

计及风电成本的电力系统短期经济调度建模

任博强¹, 彭鸣鸿¹, 蒋传文¹, 栾士岩¹, 林海涛¹, 李磊², 赵岩²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市电力公司电力交易中心, 上海 200122)

摘要: 与传统发电方式相比, 风力发电具有无煤耗和无污染的优势, 但风速的间歇性和不确定性使得大容量风电并网后会给电力系统的安全性和稳定性造成了影响。将风速的不确定性量化为风电成本纳入到短期调度模型中, 同时考虑到风电的不足和盈余对于调度策略的影响及风能无污染的优势, 在模型中还分别加入了备用罚函数、风电盈余罚函数和污染评估罚函数, 从而建立了计及风电成本的电力系统短期调度模型。在优化方法方面, 依据混沌理论, 将免疫算法和粒子群算法相结合, 建立了基于人工免疫系统的混沌粒子群算法(ICPSO), 通过混沌初始化和浓度的控制, 克服了粒子群易陷入局部最优解的劣势, 并在仿真中证明了其有效性。

关键词: 风速; 风电成本; 电力系统; 短期调度; 人工免疫; 粒子群法

Short-term economic dispatch of power system modeling considering the cost of wind power

REN Bo-qiang¹, PENG Ming-hong¹, JIANG Chuan-wen¹, LUAN Shi-yan¹, LIN Hai-tao¹, LI Lei², ZHAO Yan²

(1. Department of Electric Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Electric Power Transaction Center, Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Compared with the traditional power generation, wind power has the advantages of no coal consumption and free pollution. However, because of intermittent and uncertainties of wind speed, grid will exist potential security and stability when large-capacity wind power integrating it. This paper quantifies the uncertainty of wind speed for the cost of wind power into a short-term scheduling model. At the same time, considering the impact of insufficiency and surplus of the wind power to scheduling strategy and its advantages of non-polluting, the reserve-penalty function, surplus-penalty function and pollution assessment of penalty function are joined in the short-term scheduling of power system model. To overcome the inferior local optimal solution of the particle swarm, this paper combines the chaos theory, manual immunity theory and particle swarm optimization to create an effective method—immune chaotic partical swarm optimization (ICPSO). The simulation of system verifies the feasibility of models and algorithms.

This work is supported by Chinese National Programs for High Technology Research and Development(863) (No.2007AA05Z458).

Key words: wind speed; cost of wind; power system; short-term economic dispatch; manual immunity; particle swarm optimization algorithm

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0067-06

0 引言

经济调度(Economic Dispatch, ED)问题考虑的目标主要是寻求在满足负荷需求的情况下使得成本最小的合理发电方式, 即一种可以从可用发电机中找到最优分配的方法。在广泛使用替代能源之前, ED问题只包括传统的火电机组, 这些机组需要消

耗大量的不可再生能源并排放 CO₂, SO₂ 和 NO_x 等污染气体。在当前金融危机和环境日益恶化的形势下, 显然急需寻找能够替代传统能源的新能源形式, 而风能就是这种新能源的代表之一。但不幸的是从风电场输入的风能很难预测, 使得风电机的输出电能并不能按照人们所预期的那样进行调度分配, 并且风能的间歇性和随机性也会在大容量风电并网后给整个电网带来安全稳定威胁, 所以有必要研究一种含风电场的合理的经济调度节能方案。

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2007AA05Z458)

ED 问题主要包括长期经济调度和短期经济调度问题, 本文主要研究含风电场的电力系统短期经济调度问题, 即以一天 24 小时为周期, 计算含风电机组的最佳机组组合安排。对于含风电场的短期调度模型, 国内外研究员也做了相关的研究。Bouffard 和 Galiana 利用期望社会成本^[1]的概率函数将风电的不确定性量化为数学函数纳入到调度模型中进行优化; 文献[2-3]考虑到风能是清洁能源, 在调度模型中增加了环境污染指标函数, 建立了多目标调度模型进行优化。本文为了反映风速不确定性对电网产生的威胁, 将以风速预测结果为依据来计算风电综合成本, 同时考虑到风电量的不足与盈余对经济调度的影响, 在 ED 模型中添加了备用罚函数和盈余罚函数, 建立了多随机变量的经济调度模型。与传统发电方式相比, 风力发电几乎不排放任何污染性气体, 所以模型中还添加了污染气体评估模型。

