

## 基于风电极限穿透功率的经济调度优化模型研究

袁铁江, 晁勤, 李义岩, 袁建党, 吐尔逊·伊不拉音

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 风电出力的时变特性, 决定了风电极限穿透功率对大规模风电并网系统的调度策略有重要的影响。在充分体现环境保护和风电特性的火电和风电的运行价格模型基础上, 基于风电场极限穿透功率和风电场出力预报可信度, 建立了风电并网电力系统经济优化调度模型。基于新疆乌鲁木齐电网对该调度模型进行算例仿真, 并采用遗传算法(GA)实现模型求解, 结果表明提出的清洁经济调度模型合理、有效。

**关键词:** 风电极限穿透功率; 运行价格; 风电场出力预报可信度; 调度模型; 遗传算法

### Research on optimization model of economic dispatch based on wind power penetration limit

YUAN Tie-jiang, CHAO Qin, LI Yi-yan, YUAN Jian-dang, TOERXUN Yibulayin

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** The time-varying characteristics of wind power output determines that the wind power penetration limit has important influence on dispatch strategy of large-scale wind power integrated system. In the foundation of operation price model for thermal power and wind power, which reflects the characteristics of environment protection and wind power, an economic optimization dispatch model based on penetration limit of wind power and credibility of wind power output forecast is built. The simulation test for the model based on Urumqi grid is conducted, genetic algorithm (GA) is used to calculate the model, and the results indicate that the clean economic scheduling model is reasonable and effective.

**Key words:** wind power penetration limit; operation price; credibility of wind power output forecast; scheduling model; genetic algorithm

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0015-08

## 0 引言

风电凭借其洁净可再生和技术的长足进步的优势<sup>[1-10]</sup>, 成为世界各国在解决日益严峻的能源枯竭和环境污染挑战时的必然选择。在这个过程中, 风电大规模开发和并网是必然的趋势。2008年 国家能源局确定把发展风电作为改善电源结构的重要任务之一, 先后启动新疆、甘肃和内蒙等 6 个千万千瓦级风电基地的规划和建设工作, 标志着我国风电开始步入大规模开发阶段。但是, 大规模风电的开发也还面临着一些亟待解决的问题或挑战。比如: 受技术条件的制约, 目前还没有一个能够有效确定或者计算风电穿透功率极限值的方法和模型, 常常造成调度时弃风, 显然这有违于国家能源政策。因此探讨极限风电穿透功率对电力系统的经济调度的影响是很有意义的。

在国内外对于这一问题相关联的风电并网系统

的经济调度问题有较多研究, 文献[11]按照“风电全额上网”原则, 在考虑了常规火电机组的调点效应引起的耗量成本基础上, 建立了风电并网系统的调度模型, 采用粒子群内点法相结合的方法对目标函数进行优化求解。文献[12-13]在完善了风电的价格模型基础上, 研究风电场并网系统调度模型, 并采用了遗传算法求解。文献[14]采用模糊建模的方法来克服风电出力波动带来的挑战。文献[15]在传统经济调度模型中加入风电出力模型, 通过随机模拟粒子群优化算法来求解。文献[16]着重探讨了风电并网系统的备用容量的优化配置。文献[17]将风能预测误差的概率分布与机组停运容量概率分布结合, 以确定风电接入后满足系统一定可靠性水平下的备用容量, 实现风电接入后机组组合问题中备用的概率处理。文献[18]基于电气剖分原理寻找与风电场关系最紧密的常规机组, 通过其输出功率调整来及时补偿

由风电场输出功率波动引起的有功功率缺失（或过剩）。但这些研究都没有考虑风电极限穿透功率对未来大规模风电并网系统对调度策略的影响。

本文从风电场出力预测的可信度和风电场接入电网的风电极限穿透功率等方面充分考察风电价格的影响因素，建立风电和火电电价计算模型，在此基础上建立了风电并网电力系统经济优化调度模型，并采用遗传算法（GA），基于新疆乌鲁木齐电网探讨了风电极限穿透功率对含风电电力系统经济调度的影响。研究结果为电力调度、规划部门以及风电投资商制定有关决策提供必要的科学依据，丰富和完善风力发电、清洁经济调度、电力市场的相关理论体系。

