； $v_{Co}$  为切出风速； $v_R$  为风机运行的额定风速。

可以根据风速的分布曲线来计算风电场各时段的平均出力，图 3 为云南省某风电场的 24h 风速分布曲线，根据曲线的变化规律，划分为若干个时间段，求每段时间内对应的期望值，即可近似求得风电场在该段的功率期望：

$$P_{wn} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} P_w / (t_n - t_{n-1}) dt \quad (24)$$

式中： $P_{wn}$  为第  $t$  时段风电场出力； $t_n$  和  $t_{n-1}$  为  $n$  时段的前后时间区间。

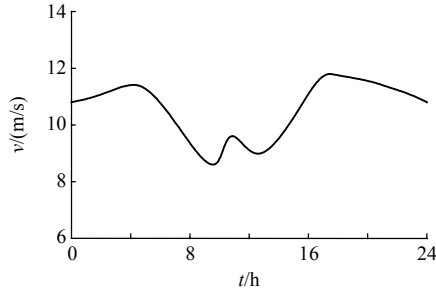


图 3 24 小时风速曲线  
Fig. 3 Wind speed curve of 24-hours

通过式(23)、(24)给出的风电机组风功率曲线，将图 3 所示的风速分布曲线转化为风电场各时段的平均功率曲线。假设风电场内所有风机的风速和风向相同，尾流系数设为 0.9，并考虑风电波动误差，允许其出力上下偏差  $\pm 25\%$ ，得到如图 4 所示的风电场出力曲线及波动范围，风电场有功输出  $P_{wt}$  满足如下约束条件：

$$0.75P_{wn} \leq P_{wt} \leq 1.25P_{wn} \quad (25)$$

目前，常见的笼型异步风力发电机组的定子电阻和铁心的功率损耗同有功功率  $P_w$  相比可以忽略，

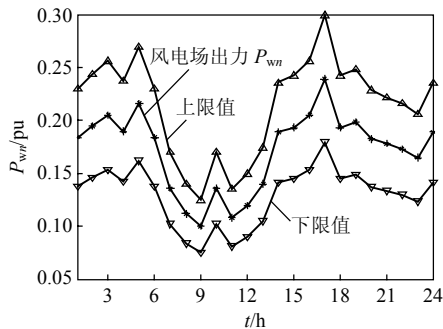


图 4 各时段风电场出力曲线及波动范围  
Fig. 4 Hourly wind power and rang of power fluctuating

假设风电场的有功功率为风机的机械功率，则风电机组的无功功率<sup>[20]</sup>为

$$Q_w = \frac{U^2}{X_m} - \frac{U^2 - \sqrt{U^4 - 4P_w^2 X_k^2}}{2X_k} \quad (26)$$

式中： $Q_w$  为风电场无功功率； $X_m$  为励磁电抗； $U$  为机端电压； $X_k = X_1 + X_2$ ， $X_1$  为定子电抗， $X_2$  为转子电抗。

### 3 多目标优化调度模型的处理及求解

#### 3.1 多目标优化模型的模糊化建模

模糊优化方法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问题求解。根据优化调度模型极小化型和极大化型的特点，选用降半直线形为机组资源消耗量模型和系统安全模型的隶属度函数，选用升半直线形为能源环境效益模型的隶属度函数<sup>[21]</sup>：

$$\mu(f(x)) = \begin{cases} 1, & f(x) \leq f(x)^- \\ \frac{f(x)^+ - f(x)}{f(x)^+ - f(x)^-}, & f(x)^- \leq f(x) \leq f(x)^+ \\ 0, & f(x) \geq f(x)^+ \end{cases} \quad (27)$$

$$\mu(g(x)) = \begin{cases} 1, & g(x) \geq g(x)^+ \\ \frac{g(x) - g(x)^+}{g(x)^- - g(x)^+}, & g(x)^- \leq g(x) \leq g(x)^+ \\ 0, & g(x) \leq g(x)^- \end{cases} \quad (28)$$

