

基于风蓄协调的节能调度方法

张鹏, 刘继春, 吕林, 杨柳

(四川大学电气信息学院智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 为解决节能调度中风能接入造成运行成本增加和可靠性降低的问题, 提出了一种基于风蓄协调系统的节能调度方法。通过引入多个整型优化变量与协调周期不平衡量约束, 反映抽水蓄能机组发电、抽水、空闲等不同运行状态以及风电机组的出力波动特性, 并采用混合整数规划方法求解。算例分析表明, 该模型能克服风能的间歇性和波动性缺点, 提高系统运行可靠性与风能利用率, 降低整体运行成本, 能提供抽水蓄能机组适应节能调度需求的新型调度方案, 具有显著的经济效益与实用价值。

关键词: 抽水蓄能; 风蓄协调; 节能调度; 可靠性; 经济性

The energy-saving dispatch based on the coordination between pumped storage hydro and wind energy

ZHANG Peng, LIU Ji-chun, Lü Lin, YANG Liu

(Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To solve the problems of operation cost increase and reliability decrease after wind power integration in energy-saving dispatch, this paper proposes an energy saving dispatch method based on coordination between pumped storage hydro and wind energy. Through introducing several integer variables which denote different operation states (generation, pumping and idle) of pumped storage hydro unit, and the imbalance constraint during coordination period which illustrates the volatility characteristic of wind power, this paper establishes the energy-saving dispatch model based on the coordination between pumped storage hydro energy and wind energy and solves the model by using mixed integer programming method. The case study shows that this model can overcome the shortcoming of intermittency and volatility of wind power, enhance the reliability of power system and availability rate of wind power, and decrease the operation cost of whole system. The model can also give the new dispatch schedule of pumped storage hydro unit, which meets the requirement of energy saving and thus has significant economic benefits and practical value.

Key words: pumped storage; coordination between pumped storage hydro and wind energy; energy saving dispatch; reliability; economic

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0029-06

0 引言

风能属于典型的间歇性能源, 并且具有较强的波动性, 为保证风电并网后系统运行的可靠性, 需要额外安排一定容量的旋转备用以响应风电场发电功率的随机波动, 维持系统的功率平衡与稳定。可见, 风电并网对整个系统具有双重影响: 一方面分担传统机组的部分负荷, 降低系统的燃料成本, 另一方面又增加了系统可靠性成本^[1-3]。

目前, 不少学者对如何兼顾风电接入电力系统后的可靠性与经济性进行了研究。文献[4-5]提出风电与火电机组协调发电的方法, 给出了较详细的数学模型, 却没有提出保证风能利用率的方案; 文献

[6-9]提出含风电场的系统经济调度方法, 忽略了风能间歇性和波动性对系统可靠性的影响; 文献[10-11]考察电力市场和节能调度共同需求下的机组组合, 但没有利用风能等新型能源; 文献[12]结合电网实际运行情况总结抽水蓄能电站与常规水电、火电联合运行的经济效益, 没有考虑风能等新型能源, 也没有给出数学模型, 不具有可操作性; 文献[13]提出抽水蓄能电站与风电、火电的联合运行, 但没有给出节能调度模型, 并且也没有得出考虑风蓄协调时抽水蓄能电站新的调度方式, 具有一定的局限性。

本文将不同类型抽水蓄能机组的抽水、发电和空闲三种运行状态引入优化过程, 提出抽水蓄能与

风电机组协调发电的节能调度模型及其算法，确保协调后的系统出力相对平稳，尽量减少风能间歇性和波动性对电力系统尤其是火电机组出力的影响，既提高风能的利用率，又降低系统运行成本，同时还得到适应节能调度需求的抽水蓄能机组新型调度方式，最后通过算例仿真，验证了该模型及其求解方法的正确性。

1 风蓄协调系统描述

风速的预测周期和抽水蓄能电站的调度周期都较短，均可达到小时内^[12-14]。为更好地消除风能间歇和波动性对电力系统运行的影响，本文将精细化建模，把风蓄联合系统的协调周期也设置为小时内，此时，风蓄协调的目标是小时内各个协调周期的系统总出力保持一致。