## 1 风电运行价格建模

### 1.1 基于风电场出力预测可信度的风电旋转备用容量补偿成本

由于风电随机性等特性导致风电并网后，风电场预报出力与实际出力存在偏差，因此系统旋转备用容量增加<sup>[15-17]</sup>。由于风电场出力预测可信度决定了由风电引起的这部分成本，本文提出用基于风电场出力预测可信度的风电旋转备用容量补偿成本来表示，系统总的风电旋转备用容量补偿成本见式（1）。

$$F_{WRC} = \sum_{j=1}^n P_C \cdot (1 - E_j) \cdot P_{WFj} \quad (1)$$

式中： $F_{WRC}$  为系统总的风电旋转备用容量补偿成本，万元； $P_C$  为系统备用容量价格，万元/MW； $E_j$  为第  $j$  个风电场预测出力可信度； $P_{WFj}$  为第  $j$  个风电场的预测出力，MW； $n$  为系统中的风电场数目。

### 1.2 基于极限穿透功率的风电场负效率运行惩罚成本

风电特性和电力系统的内在规律决定了对于特定的网络，存在一个风电极限穿透功率<sup>[5]</sup>，但这使得调度部门常常以此为借口决策风电场弃风运行，风能资源被浪费，降低了风电的利用效率。本文将因为调度原因造成的风电场弃风行为定义为：风电场“负效率”运行（Negative Efficiency Operation of Wind Farm, NEOWF）；同时将因此而损失的风电场出力定义为：风电场负效率功率（Negative Efficiency Power of Wind Farm, NEPWF），用  $P_{NEPWF}$  来表示。本文提出基于风电场极限穿透功率来量度 NEPWF 的惩罚成本，如式（2）所示。

$$F_{NEPWF} = \begin{cases} \sum_{j=1}^n P_N \cdot (P_{WSj} - P_{WFj}) & P_{WFj} < P_{WLPPj} \\ \sum_{j=1}^n P_N \cdot (P_{WSj} - P_{WLPPj}) & P_{WFj} \geq P_{WLPPj} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $F_{NEPWF}$  为总的风电场 NEPWF 惩罚成本，万元； $P_{WLPPj}$  为第  $j$  个风电场的极限穿透功率，MW； $P_{WSj}$  为第  $j$  个风电场计划调度出力，MW； $P_N$  为 NEPWF 的价格，万元/MW。

### 1.3 风电场营运成本

考虑到风电运行过程中无能量消耗，在计及风电的投资和运行维护成本的基础上，风电全寿命周期内的平均购电成本可近似表示为与发电量成线性关系<sup>[15]</sup>，如式（3）所示。

$$F_{WOP} = \sum_{j=1}^n P_{WOPj} \cdot P_{WSj} \quad (3)$$

式中： $F_{WOP}$  为总的风电场营运成本，万元； $P_{WOPj}$  为第  $j$  个风电场出力的营运价格，万元/MW。

### 1.4 风电电价模型

风电并网的环保成本是风力发电过程中对环境破坏的代价。虽然风电生产过程中也会存在诸如噪声、电磁波的干扰等副作用，但由于风电运行过程中无二氧化碳、氮化物、硫化物以及粉尘等污染物的排放，其对环境的破坏几乎可以不考虑。

综上所述，风电是一种特殊的电力，其价值分析建模是一个复杂的问题，需要综合考虑风电特性、能源利用效率、系统运行及环境保护等多方面的因素。

因此，对于有大规模风电场并网运行的电力系统来讲，风电的电价可用式（4）来表示。

$$V_W = F_{WRC} + F_{NEPWF} + F_{WOP} \quad (4)$$

## 2 火电运行价格建模

### 2.1 火电名义环境补偿成本

煤炭和石油等常规能源在发电时会排放出大量二氧化碳、氮化物、硫化物及粉尘等污染物，对环境造成了巨大的破坏。随着能源危机以及环境污染的加剧，世界各国都不断加强对污染物排放的控制，这也是各国政府积极促进风电等洁净能源发展的根本原因，然而长期以来火电的环境成本并没有在火电的价格中体现。排放污染物的环境代价评估是一个非常复杂的问题，很多方面尚没有定论，文献<sup>[15]</sup>提出在火电机组排污特性方程的基础上用火电机组的名义环境补偿成本来进行量化，火电机组的名义环境补偿成本见式（5）。