式中： $\mu(f(x))$ 和 $\mu(g(x))$ 为隶属度函数； $f(x)^+$ 、 $f(x)^-$ 为目标函数  $F_1$ 、 $F_3$  的最大值和最小值； $g(x)^+$ 、 $g(x)^-$ 为目标函数  $F_2$  的最大值和最小值。两隶属度函数的变化曲线如图 5 所示。

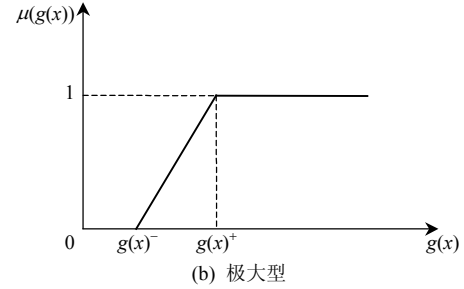
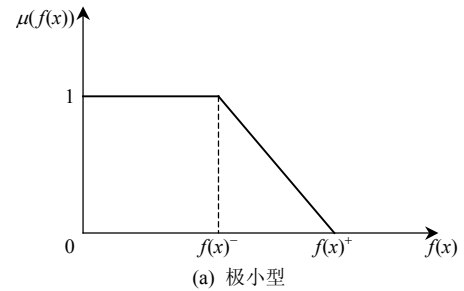


图 5 极小型和极大型隶属度函数曲线  
Fig. 5 Fuzzy membership function of smallest and largest

对各目标函数设定一个期望达到的参考隶属度值  $\mu_{rm}$ ，求取各目标函数隶属度与参考隶属度之差的绝对值。定义求解该最大绝对值的最小值作为优化准则，得到模糊化处理数学模型：

$$\begin{cases} \min \{ \max | \mu_{rm} - \mu(F_m(x)) | \}, & m=1,2,3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mu(F_m(x)) \geq \mu_{rm}, & m=1,2,3 \\ \text{式(11)—(22), (25)} \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

### 3.2 多目标优化模型的求解

本文算法流程图如图6所示。在模型模糊化处理的基础上，本文研究的优化调度问题包含2个子优化问题：机组组合优化问题和既定机组间负荷分配优化问题。粒子群算法的局部搜索能力差，易于发生早熟现象，而禁忌搜索与其他传统优化算法相比，最大的优点就是它具有好的局部搜索能力，搜索时可以跳出局部最优解；禁忌搜索算法比较大的缺点就是对初值的要求高，初值的好坏直接影响到禁忌搜索的效率，而粒子群算法对于初值的要求相对较低。因此，本文利用粒子群算法和禁忌搜索算

法的互补性，提出了综合禁忌搜索思想的改进粒子群算法，以求解多目标调度问题。该算法同传统的粒子群算法相比，在计算速度和计算精度等方面都具有一定的先进性。

### 4 算例分析

为验证本文所提出的多目标优化调度模型的合理性及算法的可行性，以含有1个风电场和6台火发电机组的测试系统进行仿真计算，调度周期为1d，分为24个时段。系统中的并网风电场包括60台风机，每台风机的额定出力为750kW，其切入风速、切出风速和额定风速分别为3、20和14m/s，励磁电抗  $X_m=3.872$ ，定子电抗  $X_1=0.012$ ，转子电抗  $X_2=0.005$ ，转子电阻  $R_2=0.12$ ，额定滑差  $s_N=-0.005$ 。风电场接入节点处安装有最大容量为10Mvar的并联电容器组，用来提供无功补偿。旋转备用水平按照系统负荷的5%取值，风电穿透功率系数  $\delta_w$  按照7%考虑。算法的控制参数如下：粒子种群规模为60，惯性因子  $\omega_{max}=0.9$ ， $\omega_{min}=0.3$ ，学习因子  $c_1=c_2=2.0$ ，速度限定  $V_{max}=15$ ，惩罚因子  $\lambda=20$ ，最大迭代次数  $K_{max}=1000$ ，禁忌表长度为10。初始参考隶属度值  $\mu_{r1}=0.7$ ， $\mu_{r2}=\mu_{r3}=0.8$ 。计算时各母线节点电压安全范围取0.97~1.1pu，并保持各时段系统内功率平衡，功率基值为100MVA。火电机组使用的燃料特性如表2所示，设1号发电机是平衡机组，系统日负荷数据如表3所示，火电机组参数如表4所示。