经济调度优化算法主要包括拉格朗日法^[4]、直接搜索法^[5]等传统算法和模拟退火法^[6]、遗传算法^[7]、粒子群法^[8-9]等智能算法, 本文采用了基于人工免疫系统的混沌粒子群算法 (Immune Chaotic Particle Swarm Optimization, ICPSO), 通过对粒子群浓度的控制使得其寻优速度和结果都得到了明显的改善。

1 含风电场的电力系统短期经济调度建模

1.1 常规发电机模型

由于风能不需要消耗化石燃料, 所以在电力系统经济调度建模中只考虑常规火电机组所消耗的能源成本。同时由于风电的间歇性和随机性使得机组启停调度策略发生了改变, 所以将常规机组的启停成本加入到经济调度目标函数中, 目标函数如下:

$$f_{G,\text{cost}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N U_i(t) \{F_i[P_{G,i}(t)] + (1-U_i(t-1)) \cdot STC_i(t)\} \quad (1)$$

式中: N 为火电机组总数; T 表示研究周期的小时数, 在短期调度中一般以 24 小时为一个周期; $U_i(t)$ 为机组 i 在 t 时刻的状态, $U_i(t)=1$ 表示运行状态, $U_i(t)=0$ 表示停运状态; $P_{G,i}(t)$ 为 t 时刻第 i 台发电机组的输出功率; $STC_i(t)$ 为火电机组的启停成本; $F_i[\bullet]$ 为机组 i 的煤耗成本, 在不考虑机组的涟漪效应的情况下, 采用二次函数来表示, 其计算公式如下:

$$F_i[P_{G,i}(t)] = a_i P_{G,i}^2(t) + b_i P_{G,i}(t) + c_i \quad (2)$$

式中: a_i , b_i , c_i 分别为成本函数的系数。

1.2 风力发电机模型

虽然风力发电不计煤耗, 但风电场的建设费用及其维护成本仍然使得风电的上网电价高于常规机组, 严重阻碍了风电的发展。考虑到风速的不确定性, 参照文献[10], 本文将风速预测结果加入到了风电运行成本函数中, 其数学模型如下:

$$f_{W,\text{cost}} = C_W g F_{W,\text{cost}} \quad (3)$$

其中: C_W 表示风电场的总装机容量; $F_{W,\text{cost}}$ 为风电的发电成本电价, 其值由发电厂商决定; g 为风电的利用系数, 即容量系数, 其值是平均输出功率与额定功率之比^[11], 其公式如 (4) 所示:

$$g = \frac{P_{W,\text{average}}}{P_{W,\text{rating}}} \quad (4)$$

其中: $P_{W,\text{rating}}$ 是风电机的额定输出功率; $P_{W,\text{average}}$ 是一天中每个小时的风电平均功率输出功率, 是由风电机输出特性和风速概率密度乘积的积分决定的, 参照 Growian 风力涡轮型风力发电机输出特性, 其公式如 (5) 所示。

$$P_{W,\text{average}} = \int_{v_i}^{v_o} Y(v) Y_W(v) dv \quad (5)$$

其中: $Y(v)$ 是为风电机输出特性, 鉴于风速的线性模型更接近于实际情况, 所以本文建立了含风速的隶属函数作为风机的输出特性方程, 如式 (6)。

$$Y(v) = \begin{cases} 0 & v < v_i \text{ 或 } v > v_o \\ \frac{v-v_i}{v_r-v_i} P_{W,\text{rating}} & v_i < v < v_r \\ P_{W,\text{rating}} & v_r < v < v_o \end{cases} \quad (6)$$