$$F_{\text{NEPT}} = \sum_{j=1}^m P_{\text{NEPT}} \cdot f_{ei} \quad (5)$$

式中:  $F_{\text{NEPT}}$  为总的火电机组的名义环境补偿成本, 万元;  $m$  为系统中火电机组数目;  $P_{\text{NEPT}}$  为火电名义环境补偿成本的价格, 万元/吨;  $f_{ei}$  为第  $i$  台火电机组的排污特性方程, 吨。从环境保护的角度来看, 各机组的排污特性可用单位时间内排放量折算成发电机组排放的  $\text{NO}_x$  的重量来表示, 所以  $f_{ei}$  可用式 (6) 来表示<sup>[18]</sup>。

$$f_{ei} = \partial_i + \beta_i \cdot P_{Ti} + \gamma_i \cdot P_{Ti}^2 + \zeta_i \exp(\lambda_i \cdot P_{Ti}) \quad (6)$$

式中:  $\partial_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $\zeta_i$ 、 $\lambda_i$  分别为第  $i$  台火电机组的排污特性系数, 可通过测量-拟合得到;  $P_{Ti}$  为第  $i$  台火电机组的出力, MW。

## 2.2 火电营运成本

考虑火电能量消耗、投资和运行维护等成本, 火电机组的营运成本可用式 (7) 来表示<sup>[14]</sup>。

$$F_{\text{TOP}} = \sum_{i=1}^m P_{\text{TOP}i} \cdot P_{Ti} \quad (7)$$

式中:  $F_{\text{TOP}}$  为系统总的火电营运成本, 万元;  $P_{\text{TOP}i}$  为第  $i$  台火电机组不计火电机组的名义环境补偿成本的价格, 万元/MW。

## 2.3 火电电价模型

综合考虑火电的内外部成本, 火电的价格可用式 (8) 来表示。

$$V_T = F_{\text{NEPT}} + F_{\text{TOP}} \quad (8)$$

# 3 大规模风电并网电力系统清洁经济调度建模

## 3.1 目标函数

传统的电力系统环境经济调度问题是一个多目标优化模型<sup>[19-20]</sup>, 但是在充分考察了风电和火电价值的基础上, 大规模并网风电电力系统的环境经济调度就成为一个常规意义下的经济调度问题。因此, 大规模风电并网环境经济调度目标是系统总的购电成本最小, 目标函数可用式 (9) 来描述。

$$\min F = \min V_T + V_W \quad (9)$$

式中,  $F$  为系统总的成本费用, 万元。式 (9) 改变以往的研究中以多目标建立目标函数的理念<sup>[19-20]</sup>, 将复杂问题简单化, 以“加”的方式把一个多目标优化问题合并为一个单目标问题。本文所论述的风火电运行价值建模中, 从实际的物理背景出发给出了基于实际的成本系数, 表明这些系数的取值有其真实的依据和合理性及标准, 从而解决了“加”的

关键问题, 即如何分配各因素的权重。

## 3.2 约束条件

风电的随机性等特性决定了在大规模并网风电电力系统的经济调度中, 必须考虑系统有功平衡, 机组的爬坡速率约束, 系统正、负备用约束, 机组最大和最小出力约束及线路断面传输容量约束。

(1) 系统有功平衡

$$\sum_{i=1}^m I_{Ti} \cdot P_{Ti} + \sum_{j=1}^n I_{WSj} \cdot P_{WSj} = P_{\text{load}} \quad (10)$$

(2) 机组的爬坡速率约束

$$-\zeta_{\text{Tdown}i} \leq P_{Ti} - P_{Ti} \leq \zeta_{\text{Tup}i} \quad (11)$$

(3) 系统正、负备用约束

$$\sum_{i=1}^m I_{Ti} \cdot P_{Ti}^{\text{max}} \geq P_{\text{load}} \cdot (1 + R_{\text{up}}) \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m I_{Ti} \cdot P_{Ti}^{\text{min}} \geq P_{\text{load}} \cdot (1 - R_{\text{down}}) \quad (13)$$

(4) 机组最大和最小出力约束

$$I_{Ti} \cdot P_{Ti}^{\text{min}} \leq P_{Ti} \leq I_{Ti} \cdot P_{Ti}^{\text{max}} \quad (14)$$