表5为考虑能源环境效益模型前后2种情况下，求得的火电机组和风电场各时段输出的有功功

表2 常规机组燃料特性

Tab. 2 Fuel characteristics of conventional generators

机组	$E_{CO_2}^i$	$\theta_a^i/(MJ/kg)$
1	23.9332	25.8627
2	38.9529	14.8726
3	34.2126	13.0714
4	40.5933	12.2880
5	42.0152	11.1917
6	44.1282	10.5303

表3 负荷数据

Tab. 3 Load data

时段	1	2	3	4	5	6	7	8
负荷/pu	3.305	3.106	2.958	2.909	2.958	3.052	3.650	4.241
时段	9	10	11	12	13	14	15	16
负荷/pu	4.685	4.736	4.736	4.648	4.648	4.613	4.592	4.636
时段	17	18	19	20	21	22	23	24
负荷/pu	4.875	4.932	4.932	4.736	4.486	4.093	3.608	3.106

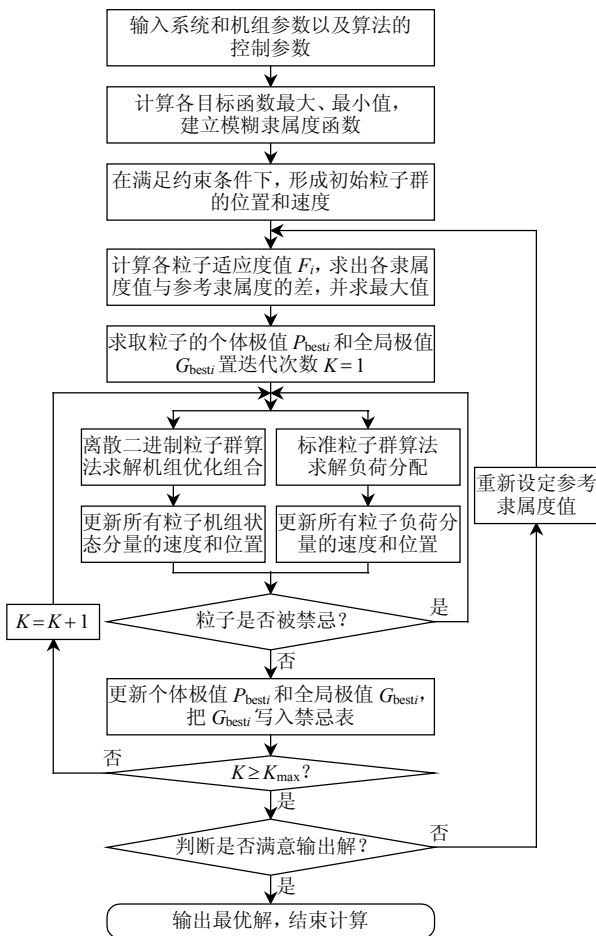


图6 多目标优化算法流程图

Fig. 6 Flow chart of multi-objective optimization

表 4 常规机组参数

Tab. 4 Conventional generators' parameters

机组	$P_i^{\max}/\text{pu}$	$P_i^{\min}/\text{pu}$	$a_i/(\$/\text{h})$	$b_i/(\$/(\text{MW}\cdot\text{h}))$	$c_i/(\$/(\text{MW}\cdot\text{h}^2))$	$\delta_i/\$$	$\sigma_i/\$$	$\tau_i/\text{h}$	$T_{i\min}^{\text{on}}/\text{h}$	$T_{i\min}^{\text{off}}/\text{h}$	$r_i^{\text{up}}/(\text{pu}/\text{h})$	$r_i^{\text{down}}/(\text{pu}/\text{h})$	$\eta_{ie}$	$\alpha_i/(\text{MW})^{-2}$	$\beta_i/(\text{MW})^{-1}$	$\gamma_i$
1	4	1.2	663.3562	36.1938	0.2048	4500	4500	4	8	8	0.80	-0.80	0.75	-0.0313	0.1375	0.8300
2	1.3	0.2	932.6582	45.6024	0.1332	550	550	2	5	5	0.30	-0.30	0.50	-0.2495	0.4017	0.7466
3	1.3	0.2	876.7851	42.5818	0.1298	560	560	2	5	5	0.30	-0.30	0.55	-0.1875	0.3775	0.7795
4	0.8	0.2	1235.2237	38.2607	0.0640	170	170	2	3	3	0.25	-0.25	0.40	-0.1210	0.3228	0.7496
5	0.55	0.1	1332.3704	39.9277	0.0254	30	30	1	1	1	0.15	-0.15	0.35	-0.7503	0.5301	0.7472
6	0.55	0.1	1658.1029	35.2756	0.0128	30	30	1	1	1	0.15	-0.15	0.30	-0.6714	0.4866	0.7520