风蓄联合系统应包含抽水蓄能机组、风能机组、协调系统等三个部分。

1.1 抽水蓄能机组

(1) 运行状态特性。在与风能进行协调的节能调度中，优化周期缩短，且风蓄系统有自己的协调目标，按一般“高峰发、低谷蓄”的原理来固定某个时段的抽水蓄能电站运行状态（抽水、发电或空闲）已经不是最合理、最经济的调度方式，需要建立适应风蓄协调的抽水蓄能电站新型节能调度方式。引入多个 0-1 整型优化变量反应抽水蓄能机组不同的运行状态，由于在一个时刻机组只能有一个运行状态，故有如式 (1) 状态特性。

$$\sum_{i=1}^3 X_i(t, k) = 1 \quad (1)$$

式中： $X_1(t, k)=1$ 时表示机组在第 t 小时第 k 个协调周期内处于发电状态，为 0 时表示非发电状态； $X_2(t, k)=1$ 时表示机组处于抽水状态，为 0 时表示非抽水状态； $X_3(t, k)=1$ 时表示机组处于空闲状态，为 0 时表示非空闲状态。

(2) 出力特性。抽水蓄能机组有同步机和异步机两种类型，小时内的出力特性可写为：

1) 发电状态。无论哪种类型机组，其出力均不能超出上限，即有：

$$\left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_g(t, k) - cP_{pgR}\right) X_1(t, k) \leq 0 \quad (2)$$

式中： K 为小时内协调周期数； $P_g(t, k)$ 为机组在第 t 小时第 k 时段的发电功率 (MW)； P_{pgR} 为机组额定容量 (MW)； c 为机组循环效率 (%)。

2) 抽水状态。同步机小时内只能有一个固定的

出力值，而异步机的出力可以灵活改变，即有：

$$\text{同步机: } (P_p(t, k) - C_i) \times X_2(t, k) = 0 \quad (3)$$

$$\text{异步机: } 0 \leq P_p(t, k) X_2(t, k) \leq P_{pgR} \quad (4)$$

式中： $P_p(t, k)$ 为机组在第 t 小时第 k 时段的抽水功率 (MW)； C_i 为第 t 小时同步机抽水功率 (MW)，且 $0 \leq C_i \leq P_{pgR}$ 。

3) 空闲状态。机组此时不做功，即有：

$$P_p(t, k) X_3(t, k) = 0 \quad (5)$$

$$P_g(t, k) X_3(t, k) = 0 \quad (6)$$

(3) 能量平衡特性。抽水蓄能机组发电量不能大于它当前蓄能的总量，该条件可写为：

$$P_{st}(t, k) + P_p(t, k) \geq P_g(t, k) \quad (7)$$

式中， $P_{st}(t, k)$ 为第 t 小时第 k 时段之前上水库所蓄水能可用于发电的能量 (MW)。

1.2 风电机组

风电机组的出力特性^[6]是当风速小于切入风速或大于切出风速时，可用出力为 0；当风速大于额定风速时，可用出力为机组额定功率；当风速介于切入风速和额定风速之间时，可用式 (8) 计算出力。

$$P_F(t, k) = \frac{P_{WR}(v(t, k)^3 - v_{ci}^3)}{v_r^3 - v_{ci}^3} \quad (8)$$

式中： $P_F(t, k)$ 、 $v(t, k)$ 分别为第 t 小时第 k 时段的可用风力发电出力 (MW) 及实际风速 (m/s)； P_{WR} 为机组额定功率 (MW)； v_r 为额定风速 (m/s)； v_{ci} 为切入风速 (m/s)。

由于风速的随机性，风力发电场的发电功率也是一组随机变量，一般研究将风速的随机分布近似看作服从某种分布，如 WEIBULL 函数等，计算较为繁杂。此外，风电场还有最大注入功率的问题，它不仅取决于风电场运行特性和系统中其他发电设备的调节能力，还与风电接入系统的网络结构等诸多因素密切相关。本文直接引入风电机组协调周期内出力不平衡量约束如式 (9) ~ (11)。

$$P_{wAV}(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_w(t, k) \quad (9)$$

$$\left| P_{wAV}(t) - P_w(t, k) \right| \leq IB_w(t) \quad (10)$$

$$0 \leq P_w(t, k) \leq P_F(t, k) \quad (11)$$

式中： $P_{wAV}(t)$ 为第 t 小时风能机组平均出力

(MW); $P_W(t, k)$ 为第 t 小时第 k 时段机组实际出力 (MW); $IB_W(t)$ 为第 t 小时机组出力不平衡量 (MW)。

不平衡量约束反映风速随机带来的不精度以及风电场的最大注入功率能力, 其效果可用舍弃的风能出力与风能利用率等指标衡量如式 (12)、(13)。

$$P_C(t, k) = P_F(t, k) - P_W(t, k) \quad (12)$$

$$UR(t) = \frac{\sum_{k=1}^K P_W(t, k)}{\sum_{k=1}^K P_F(t, k)} \quad (13)$$

式中: $P_C(t, k)$ 为第 t 小时第 k 时段舍弃的风能 (MW); $UR(t)$ 为第 t 小时风能利用率 (%)。

1.3 协调系统

风蓄联合系统目标是确保小时内各个协调周期内风电与抽水蓄能电站总出力保持平稳, 写为:

$$P_{ws}(t, k) = P_W(t, k) + X_1(t, k)P_g(t, k) - X_2(t, k)P_p(t, k) \quad (14)$$

$$P_{ws}(t, k) = P_{ws}(t, k-1) \quad k=2, 3, \dots, K \quad (15)$$

式中: $P_{ws}(t, k)$ 为第 t 小时第 k 时段协调出力 (MW)。

2 节能调度及其求解方法

风蓄系统与火电机组共同承担系统负荷, 即

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{Ti}(t, k) + P_{WS}(t, k) = P_L(t, k) \quad (16)$$

式中: NG 为火电机组数量; $P_{Ti}(t, k)$ 为第 i 台火电机组在第 t 小时第 k 时段出力 (MW); $P_L(t, k)$ 为第 t 小时第 k 时段负荷需求 (MW)。

在节能调度中, 通常认为风蓄系统没有生产成本, 其目标如式 (17)。

$$\min F = \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NG} F_i \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_{Ti}(t, k) \right) \quad (17)$$

式中: NT 为调度总小时数; F 为系统生产成本 (元); F_i 为第 i 台火电机组生产成本函数 (元/h)。

由式 (1) ~ (17) 描述的节能调度模型可通过调用 GAMS 优化软件中的混合整数规划 (MIP) 进行求解, 应计入的约束还包括火电机组最小/最大出力限制、爬坡率、系统备用需求等。

3 算例分析

设某地区典型日 24 h 负荷曲线数据如表 1 所示, 该地区有五台火电机组, 它们的运行参数如表 2 所示。本文将风速预测周期、抽水蓄能电站调度周期、风蓄系统协调周期均设置为与市场交易时段 (通常为 15 min) 相同, 此时, 风蓄系统中风电机组的可用出力如表 3 所示; 抽水蓄能机组额定抽水容量为 80 MW, 机组循环效率为 0.8, 上水库用于发电的初始蓄能为 100 MW。

表 1 日 24 h 负荷曲线数据

Tab.1 The data of load curve for a given day

小时	MW	小时	MW	小时	MW	小时	MW
1	1 490	7	1 530	13	1 770	19	1 745
2	1 435	8	1 610	14	1 735	20	1 785
3	1 400	9	1 660	15	1 660	21	1 820
4	1 385	10	1 710	16	1 720	22	1 840
5	1 410	11	1 760	17	1 740	23	1 805
6	1 475	12	1 800	18	1 755	24	1 730

表 2 火电机组运行参数

Tab.2 The parameters of thermal units

机组	容量/ MW	初始出力/ MW	上爬坡率/ (MW/15 min)	下爬坡率/ (MW/15 min)	成本/(元/ MW)
G1	1 000	600	15	10	30
G2	1 000	300	20	15	40
G3	1 000	200	25	20	50
G4	500	200	35	25	80
G5	500	150	45	35	100

表 3 风电机组可用出力

Tab.3 The available wind power

小时	15 min 可用风能/MW				小时	15 min 可用风能/MW			
1	90	120	70	80	13	120	135	105	95
2	105	145	215	180	14	125	155	140	120
3	150	130	115	145	15	145	135	155	140
4	130	140	105	125	16	165	195	200	180
5	100	65	50	80	17	160	185	150	140
6	115	95	110	140	18	145	160	155	165
7	125	90	135	105	19	145	140	120	145
8	135	155	140	135	20	160	170	205	185
9	115	95	85	90	21	155	180	195	180
10	105	110	95	110	22	150	200	145	180
11	80	115	95	105	23	130	140	135	140
12	135	150	140	170	24	155	190	210	195

下面分三种运行方式进行计算。

运行方式 A: 不计入协调, 仅用风电和火电机组带负荷, 由式 (9) ~ (13) 测算可知: 当出力不平衡量 $IB_W=55$ MW 时全天平均风能利用率最大。由于节能调度模型中不考虑抽水蓄能机组相关约束, 可利用 GAMS 非线性规划 (LP) 求解, 得到各火电机组出力、每小时风能利用率分别如图 1 及表 4 所示, 全天总运行成本为 1 690 075 元。