式 (10) ~ (14) 中,  $I_{Ti}$  和  $I_{WSj}$  分别表示第  $i$  台火电机组和第  $j$  个风电场的开停机状态,  $I_{Ti}=1$ 、 $I_{WSj}=1$  表示开机,  $I_{Ti}=0$ 、 $I_{WSj}=0$  表示停机;  $P_{\text{load}}$  表示系统总的负荷, MW;  $\zeta_{\text{Tdown}i}$  和  $\zeta_{\text{Tup}i}$  表示第  $i$  台火电机组出力的下降率和上升率, MW/单位时间;  $P_{Ti}^{\text{max}}$ 、 $P_{Ti}^{\text{min}}$  表示第  $i$  台火电机组出力的上限和下限;  $R_{\text{up}}$ 、 $R_{\text{down}}$  系统的正、负备用率。

## 4 算例分析

本文针对如图 1 所示新疆乌鲁木齐简化电网, 基于 GA 进行算例分析。

该区域电网包含有 13 个火电厂和 4 个大型风电场。火电厂的等值参数见表 1。风电场在研究周期内预测平均出力见表 2, 系统在研究周期内负荷见表 3。系统的正、负备用率取为 20%。风电场在研究周期内预测出力可信度为 0.85。在研究周期内达风一场营运价格  $P_{\text{WOP}1}$  为 0.055 万元/MW, 达风二场营运价格  $P_{\text{WOP}2}$  为 0.054 万元/MW, 达风三场营运价格  $P_{\text{WOP}3}$  为 0.055 万元/MW, 中节能风电场营运价格  $P_{\text{WOP}3}$  为 0.056 万元/MW。系统备用容量价格  $P_C$  为 0.011 2 万元/MW<sup>[17]</sup>。NEPWF 的价格  $P_N$  为 0.03 万元/MW。火电名义环境补偿成本的价格  $P_{\text{NEPT}}$  为 0.004 万元/吨<sup>[17]</sup>。各机组的初始状态为

$$I_{Til}=1、I_{WSjl}=1。$$

大规模风电并网电力系统环境经济调度不再是一个常规意义下的确定性问题，利用传统的方法难以获得既经济又有较高可靠性的解，对于这类问题的算法目前国内外研究的较多的是粒子群算法、GA等智能或者改进的智能算法<sup>[21-22]</sup>。本文基于GA来求解大规模风电并网电力系统清洁经济调度。表4是火电机组在研究周期的各时段的出力。表5是风电场在研究周期的各时段的出力。

由表1所示的火电机组的参数可知：红一2#机组、红二3#机组、红二4#机组等大容量机组由于燃烧效率高等因素决定了其不计火电机组的名义环境补偿成本的火电价格较低，所以在传统电力系统经济调度过程中，这些机组能够以较低的上网电价向系统运营商出售电能，从而获得比较优势；而红一1#机组、红二1#机组、红二2#机组等机组由于安装了污染物治理的装置，所以在不计火电机组的名义环境补偿成本的火电价格更高，同时具有更加优良的排污特性。红一3#机组、红一4#机组、红一5#机组、红一6#机组、红一7#机组、乌石化1#机组、乌石化2#机组等小容量机组由于燃烧效率低和加装污染物治理装置等因素决定了其不计火电机组的名义环境补偿成本的火电价格较高，但同时具有优良的排污特性，在相同的出力情况下排污量较小。

对比表2、表3和表5可以得到：各风电场的调度出力跟踪了各风电场的预测出力变化趋势，风电场预测出力大，调度出力也较大，反之亦然。

风电场的调度出力跟踪了负荷的变化趋势，负荷

大时风电场调度出力也较大，反之亦然。综上所述，本文模型从理论上一方面确保了在风电场出力能够跟踪负荷变化时，电网运营企业调度风电上网的积极性，另一方面确保了风电场运营企业在获得政策保护的调度优先权的同时，必须尽可能采取加装储能系统、提高风电场短期出力预报质量等技术措施，改善风电场出力曲线，以进一步提高电网运营企业调度风电的主动性和积极性。