表 5 考虑能源环境效益模型前后常规机组和风电场输出有功功率对比

Tab. 5 Comparison of generator outputs considering Energy-environmental Efficiency or not

时段	机组出力/pu(不考虑能源环境效益)							机组出力/pu(考虑能源环境效益)							能源环境效益
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6	风电	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6	风电	
1	1.857	0.496	0.847	0	0	0	0.155	1.530	0.598	0.721	0.346	0	0	0.159	0.5004
2	1.651	0.542	0.795	0	0	0	0.164	1.598	0.443	0.655	0.291	0	0	0.165	0.4977
3	1.627	0.451	0.748	0	0	0	0.179	1.473	0.464	0.672	0.226	0	0	0.168	0.4963
4	1.433	0.518	0.833	0	0	0	0.168	1.264	0.513	0.729	0.268	0	0	0.176	0.4957
5	1.707	0.498	0.619	0	0	0	0.182	1.508	0.421	0.557	0.329	0	0	0.187	0.4959
6	1.586	0.470	0.636	0.235	0	0	0.162	1.482	0.499	0.699	0.261	0	0	0.156	0.4975
7	2.039	0.472	0.587	0.451	0	0	0.161	1.955	0.494	0.635	0.334	0.136	0	0.159	0.5631
8	2.287	0.581	0.793	0.342	0.142	0	0.158	2.135	0.637	0.804	0.301	0.152	0.117	0.167	0.5678
9	2.684	0.596	0.795	0.251	0.169	0.143	0.128	2.556	0.523	0.775	0.368	0.255	0.130	0.149	0.5677
10	2.712	0.474	0.738	0.372	0.212	0.156	0.152	2.544	0.449	0.822	0.382	0.253	0.161	0.153	0.5676
11	2.872	0.532	0.627	0.308	0.221	0.132	0.127	2.791	0.513	0.613	0.409	0.231	0.116	0.146	0.5648
12	2.608	0.659	0.697	0.216	0.185	0.213	0.144	2.516	0.732	0.642	0.301	0.191	0.205	0.138	0.5674
13	2.491	0.608	0.718	0.287	0.256	0.231	0.136	2.307	0.676	0.754	0.389	0.249	0.184	0.163	0.5704
14	2.473	0.695	0.697	0.338	0.154	0.183	0.151	2.418	0.591	0.764	0.339	0.227	0.161	0.188	0.5686
15	2.942	0.478	0.518	0.224	0.183	0.146	0.179	2.602	0.474	0.684	0.258	0.354	0.125	0.167	0.5649
16	2.879	0.415	0.603	0.276	0.223	0.148	0.175	2.577	0.550	0.683	0.275	0.267	0.144	0.181	0.5661
17	2.864	0.529	0.708	0.251	0.247	0.162	0.190	2.743	0.741	0.582	0.390	0.198	0.117	0.186	0.5658
18	2.953	0.433	0.651	0.321	0.289	0.179	0.185	2.561	0.654	0.728	0.493	0.172	0.208	0.189	0.5695
19	2.895	0.497	0.759	0.298	0.266	0.123	0.176	2.805	0.446	0.768	0.443	0.247	0.117	0.193	0.5659
20	2.619	0.625	0.763	0.246	0.217	0.147	0.187	2.519	0.723	0.677	0.354	0.208	0.157	0.172	0.5682
21	2.595	0.575	0.731	0.352	0.138	0	0.173	2.381	0.633	0.714	0.348	0.169	0.138	0.180	0.5679
22	2.417	0.512	0.672	0.393	0	0	0.163	2.182	0.485	0.692	0.497	0.145	0	0.162	0.5399
23	2.251	0.412	0.538	0.312	0	0	0.155	2.212	0.445	0.554	0.280	0	0	0.173	0.4986
24	1.723	0.501	0.552	0.228	0	0	0.153	1.659	0.452	0.473	0.338	0	0	0.146	0.4963