其中: v_i 、 v_o 、 v_r 分别为切入风速、切出风速和额定风速; $Y_W(v)$ 为风速概率密度函数。本文以二维经典 Weibull 分布为例来计算风速概率密度函数, 其计算公式如式 (7)。

$$Y_W(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (7)$$

其中: v 为风机某高度处的风速变量; k , c 分别为风机某高度处的形状参数和尺度参数, 在这里不考虑风机高度引起的变化, 其计算公式如式 (8) ~ (9)。

$$k = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-x}; \quad (8)$$

$$c = \left(\frac{\mu}{\Gamma(1+1/k)}\right)^x \quad (9)$$

这里 x 为调整系数; μ 为 24 小时风速预测结果的均值; σ 为风速预测结果的方差, 方差越小代表风

速曲线越平稳, 随机性越小, 对电网的冲击也就越小。这样将风速的不确定性融入到了风电运行成本之中, 对于由实际风速预测结果与 Weibull 分布之间偏差所产生的风险, 本文不作考虑。

1.3 备用罚函数

由于风电的随机性给电网的安全稳定运行造成了威胁, 所以为了保证电网的正常运行, 减少切负荷概率, 本文将备用成本模型加入到了经济调度模型中, 从而在峰荷时段满足负荷增长的需要。当负荷需求大于供电量时, 其数学模型如下:

$$f_{\text{reserve}} = C_r (P_{\text{load}} - P_G - P_{W,\text{average}}) \quad (10)$$

其中: C_r 为备用成本系数, 根据当前市场中备用价格而定; P_{load}, P_G 分别为负荷、火电机组输出功率。

1.4 风电盈余罚函数

当前大容量电能储存仍然是国际难题之一, 风电量盈余可能会引起电网资源性浪费, 所以经济调度模型中加入风电盈余的罚函数, 保证资源得到充分合理的利用。当负荷需求小于供电量时, 数学表达式如下:

$$f_{\text{surplus}} = C_s (P_{W,\text{average}} + P_G - P_{\text{load}}) \quad (11)$$

其中: C_s 为风电盈余的罚因子, 根据当前市场中燃料价格而定。

1.5 环境污染评估模型

风能是既不消耗燃料又不污染环境的清洁能源, 相比化石燃料发电而言, 其可以减少发电企业治理环境污染所投入的成本, 为了在调度计算中体现出风电的优势, 本文将环境因素量化为数学模型融入到电力系统短期调度模型中, 使其成为评价调度策略优劣的标准之一, 为了便于研究, 本文并未分别考虑不同污染气体的特性, 而是统一建立了非线性数学模型, 其模型如下:

$$f_{\text{pollute}} = d_i P_{G,i}^2 + e_i P_{G,i} + f_i \quad (12)$$

其中, d_i, e_i, f_i 分别为第 i 台常规发电机污染系数。

综合以上各因素, 含风电场的短期经济调度目标函数主要由五部分组成, 目标函数如下:

$$f_{\text{total}} = f_{G,\text{cost}} + f_{W,\text{cost}} + f_{\text{reserve}} + f_{\text{surplus}} + f_{\text{pollute}} \quad (13)$$

由于不同国家对于风能和污染物排放所采取的政策不同以及市场备用价格和市场燃料价格的波动, 使得模型中各个控制参数都会发生相应的变化, 从而导致式 (13) 中各个子模型所占的权重也发生了相应的变化。

1.6 约束条件

(1) 系统有功平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{G,i}(t) + \sum_{j=1}^M P_{W,j}(t) + P_C(t) \geq D(t) \quad (14)$$

$$t = 1, 2, \dots, T$$

式中: $j = 1, 2, 3, \dots, M$, 为 M 台风电机组; $P_{W,j}(t)$ 为 t 时刻第 j 台风电机组的有功出力; $P_C(t)$ 为 t 时刻的备用大小; $D(t)$ 为 t 时刻的负荷值。