分析日负荷曲线可知, 在第 6~11 h 的负荷增长速度很快, 此时由于机组 G1、G2 和 G3 的爬坡率有限, 为了及时追踪负荷, 机组 G4 和 G5 需要保持较高的运行水平。此外, 为了尽量不限制风电场输出功率, 部分负荷从生产成本较低的机组 G1、G2 和 G3 向生产成本较高的机组 G4 和 G5 进行了转移, 其后果是增加了系统的运行费用, 带来了惩罚性成本, 风电价值打了折扣; 同时, 由图 1 可知火电机

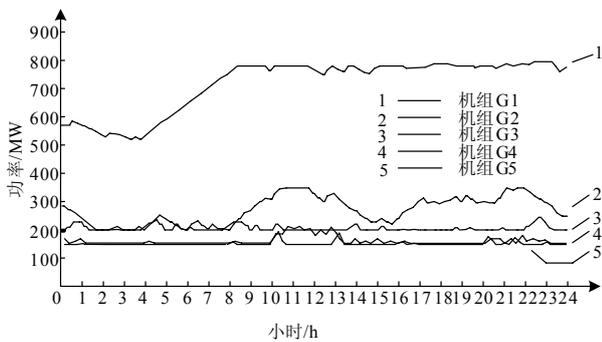


图 1 运行方式 A 各火电机组出力
Fig.1 Thermal unit output in case A

组在每小时内都在频繁增减出力值以追踪负荷变化和风能波动。

运行方式 B: 计入风蓄协调, 且抽水蓄能机组为同步机, 此时利用 GAMS 的 MIP 求解, 得到的各火电机组出力、每小时风能利用率分别如图 2 及表 4 所示, 全天总运行成本为 1 508 075 元。

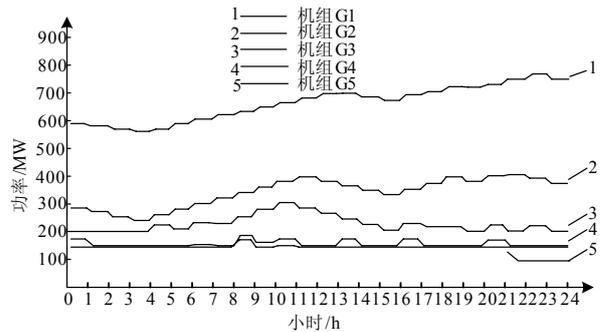


图 2 运行方式 B 各火电机组出力
Fig.2 Thermal unit output in case B

分析数据可知, 加入风蓄协调后, 不仅风能利用率提高, 系统运行成本降低, 而且火电机组全天出力平滑, 再不需要频繁改变出力值, 负荷转移情况大为减少, 这利于进一步降低系统运行费用。表 4 中运行方式 B 第 2、3、24 小时风能利用率较低, 是因为这些时段内负荷变化和风能波动大, 不能满足低成本机组爬坡要求, 而且同步抽水蓄能机组灵活性差, 为保证运行成本最低, 不得不舍弃部分风能。

表 4 各种运行方式下各小时的风能利用率 UR

Tab.4 Utilization rate of wind power of each hour in all cases UR %

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	80.31	45.17	41.20	54.37	57.16	70.35	67.51	85.86	79.54	88.78	70.10	82.32
B	91.67	57.36	55.56	61.15	67.80	82.61	79.12	97.35	88.31	100.0	81.01	93.28
C	82.22	86.82	85.70	94.34	89.49	73.04	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.81
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	85.51	80.45	71.47	87.19	71.75	82.73	76.85	86.17	76.80	81.27	87.50	47.63
B	98.90	88.89	80.00	100.0	85.04	97.60	87.27	97.22	87.32	97.04	95.41	53.33
C	100.0	100.0	95.30	100.0	100.0	100.0	100.0	98.33	100.0	96.89	100.0	94.60

适应节能调度需求的同步抽水蓄能机组调度方案如表 5 所示。

运行方式 C: 计入风蓄协调, 且抽水蓄能机组为异步机, 此时利用 GAMS 的 MIP 求解得到的各火电机组出力、每小时风能利用率分别如图 3 及表 4 所示, 全天总运行成本为 1 502 100 元。