率, 1—6 分别对应系统中的 6 台火电机组, 表中出力为 0 表示此时按照机组启停计划该机组处于停机状态, 输出功率为 0。由表 5 中数据的对比分析可以得出, 在满足系统负荷需求和安全稳定的前提下, 考虑能源环境效益对调度运行方案产生了较大的影响。例如, 在负荷较低的 1—6 时段, 减少大容量机组的有功出力, 为系统提供更大容量的旋转备用, 同时使得小容量机组运行在最小技术出力以上, 提高了整个系统的能源环境效益。

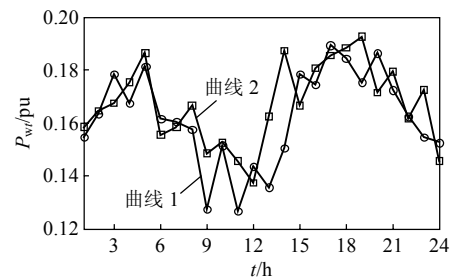
表 6 为优化调度中考虑能源环境效益模型前后 2 种情况下常规发电机组资源消耗量的对比。从表 6 的数据可以看出, 在调度运行时考虑能源环境效益后, 常规机组的资源消耗量由 128218.3479 \$ 升高到 136871.3362 \$, 发电资源消耗量上升了 8652.9883 \$。

图 7 为考虑能源环境效益模型前后风电场各时

表 6 考虑能源环境效益模型前后资源消耗量对比

Tab. 6 Comparison of resource consumption considering Energy-environmental Efficiency or not

优化调度目标	资源消耗量/\$
不考虑能源环境效益	128218.3479
考虑能源环境效益	136871.3362



曲线 1 为不考虑能源环境效益时风电场的出力; 曲线 2 为相应的考虑能源环境效益时的风电场出力。

图 7 考虑能源环境效益模型前后风电场出力对比  
Fig. 7 Comparison of wind power output considering Energy-environmental Efficiency or not

段出力情况的对比。从图7可以看出,曲线2在24个时段内总的出力大于曲线1,这也从能源环境效益方面反映了风电的绿色和清洁,同时,风电场出力的增加也提高了火电机组的能源环境效益,减少了污染物对生态环境的破坏。能源环境效益并不像火电机组的资源消耗量一样,可以通过具体的价值进行衡量,能源环境效益更多的是以一种“隐形资本”的形式来表现。

通过表5、6的分析可以得出,考虑能源环境效益后,会略微提高火电机组的资源消耗量,但同时大大提升了整个发电系统的能源环境效益这一“隐形资本”,减少了对生态环境的污染和破坏。由此可见,在全球大力发展低碳经济、国家落实节能减排的背景下,考虑能源环境效益对于优化电力系统调度具有较为深远的意义。

## 5 结论

本文研究了含风电场的电力系统优化调度问题。在模型建立中,引入“能源环境效益”概念,构建了综合考虑资源消耗最少、能源环境效益最好和系统安全稳定程度最高的多目标优化调度模型。建立的能源环境效益模型从生态环境角度出发,重点研究电力生产对于生态环境的影响,该模型在当今大力发展风电、减少环境污染的战略方针下,对于现行的电力系统调度产生了较为积极的影响。在求解模型时,采用模糊处理技术和综合考虑禁忌搜索思想的改进粒子群算法,提高了计算的精度。实例验证,本文所提出的考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度模型具有合理性,所得调度方案对于传统的电力生产调度具有一定的可参考性。“能源环境效益”应当成为电力系统调度运行中重点考虑的问题。