(2) 发电机最大和最小出力约束

$$P_{\min,i} \leq P_i(t) \leq P_{\max,i} \quad (15)$$

式中: $P_{\min,i}$ 和 $P_{\max,i}$ 分别为第 i 台机组的有功出力上下限。

(3) 常规机组最小运行和停机时间约束

$$\begin{cases} (X_i^{\text{on}}(t-1) - T_i^{\text{on}}) \cdot (U_i(t-1) - U_i(t)) \geq 0 \\ (X_i^{\text{off}}(t-1) - T_i^{\text{off}}) \cdot (U_i(t) - U_i(t-1)) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $X_i^{\text{on}}(t)$ 和 $X_i^{\text{off}}(t)$ 分别表示常规机组 i 在 t 时段已经连续运行和停运的时间; T_i^{on} 和 T_i^{off} 分别表示常规机组 i 的最小运行和停运时间。

(4) 常规机组爬坡速率约束

$$\begin{cases} P_{G,i}(t) - P_{G,i}(t-1) \leq UR_i \\ P_{G,i}(t-1) - P_{G,i}(t) \leq DR_i \end{cases} \quad (17)$$

式中: UR_i 和 DR_i 分别表示第 i 台常规机组有功出力的上升速率和下降速率。

2 基于人工免疫系统的混沌粒子群算法 (ICPSO)

粒子群法 (PSO) 是一种通过观察鸟群或鱼群运动而得到的随机优化技术。在粒子群算法中, 个体在多维搜索空间中通过改变个体的速度和位置来接近最优解, 在每一次迭代中, 他们都会有观察自己和相邻个体的适用度值, 从而移向更好的位置。为了提高算法的自适应能力, 本文在传统算法的基础上增加了压缩因子 χ ^[9], 并使得惯性权重随着目标函数值的改变而改变, 其数学公式如下所示:

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} + \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} \times (f - f_{\min}), & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (18)$$

$$\chi = \frac{2}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|} \quad (19)$$

$$\varphi = c_1 + c_2 \quad (20)$$

其中: ω_{\max} 代表最大惯性权重, 一般为 0.9; ω_{\min} 代

表最小惯性权重, 一般为 0.4; f , f_{avg} , f_{min} 分别代表当前适应度值, 平均适应度值和最小适应度值; c_1 , c_2 为加速常数。

免疫算法能够使得系统中亲和力大而浓度小的抗体得到促进, 亲和力小而浓度大的个体受到抑制, 也就是说通过浓度的控制来保证个体的多样性, 其选择策略如下:

$$P(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^{I+J} |f(x_i) - f(x_j)|}{\sum_{i=1}^{I+J} \sum_{j=1}^{I+J} |f(x_i) - f(x_j)|} \quad (22)$$

$$i = 1, 2, \dots, I \quad j = 1, 2, \dots, J$$

其中: x_i 和 $f(x_i)$ 分别代表第 i 个粒子位置及其适应度值; $P(x_i)$ 是每个粒子的被选概率; I 代表每一代的粒子数, J 代表每一代额外随机产生的粒子数, 通过计算这 $I+J$ 个粒子的被选概率并进行排序来筛选出进入下一代的 I 个粒子, 形成新的种群。将免疫算法与粒子群算法相结合可以降低传统粒子群算法陷入局部最优解的概率。

3 混沌初始化

随机初始化虽然能保证初始粒子群均匀分布, 但不能确保初始解的质量, 所以在这里引进了混沌系统来提高求解的效率。具体过程如下:

(1) 随机产生一个 n 维且每个分量在 $0 \sim 1$ 之间的向量 $u_1 = (u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1n})$ 。

(2) 根据公式 $u_{i+1,j} = \mu u_{i,j}(1-u_{i,j})$, 得到 u_1, u_2, \dots, u_N 。

(3) 将 u_i 的各个分量映射到目标函数的取值范围: $x_{ij} = P_{\min,j} + (P_{\max,j} - P_{\min,j})u_{ij}$, 其中 $P_{\min,j}$, $P_{\max,j}$ 分别代表第 j 台发电机的最小和最大出力。