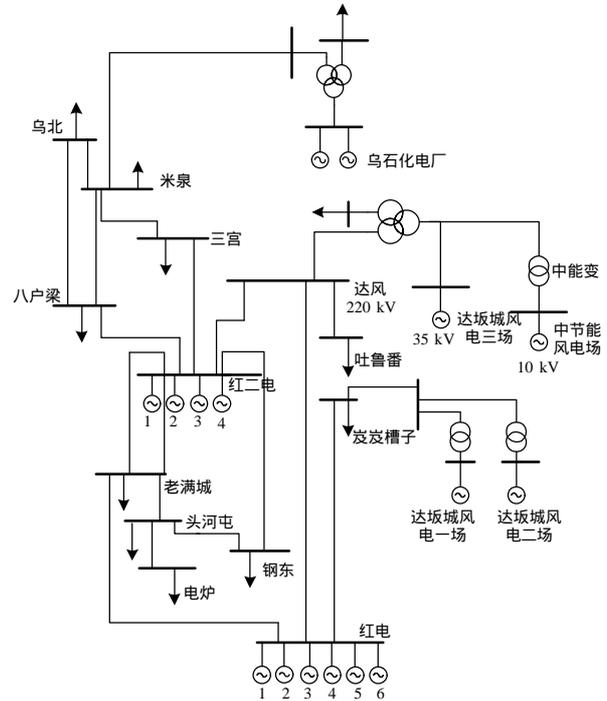


图1 乌鲁木齐简化电网

Fig.1 The simplified power grid of Urumqi

表1 火电机组的参数

Tab.1 The parameter of thermal units

电厂	红一	红一	红一	红一	红一	红一	红一	红二	红二	红二	红二	乌石化	乌石化
机组	1#机	2#机	3#机	4#机	5#机	6#机	7#机	1#机	2#机	3#机	4#机	1#机	2#机
$P_{Til}^{max}$	330	330	50	50	50	50	110	200	200	200	200	30	30
$P_{Til}^{min}$	110	80	23	23	23	23	50	60	60	60	60	8	9
$P_{TOPi,t}$	0.028	0.026	0.028 5	0.028 5	0.029	0.028 5	0.03	0.028	0.031	0.025	0.024	0.032	0.028 6
$\eta_i$	4.26	4.09	5.426	5.426	5.426	5.426	2.543	4.26	2.543	6.31	3.025	4.015	2.35
$\beta_i$	- 5.094	- 5.554	- 5.426	- 5.426	- 3.55	- 5.426	2.543	- 4.26	- 5.532	- 5.102	- 5.524	- 5.21	- 4.876
$\gamma_i$	4.59	5.49	5.426	5.426	4.88	5.426	3.543	3.18	3.143	5.46	3.025	3.85	3.71
$\delta_i$	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 25	0.000 2	2E-04	2E-04	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2
$\epsilon_i$	2.26	2.39	6.07	6.07	5.42	6.07	3.56	4.26	3.543	4.31	3.05	4.55	4.005
$\zeta_{Tup i,t}$	80	80	24	24	24	24	50	75	75	68	75	15	13
$\zeta_{Tdown i,t}$	80	80	24	24	24	24	50	75	75	68	75	15	13

表 2 风电场在各时段的预测平均出力

Tab.2 Average wind power at different periods

达风一场		达风二场		达风三场		中节能风电	
hour	Average power/MW	hour	Average power/MW	hour	Average power/MW	Hour	Average power/MW
1	13.316 673	1	30.483 326	1	22.147 66	1	14.086 709
2	17.562 99	2	33.237 009	2	55.205 201	2	37.835 194
3	26.366 76	3	26.733 242	3	68.560 841	3	63.207 512
4	24.049 232	4	29.050 77	4	55.623 462	4	30.649 757
5	25.975 769	5	27.924 233	5	46.593 309	5	64.181 808
6	18.980 885	6	29.219 116	6	33.957 871	6	33.247 879
7	21.944 851	7	25.555 149	7	52.895 916	7	58.336 021
8	26.444 729	8	23.355 27	8	124.816 276	8	77.497 2
9	24.327 078	9	26.972 921	9	123.681 477	9	57.199 345
10	27.353 371	10	24.646 629	10	63.412 88	10	36.251 961
11	26.597 925	11	26.502 077	11	68.434 141	11	44.492 889
12	26.359 884	12	26.640 116	12	67.055 103	12	71.489 029
13	31.526 226	13	21.273 773	13	116.219 65	13	65.440 269
14	30.743 996	14	23.056 003	14	129.668 404	14	69.702 82
15	29.970 778	15	23.529 222	15	96.476 223	15	63.572 872
16	25.695 549	16	23.104 45	16	119.172 199	16	77.010 048
17	20.229 454	17	22.870 548	17	47.779 093	17	10.839 053
18	3.775 349	18	9.024 651	18	58.080 208	18	30.609 161
19	5.315 154	19	2.484 846	19	59.853 388	19	30.487 373
20	4.732 926	20	0	20	29.357 92	20	14.776 835
21	0	21	0.177 723	21	2.663 739	21	0
22	0	22	0.159 951	22	0	22	0
23	0	23	0.124 406	23	0.319 649	23	11.772 754
24	6.906 024	24	10.393 977	24	30.887 472	24	14.086 709