异步抽水蓄能机组调度方案如表 6 所示, 可以

看出与同步抽水蓄能机组调度方案相比, 其发电和抽水的频率更高, 灵活性强, 从而可以更好地与风能进行协调, 风能利用率进一步得到提高。采用异步机组的另一好处是使火电机组出力调整主要在成本低的基荷机组之间进行, 峰荷机组出力变化小, 这样可以降低系统总运行成本。

表5 同步抽水蓄能机组调度方案

Tab.5 Synchronous pumped-storage unit dispatch

小时	15 min 出力/MW	小时	15 min 出力/MW
1	0, 0, 20, 10	13	10, 0, 25, 35
2	-7.5, -7.5, -7.5, -7.5	14	-17.5, -17.5, -17.5, -17.5
3	0, 0, 0, 0	15	-20, -20, -20, -20
4	0, 0, 0, 0	16	37.5, 7.5, 2.5, 22.5
5	0, 0, 0, 0	17	-2.5, -2.5, -2.5, -2.5
6	0, 0, 0, 0	18	10, 0, 0, 0
7	-4.5, -4.5, -4.5, -4.5	19	-10, -10, -10, -10
8	5, 0, 0, 5	20	25, 15, 0, 0
9	-5, -5, -5, -5	21	-17.5, -17.5, -17.5, -17.5
10	5, 0, 15, 0	22	30, 0, 35, 0
11	-2.5, -2.5, -2.5, -2.5	23	0, 0, 0, 0
12	5, 0, 0, 0	24	0, 0, 0, 0

表6 异步抽水蓄能机组调度方案

Tab.6 Asynchronous pumped-storage unit dispatch

小时	15 min 出力/MW	小时	15 min 出力/MW
1	0, 0, 20, 44	13	8, 0, 23, 35
2	-60, -80, -80, 0	14	-6, -36, -21, -1
3	0, 0, 64, 0	15	-37, 0, -47, -32
4	-45, -55, 0, -60	16	36, 6, 3, 21
5	-50, 0, 0, -14	17	-20, -45, -10, 0
6	59, 5, 0, 0	18	27.5, 12.5, 17.5, 7.5
7	-35, -45, 0, -15	19	-25, 0, -20, -25
8	22.25, 2.25, 17.25, 22.25	20	33, 23, 0, 8
9	-34.75, -14.75, -4.75, -9.75	21	0, -25, -40, -25
10	16, 11, 21, 11	22	30, 0, 35, 0
11	0, -35, -15, -25	23	22.5, 12.5, 17.5, 12.5
12	28, 14, 24, 0	24	0, -67.75, -80, -72.75

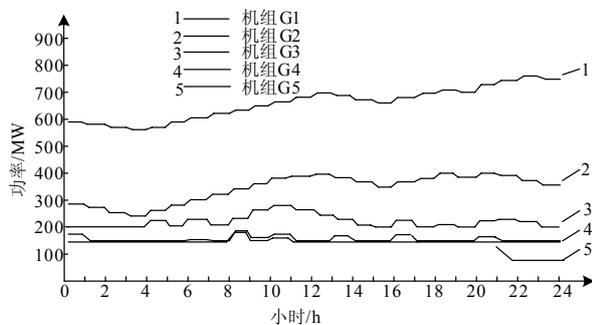


图3 运行方式C各火电机组出力

Fig.3 Thermal unit output in case C

根据上述算例得到的适应节能调度需求的抽水蓄能机组调度方案与一般的“高峰发、低谷蓄”方式对比如图4所示,其中曲线2~4中轴线上方的柱形图表示发电量,下方表示抽水量。由图4可见,本文提出的抽水蓄能机组调度方案能够自动选择最合理、最经济的运行状态来协调风能,如曲线2~3中在负荷较低的第1小时段发电,在负荷较高的第13~15、18等小时段抽水蓄能,这种新型的调度方式能够使得火电机组出力平稳,提高风能利用率,降低运行成本,具有显著的经济效益与实用价值。