4 基于 ICPSO 的电力系统短期经济调度仿真流程

本文将目标函数值作为粒子的适应度值, 粒子群位置 x_i 编码方式如下所示:

$$x_i = \begin{bmatrix} P_{i1,1}, P_{i2,1}, \dots, P_{ij,1}, \dots, P_{iN,1} \\ P_{i1,2}, P_{i2,2}, \dots, P_{ij,2}, \dots, P_{iN,2} \\ \vdots \\ P_{i1,t}, P_{ij,t}, P_{iN,t} \\ \vdots \\ P_{i1,T}, P_{i2,T}, \dots, P_{ij,T}, \dots, P_{iN,T} \end{bmatrix}$$

$P_{ij,t}$ 表示 t 时段 i 代第 j 台火电机组出力, 粒子的初始速度可按类似方法编码。仿真程序图如图 1 所示。

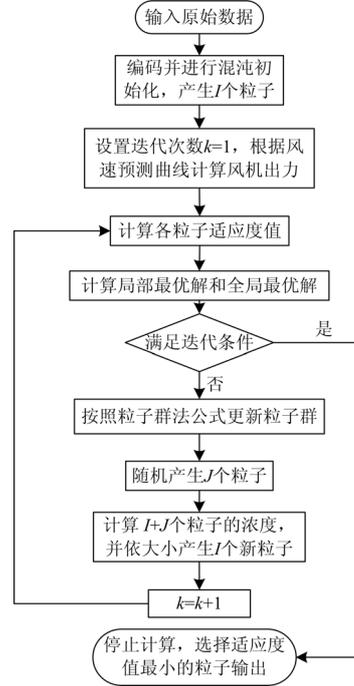


图 1 程序流程图

Fig.1 Flow chart of the program

5 算例仿真

本仿真系统由一个风电场和十台常规机组组成, 风电场中包含相同类型的风电机 350 台, 每台风电机容量为 1 MW, 风速预测曲线如图 2 所示, 其中两条曲线分别代表独立两天的风速预测结果。其中常规发电机参数和负荷预测数据分别见文献[12-13]。

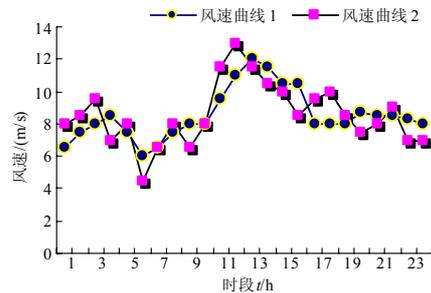


图 2 24 小时风速预测曲线

Fig.2 Wind speed forecast curve in 24-hour

其中模型参数如下: 风电场总装机容量为 350 MW; 风电成本参数 $F_{W,cost}$ 为 20 \$/MWh; 切入风速 v_i 、额定风速 v_r 和切出风速 v_o 分别为 5 m/s、20 m/s、35 m/s; 调整系数 x 为 1.086; 备用成本系数 C_r 为 112 \$/MW; 污染物系数为 100 \$/ton; 风电

盈余的罚因子 C_s 为 80/MW; ω_{max} 和 ω_{min} 分别为 0.9 和 0.4; 加速常数 c_1 和 c_2 分别为 1.5 和 2.3; 种群规模 N 为 200; 迭代最大次数为 1 000。

本文分别对两条风电曲线进行了仿真计算, 仿真结果见表 1 所示。

表 1 两条风电曲线的仿真结果 1

Tab.1 Simulation result of two wind power curves 1

	风速期望 / (m/s)	标准差	最优解 / \$	最差解 / \$
风速曲线 1	8.70	1.556	95 688.7	96 283.1
风速曲线 2	8.67	1.886	97 254.6	98 851.7