表 3 各时段的负荷

Tab.3 Average load at different periods

hour	Load/MW	hour	Load/MW	hour	Load/MW
1	725.2	9	1 346.8	17	1 036
2	777	10	1 450.4	18	1 139.6
3	880.6	11	1 502.2	19	1 243.2
4	984.2	12	1 554	20	1 450.4
5	1 036	13	1 450.4	21	1 346.8
6	1 139.6	14	1 346.8	22	1 139.6
7	1 191.4	15	1 243.2	23	932.4
8	1 243.2	16	1 087.8	24	828.8

从表 4 火电机组在研究周期的各时段的出力数据可得到: 在本文的模型下, 一方面保持了传统经济调度模型相同的特性, 火电机组的出力变化趋势

与负荷的变化趋势相同; 另一方面, 在系统经济运行条件下, 排污特性优异的机组调度权大, 这就较好地兼顾了环境保护。

表 5 中各个风电场的调度出力数据表明: 其一, 为了保证系统的经济性, 在负荷低谷时风电场不得不处在 NEOWF 状态, 这也说明在火电出力低时其排污少, 因此火电相对风电调度权大, 较好地保护环境的同, 兼顾系统的经济性, 同时从技术上避免了所谓的“挤出效应”的发生, 从而危及系统运行的稳定和安全, 论证了一定条件下弃风的合理性; 其二, 在负荷增加到一定程度时, 随着火电排污增加, 风电的洁净优势使得风电相对火电具有竞争力, 风电场不再处于 NEOWF 状态, 所以在实现国家能源政策的同时, 兼顾了电力系统的经济运行。

表 4 大规模风电并网电力系统各火电机组清洁经济调度结果

Tab.4 The contribute data of thermal units at different periods

hour	红一电	红二电	红二电	红二电	红二电	乌石化 电厂	乌石化 电厂						
	1# 机组	2# 机组	3# 机组	4# 机组	5# 机组	6# 机组	7# 机组	1# 机组	2# 机组	3# 机组	4# 机组	1# 机组	2# 机组
1	110.00	80.00	37.28	35.44	32.55	33.66	50.00	60.00	60.00	60.00	60.00	22.37	22.37
2	110.00	80.00	36.10	36.93	37.46	36.06	50.00	60.00	60.00	60.00	60.00	20.46	20.46
3	110.00	80.00	47.42	47.42	47.42	47.42	50.00	60.00	60.00	60.00	60.00	27.42	27.42
4	121.05	91.05	50.00	50.00	50.00	50.00	67.62	71.05	71.05	71.05	71.05	30.00	30.00
5	123.19	93.19	50.00	50.00	50.00	50.00	72.11	74.11	73.19	74.22	76.60	30.00	30.00
6	141.43	111.43	50.00	50.00	50.00	50.00	98.65	101.04	97.70	97.81	98.84	30.00	30.00
7	139.66	109.66	50.00	50.00	50.00	50.00	99.95	99.50	98.43	101.10	100.55	30.00	30.00
8	135.69	105.69	50.00	50.00	50.00	50.00	98.58	98.27	100.24	99.04	99.63	30.00	30.00
9	147.75	117.75	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	117.30	118.44	116.68	117.30	30.00	30.00
10	171.54	145.97	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	148.14	147.69	146.32	146.33	30.00	30.00
11	174.17	151.41	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	154.14	154.74	154.88	151.94	30.00	30.00
12	176.09	157.63	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	157.76	157.56	157.06	157.63	30.00	30.00
13	156.06	131.89	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	132.18	132.65	130.94	129.78	30.00	30.00
14	145.22	115.22	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	114.91	113.01	116.63	113.70	30.00	30.00
15	137.66	107.66	50.00	50.00	50.00	50.00	100.90	100.00	101.67	100.11	100.05	30.00	30.00
16	125.28	95.28	50.00	50.00	50.00	50.00	77.61	77.26	77.88	79.60	80.60	30.00	30.00
17	133.32	103.32	50.00	50.00	50.00	50.00	84.47	85.47	85.00	83.63	83.81	30.00	30.00
18	143.42	113.42	50.00	50.00	50.00	50.00	101.74	102.68	101.56	100.11	99.95	30.00	30.00
19	156.45	126.45	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	119.47	119.28	118.29	120.40	30.00	30.00
20	191.78	165.04	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	165.85	167.05	165.83	168.64	30.00	30.00
21	187.39	158.07	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	156.03	156.51	159.70	155.84	30.00	30.00
22	161.73	131.73	50.00	50.00	50.00	50.00	110.00	119.73	118.74	118.04	119.45	30.00	30.00
23	134.75	104.75	50.00	50.00	50.00	50.00	79.85	84.75	84.75	84.75	84.75	30.00	30.00
24	112.45	82.45	50.00	50.00	50.00	50.00	52.45	62.45	62.45	62.45	62.45	30.00	30.00