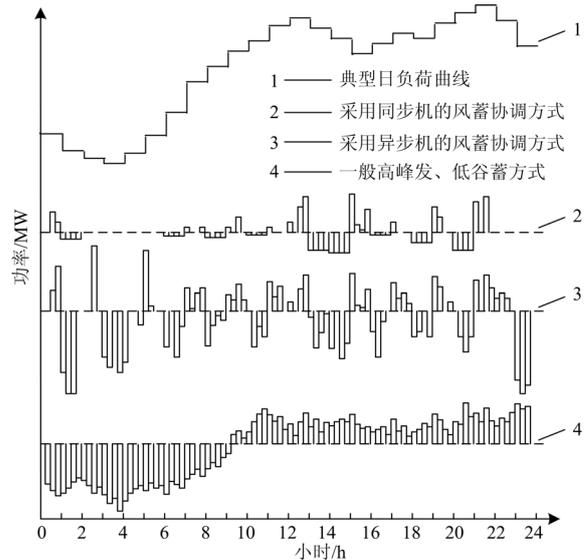


图4 抽水蓄能机组调度方案对比图

Fig.4 Comparison of different dispatch plans of pumped-storage unit

4 结论

本文提出的风蓄协调节能调度方法具有如下特点:(1)能得到抽水蓄能机组适应风蓄协调的优化调度方案,具备可操作性;(2)引入反映风速随机和风场最大功率注入能力的不平衡量约束,方便分析过程;(3)火电机组不需频繁改变出力值,这有助于改善系统可靠性;(4)显著提高风能利用率,降低系统运行成本,当采用异步抽水蓄能机组效果尤其明显。

参考文献

[1] 栗文义, 张保会, 巴根. 风能大规模利用对电力系统可靠性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 100-105.

LI Wen-yi, ZHANG Bao-hui, BA Gen. Reliability impacts of large scale utilization of wind energy on electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2008, 28 (1) : 100-105.
- [2] Eleanor Denny, Mark O'Malley. Wind generation, power system operation, and emissions reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 341-347.
- [3] 任博强, 彭鸣鸿, 蒋传文, 等. 计及风电成本的电力系统短期经济调度建模[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 67-72.
REN Bo-qiang, PENG Ming-hong, JIANG Chuan-wen, et al. Short-term economic dispatch of power system modeling considering the cost of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 67-72.
- [4] Chen C L. Simulated annealing-based optimal wind-thermal coordination scheduling[J]. IET Gener, Transm, and Distrib, 2007, 1(3): 447-455.
- [5] Ummels B C, Gibescu Madeleine, Pelgrum Engbert, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44-51.
- [6] 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 Yuan-zhang, WU Jun, LI Guo-jie, 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.
- [7] 温丽丽, 刘俊勇. 混合系统中、长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (24) : 24-29.
WEN Li-li, LIU Jun-yong. Monte carlo simulation of medium and long-term generation plan in hybrid power system based on environmental/economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (24) : 24-29.
- [8] 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.
- [9] 刘韬文, 李孝杰. 考虑风力发电的电力系统经济调度. 电力系统保护与控制, 2007, 35(S1): 276-279.
LIU Tao-wen, LI Xiao-jie. Economic dispatch of power system incorporating wind power plant[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(S1): 276-279.
- [10] Catalão J P S, Mariano S J P S, Mendes V M F, et al. Unit commitment in a competitive and emission constrained environment[J]. IEEE Latin America Transactions, 2009, 7(5): 560-568.
- [11] 徐致远, 罗先觉, 牛涛. 综合考虑电力市场与节能调度的火电机组组合方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (22) : 14-17.
XU Zhi-yuan, LUO Xian-jue, NIU Tao. Thermal unit commitment scheme considering electricity market and energy saving dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (22) : 14-17.
- [12] 刘德有, 谭志忠, 王丰. 风电—抽水蓄能联合运行系统的模拟研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24 (6) : 39-43.
LIU De-you, TAN Zhi-zhong, WANG Feng. Study on combined system with wind power and pumped storage power[J]. Water Resources and Power, 2006, 24 (6) : 39-43.
- [13] González J, Ruiz R. Stochastic joint optimization of wind generation and pumped-storage units in an electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 460-468.
- [14] 邵璠, 孙育河, 梁岚珍. 基于时间序列法的风电场风速预测研究[J]. 电力环境保护, 2008, 24 (4) : 1-5.
SHAO Pan, SUIN Yu-he, LIANG Lan-zhen. Study on the time-series wind speed forecasting of the wind farm based on time series[J]. Electric Power Environmental Protection, 2008, 24 (4) : 1-5.

收稿日期: 2010-02-01; 修回日期: 2010-05-26

作者简介:

张 鹏(1986-), 男, 硕士研究生, 从事电力市场研究;
刘继春(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统经济性分析及电力市场; E-mail: liujichunscu@gmail.com

吕 林(1963-), 男, 教授, 研究方向为配网自动化及其经济运行。