从表 1 中可以看出风速曲线 1 比风速曲线 2 的方差要小, 即前者的稳定性要好, 其仿真的最优成本也要小。虽然风机的平均输出功率并不总是随着风速稳定性的改善而增加, 但若风速稳定性的下降

可能会造成备用成本或风电盈余成本的增加。例如在风速曲线 2 的 6 点位置, 由于风速突然降到的 4.5 m/s 使得风机输出为零, 加之常规机组受到爬坡约束的限制而满足不了系统有功平衡约束, 这样就需要增加备用来平衡系统负荷需求。

同时本文针对含风电场 (风电曲线 1) 和不含风电场的短期经济调度分别进行了仿真分析, 计算结果如表 2 所示。表 3 对应风电曲线 2 最优解机组出力情况。

表 2 仿真结果 2

Tab.2 Simulation result 2

	最优解 / \$	风电成本 / \$	环境污染成本 / \$
含风电场	95 688.7	7 488.6	8 561.5
不含风电场	97 561.7	—	9 956.4

表 3 24 小时发电机组出力情况

Tab.3 Conventional generator output in 24-hour

时段	常规发电机组出力 / MW										风场出力 / MW	时段	常规发电机组出力 / MW										风场出力 / MW
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10			G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	
1	17	0	0	67	50	170	180	404	443	509	160	13	0	0	0	0	84	127	204	273	282	230	
2	0	0	50	81	97	193	175	361	410	443	170	14	0	20	0	0	50	76	121	152	261	250	210
3	0	35	59	80	100	158	164	360	380	414	190	15	0	0	0	28	51	77	125	159	255	267	200
4	13	37	57	67	86	195	156	373	374	402	140	16	0	0	0	0	50	102	120	208	270	340	170
5	12	60	80	91	0	208	116	427	340	346	160	17	10	20	0	0	0	97	135	281	311	336	190
6	0	80	50	50	0	205	120	445	410	420	0	18	0	27	0	58	0	110	152	293	375	344	200
7	0	80	30	90	50	128	230	320	512	250	130	19	11	25	66	53	50	121	131	305	376	251	170
8	0	39	48	70	0	121	157	322	402	380	160	20	0	41	0	38	77	116	164	361	397	354	150
9	0	30	39	40	0	95	141	319	327	389	130	21	11	47	0	59	67	114	193	347	372	431	160
10	10	0	31	43	0	106	120	294	327	317	160	22	13	34	56	58	105	116	205	359	421	374	180
11	10	20	0	32	30	77	120	237	267	296	230	23	0	37	62	50	107	118	168	344	475	438	150
12	0	22	0	37	0	95	133	216	251	256	250	24	20	62	67	94	95	137	155	346	395	458	160

虽然风速的随机性给系统带来了额外的风电成本, 但由于风电属于清洁能源, 使得含有风电场的电力系统短期调度策略中常规机组的输出及其污染成本都有所下降。本文针对含风电场和不含风电场两种情况进行了仿真试验, 结果如表 2 所示, 含风电场的经济调度策略成本比不含风电场的要小一些, 其差值主要包括常规机组的煤耗和污染成本。但由于不同地区对待风力发电和污染评估指标的态度不同, 使得模型中惩罚系数也有所不同, 最终的调度策略也会存在一定的差异性。