表 5 大规模风电并网电力系统各风电场清洁经济调度结果

Tab.5 The contribute data of wind farm at different periods

达风一场		达风二场		达风三场		中节能风电	
hour	Average power/MW	hour	Average power/MW	hour	Average power/MW	hour	Average power/MW
1	7.685 053 564	1	27.426 853 56	1	17.840 853 56	1	8.570 853 564
2	10.658 980 9	2	28.684 980 9	2	36.215 103 9	2	33.971 980 9
3	27.740 410 03	3	28.161 410 03	3	50.027 726 23	3	50.159 993 48
4	27.657	4	33.408	4	63.967	4	35.247
5	29.872	5	32.113	5	53.582	5	73.809
6	21.828	6	33.602	6	39.052	6	38.235
7	25.237	7	29.388	7	60.83	7	67.086
8	30.411	8	26.859	8	99.680 039 59	8	89.122
9	27.976	9	31.019	9	116.798 269 2	9	65.779
10	31.456	10	28.344	10	72.925	10	41.69
11	30.588	11	30.477	11	78.699	11	51.167

续表 5

12	30.314	12	30.636	12	77.113	12	82.212
13	36.255	13	24.465	13	130.918 737 3	13	75.256
14	35.356	14	26.514	14	116.077 512 4	14	80.158
15	34.466	15	27.059	15	100.511 567	15	73.109
16	29.55	16	26.57	16	79.511 257 67	16	78.667 048 77
17	23.264	17	26.301	17	54.946	17	12.465
18	4.341 999 999	18	10.378	18	66.792	18	35.201
19	6.111 999 999	19	2.857 999 999	19	68.831	19	35.06
20	5.442 999 999	20	0	20	33.762	20	16.993
21	0	21	0.204	21	3.062 999 999	21	0
22	0	22	0.183 999 999	22	0	22	0
23	0	23	0.143	23	0.367 999 999	23	13.539
24	7.941 999 999	24	11.953	24	35.521	24	16.2

## 5 结论

(1) 本文提出在风电场预测出力可信度及风电场极限穿透功率的基础上来建立风电的价格模型, 为解决风电合理地投入系统发电给出了一种对策。

(2) 本文的清洁经济调度模型为大规模风电并网运行的调度问题的解决提出了一种新的方案: 在风电场出力能够跟踪负荷变化时, 电网运营企业具有调度风电上网的积极性, 因此风电场运营企业在获得政策保护的调度优先权的同时, 必须尽可能采取加装储能系统、提高风电场短期出力预报质量等技术措施, 改善风电场出力曲线, 以进一步提高电网运营企业调度风电的主动性和积极性。

### 参考文献

- [1] 晁勤, 院海, 吐尔逊. 风电系统稳定性动态仿真[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (25): 277-279.  
CHAO Qin, YUAN Hai, TUERXUN. Dynamic simulation for stability of wind power system simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 277-279.
- [2] CHAO Qin, Josef Tlustý, SUONAN Jia-le, et al. Windhydro- hybrid power system stability analysis and simulation[J]. Acta Technica Csan, 2005, 50 (3).
- [3] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉音. 风电场对电网继电保护的影响[J]. 电网技术, 2008, 2 (14): 15-18.  
WEN Yu-ling, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin. Impact of interconnected wind farm on power system protection[J]. Power System Technology, 2008, 2 (14): 15-18.
- [4] Fan Y F, Wang Y B, Chao Q. Wind-hydro hybrid power

system stability analysis[C]. // ICEMS2001, Proceedings of the Fifth International Conference on Electricalmachines and Systems, VOLS I AND II : 628-632.