## 参考文献

- [1] 廖明夫, Gaxch R, Twel J. 风力发电技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 4-6.  
Liao Mingfu, Gaxch R, Twel J. Wind power technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009: 4-6(in Chinese).
- [2] 都志杰, 马丽娜. 风力发电[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 5-7.  
Du Zhijie, Ma Lina. Wind power[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 5-7(in Chinese).
- [3] Damousis I G, Bakirtzis A G, Dokopoulos P S. Network-constrained economic dispatch using real-coded genetic algorithm[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(1): 198-205.
- [4] 王欣, 秦斌, 阳春华, 等. 基于混沌遗传混合算法的短期负荷环境和经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 128-133.  
Wang Xin, Qin Bin, Yang Chunhua, et al. Short term environmental/economic generation scheduling based on chaos genetic hybrid optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 128-133(in Chinese).
- [5] 侯云鹤, 熊信良, 吴耀武, 等. 基于广义蚁群算法的电力系统经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 59-64.  
Hou Yunhe, Xiong Xinyin, Wu Yaowu, et al. Economic dispatch of power systems based on generalized ant colony optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 59-64(in Chinese).
- [6] 李蔚, 刘长东, 盛德仁, 等. 基于免疫算法的机组负荷优化分配研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 241-245.  
Li Wei, Liu Changdong, Sheng Deren, et al. Research on optimization of unit commitment based on immune algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 241-245(in Chinese).
- [7] 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(in Chinese).
- [8] 姜素华, 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 Xinyin, et al. Unit commitment using improved discrete particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 30-35(in Chinese).
- [9] 毛亚林, 张国忠, 朱斌, 等. 基于混沌模拟退火神经网络模型的电力系统经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 65-70.  
Mao Yalin, Zhang Guozhong, Zhu Bin, et al. Economic load dispatch of power systems based on chaotic simulated annealing neural network model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 65-70(in Chinese).
- [10] Liang R H, LIAO Jianhao. A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(4): 1665-1674.
- [11] 孙元章, 吴俊, 李国杰, 等. 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): 41-47.  
Sun Yuanzhang, Wu Jun, Li Guojie, et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 41-47(in Chinese).
- [12] 陈海炎, 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(in Chinese).
- [13] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 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, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 13-18(in Chinese).
- [14] 王晔, 李渝曾, 张少华. 一种求解环境经济负荷调度问题的人工神经网络新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 45-48.  
Wang Xian, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. A new artificial neural network approach to economic emission load dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 45-48(in Chinese).

- [15] 屠进. 火力发电厂效率计算及联合循环发电的优势[J]. 能源工程, 1999, 21(4): 43-44.  
Tu Jin. Efficiency calculation for thermal power plant and advantage of combined cycle power plant[J]. Energy Engineering, 1999, 21(4): 43-44(in Chinese).
- [16] Cardu M, Baica M. Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants[J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40(14): 1569-1575.
- [17] Cardu M, Baica M. Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of thermopower plants[J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40(1): 71-87.
- [18] 高鹏, 石立宝, 姚良忠, 等. 辨识电网薄弱节点的多准则综合电压稳定指标[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 26-31.  
Gao Peng, Shi Libao, Yao Liangzhong, et al. A multi-criterion integrated voltage stability index for weak buses identification[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 26-31(in Chinese).
- [19] Bowden G J, Barker P R, Shestopal V O, et al. Weibull distribution function and wind power statistics[J]. Wind Engineering, 1983, 7(2): 85-98.
- [20] 陈海炎, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.  
Chen Haiyan, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. Study on power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40(in Chinese).
- [21] 胡国强, 贺仁睦. 梯级水电站多目标模糊化调度模型及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 154-158.  
Hu Guoqiang, He Renmu. Model and algorithm of multi-objective fuzzy optimal scheduling for cascaded hydroelectric power plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 154-158(in Chinese).



陈道君

收稿日期: 2011-03-11。

作者简介:

陈道君(1986), 男, 河南商城人, 博士研究生, 研究方向为风电并网运行调度, chendaojun@whu.edu.cn;

龚庆武(1967), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士生导师, 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;

张茂林(1983), 男, 湖北恩施人, 助理工程师, 研究方向为电力系统调度运行。

(责任编辑 刘浩芳)