为了体现 ICPSO 计算效率和精度的优势, 本文针对 ICPSO 和传统 PSO 进行了仿真对比, 其风速曲线 2 的仿真收敛曲线如图 3 所示。从仿真曲线可

以看出 ICPSO 的收敛速度和最优解均要优于传统 PSO, 传统 PSO 在 240 代后陷入了局部最优解, 而

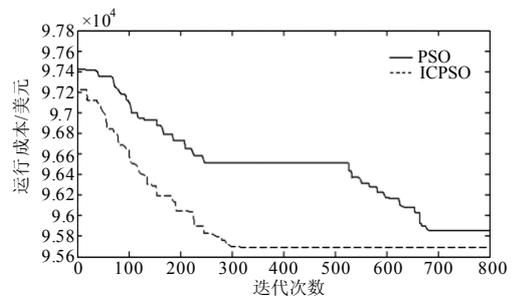


图 3 ICPSO 和 PSO 的收敛曲线比较

Fig.3 Comparison of convergent curves between ICPSO and PSO

ICPSO 已于 348 代求得了最优解。

6 结论

本文基于风速的间歇性和随机性, 将风电成本函数、备用罚函数和风电盈余罚函数分别加入到了电力系统短期经济调度模型中, 同时为了体现风能无污染的优势, 在模型中还添加了环境评估模型来计算常规机组排污成本, 并利用基于人工免疫系统的混沌粒子群算法进行了仿真计算。通过仿真结果可以看出: 1) 风速的波动性直接影响了风机的平均输出功率, 造成总成本的增加; 2) 为了提高系统的可靠性, 系统需要带有一定容量的备用来弥补风速不确定性给电力系统带来的威胁; 3) 将风能纳入到大系统中可以减少常规机组的污染成本, 但由于不同国家对于风能和污染物排放所采取的政策不同, 所以风电成本参数和污染系数也会发生改变, 对最终的机组调度策略也会产生一定的影响。

参考文献

- [1] François Bouffard, Galiana F D. Stochastic security for operations planning with significant wind power generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23 (2): 306-316.
- [2] CAI Jie-jin, MA Xiao-qian, LI Qiong, et al. A multi-objective chaotic particle swarm optimization for environmental / economic dispatch[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50: 1318-1325.
- [3] WANG Ling-feng, Chanan Singh. Reserve-constrained multiarea environmental / economic dispatch based on particle swarm optimization with local search[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, 22: 298-307.
- [4] Vladimiro Miranda, Pun Sio Hang. Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20 (4): 2143-2145.
- [5] Chen Chun-Lung, Lee Tsung-Ying, Jan Rong-Mow. Optimal wind-thermal coordination dispatch in isolated power systems with large integration of wind capacity[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 3456-3472.
- [6] Chen C L. Simulated annealing-based optimal wind-thermal coordination scheduling[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2007, 1 (3): 447-455.
- [7] Hong Y Y, Li C T. Short-term real-power scheduling considering fuzzy factors in an autonomous system using genetic algorithms[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2006, 153 (6): 684-92.
- [8] 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 Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. 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.
- [9] Siahkali H, Vakilian M. Electricity generation scheduling with large-scale wind farms using particle swarm optimization[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79: 826-836.
- [10] 周双喜, 王海超, 陈寿孙. 风力发电运行价值分析[J]. 电网技术, 2006, 30 (14): 98-102.
ZHOU Shuang-xi, WANG Hai-chao, CHEN Shou-sun. Analysis on operation value of wind power resources[J]. Power System Technology, 2006, 30 (14): 98-102.
- [11] 牟聿强, 王秀丽, 别朝红, 等. 风电场风速随机性及容量系数分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 31 (1): 65-70.
MU Yu-qiang, WANG Xiu-li, BIE Zhao-hong, et al. Analysis of wind speed probability distribution and wind turbine generator capacity factor[J]. Power System Protection and Control, 2009, 31 (1): 65-70.
- [12] LI Fu-rong, Bless Kuri. Generation scheduling in a system with wind power[C]//IEEE / PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian (China): 2005.
- [13] Chen C L. Simulated annealing-based optimal wind-thermal coordination scheduling. The Institution of engineering and technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 10 (1): 39-52.

收稿日期: 2009-08-31; 修回日期: 2009-10-13

作者简介:

任博强 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场, 风力发电调度及其风险调度; E-mail: renboqiang1984@sjtu.edu.cn

蒋传文 (1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、配电网自动化、电力系统优化运行、水调优化调度, 风力发电等。E-mail: jiangcw@sjtu.edu.cn