- [5] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 一种静态安全约束下确定电力系统风电准入功率极限的优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (6): 25-29.  
LEI Ya-zhou, WANG Wei-sheng, YIN Yong-hua, et al. An optimization method for determining wind power penetration limit power system under static security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (6): 25-29.
- [6] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (3): 26-28.  
CHEN Shu-yong, DAI Hui-zhu, BAI Xiao-min, et al. Reliability model of wind power plants and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (3): 26-28.
- [7] 郑国强, 鲍海, 陈树勇. 基于近似线性规划的风电场穿透功率极限的优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 68-71.  
ZHENG Guo-qiang, BAO Hai, CHEN Shu-yong. Amending algorithm for wind farm penetration optimization based approximate linear programming method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (10): 68-71.
- [8] 朱雪凌, 张洋, 高昆, 等. 风电场无功补偿问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (16): 68-72.  
ZHU Xue-ling, ZHANG Yang, GAO Kun, et al. Research on the compensation of reactive power for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (16):

- 68-72.
- [9] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11): 1-5.  
YANG Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 1-5.
- [10] 王丽婕, 廖晓钟, 高阳, 等. 风电场发电功率的建模和预测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (13): 118-121.  
WANG Li-jie, LIAO Xiao-zhong, GAO Yang, et al. Summarization of modeling and prediction of wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (13): 118-121.
- [11] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 风力发电对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31 (20): 55-62, 70.  
SUN Yuan-zhang, WU Jun, LI Guo-jie. Influence research of wind power generation on power systems[J]. Power System Technology, 2007, 31 (20): 55-62, 70.
- [12] 刘韬文, 李孝杰. 考虑风力发电的电力系统经济调度[J]. 继电器, 2007, 35 (增刊): 273-276.  
LIU Tao-wen, LI Xiao-jie. Economic dispatch of power system incorporating wind power plant[J]. Relay, 2007, 35 (S): 273-276.
- [13] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场的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.
- [14] 江岳文, 陈冲, 温步流. 基于随机模拟粒子群算法的含风电场电力系统经济调度[J]. 电工电能新技术, 2007, 26 (3): 37-41.  
JIANG Yue-wen, CHEN Chong, WEN Bu-liu. Economic dispatch based on particle swarm optimization of stochastic simulation in wind power integrated system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26 (3): 37-41.
- [15] 袁铁江, 晁勤, 童菲. 电力市场下含风电的环境经济调度建模及优化仿真[J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 67-71.  
YUAN Tie-jiang, CHAO Qin, TONG Fei. An environmental/economic dispatch model for power grid containing wind power generation units and its simulation in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2009, 33 (6): 67-71.
- [16] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 风电对电力系统运行的价值分析[J]. 电网技术, 2002, 26 (5): 10-24.  
LEI Ya-zhou, WANG Wei-sheng, YIN Yong-hua, et al. Analysis of wind power value to power system operation[J]. Power System Technology, 2002, 26 (5): 10-24.
- [17] 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.
- [18] Roy S. Market constrained optimal planning for wind energy conversion systems over multiple installation sites[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17 (1): 124-129.
- [19] Shubham Agrawal, B K Panigrahi, Manoj Kumar Tiwar. Multiobjective particle swarm algorithm with fuzzy clustering for electrical power dispatch[J]. IEEE Trans on Evolutionary Comutation, 2008, 12 (5): 529-541.
- [20] Belkacem Mahdad, Tarek Bouktir, Kamel Srairi. Fuzzy controlled genetic algorithm for environmental/economic dispatch with shunt facts devices[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 13 (2): 148-155.
- [21] Walters D C, Shoble G B. Genetic algorithm solution of economical dispatch with valve point loading[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1325-1332.
- [22] 蒋秀洁, 樊立. 一种改进 PSO 算法在经济调度中的应用研究[J]. 继电器, 2007, 29 (3): 218-221.  
JIANG Xiu-jie, FAN Li. Research on application of an improved particle swarm optimization algorithm to economic dispatch of power systems[J]. Relay, 2007, 29 (3): 218-221.

收稿日期: 2009-09-09; 修回日期: 2010-11-10

作者简介:

袁铁江 (1976-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为风力发电及其并网技术; E-mail: ytjysr01@163.com

晁勤 (1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事风力发电及其并网技术的研究; E-mail: cqtdx@163.com

李义岩 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电及其并网技术。E-mail: liyiyang@189.cn