

考虑发、用电侧利益主体博弈的双层调度方法

市场环境下,随着风电的广泛接入,将需求响应纳入传统日前发电调度计划成为消纳风电、降低系统运行成本的有效手段。当电力公司制定日前发电计划时,如何根据消费者心理采取最优的电价决策方案调用负荷侧资源是目前亟须解决的重要问题。针对该问题,提出了一个考虑电力公司和用电用户有着不同利益需求的双层优化模型,该模型的上层为电力公司日前发电计划优化问题,将价格型需求响应调用成本纳入目标函数,下层是基于用户满意度促进风电消纳的日前实时电价的优化制定,并研究了电力公司运行费用与用户满意度的相互关系。算例分析结果表明,所提模型可以反映双方的利益博弈关系,并实现双主体利益的最大化。

董 雷 李 研/华北电力大学电气与电子工程学院
陈乃仕/中国电力科学研究院

0 引言

为了应对能源危机和生态环境的恶化,世界能源发展呈现出多元、清洁的特点^[1]。近年来,我国多地雾霾等环境问题突出,国家出台方针政策对2013~2017年的PM2.5治理、煤炭消费比重给出了具体量化目标,对京津冀、长三角和珠三角地区的PM2.5治理提出了严格要求。在这一背景下,风力发电成为最具经济发展前景的发电方式。然而,风电自身具有波动性、反调峰性和低可调度性等特点,随着风电并网容量的增加,弃风在所难免。根据国家能源局发布的数据显示,截止2014年9月底,全国风电累计并网容量为8 497万kW,2014年1~9月,全国风电上网电量为1 060亿kW·h,风电弃风电量为86亿kW·h,弃风已成为限制我国风电发展的重要因素。

制约风电消纳的主要因素包括风电

预测准确度相对较低、风能与电力负荷不能友好的配合,以及缺乏有效的应对风电不确定性的容量配置。因此,如何对风电消纳提高系统运行经济性与可靠性,使电源和负荷之间进行合理协调互动,已经成为一个热点研究问题。国内外学者已经对该问题进行了大量研究,在电源侧应对风电消纳的研究已经相对成熟,主要集中在如何调节常规机组起停出力来应对大规模风电接入,建立了传统的大规模风电并网调度模型和算法^[2-4]。在处理风电不确定性时,通常采用增加系统备用容量^[5-6]、建立随机机组组合模型^[7-11]和建立多时间尺度协调调度^[12-13]这3种方法。随着风机并网容量的不断增加,只通过调节常规机组出力很难实现风电的完全消纳,并且经济性欠佳。因此,在电力市场环境下,协调用户用电、灵活调用需求侧资源成为适应新能源预测出力不确定性的一种有效手段。需求响应(Demand Response)作为智能电网框架下一种重要的互动资源,已经广泛应用于国内外研究实践当中,对系统接入大规模新能源具有重要意义。文献[14-17]在传统发电调度中融入负荷侧调度计划,建立发用电协调调度模型,相较传统经济调度模型降低了系统运行成本,体现出了更好的经济性;文献[18-19]在建立机组组合模型中同时计及了价格型和激励型这两种需求响应方式,并且文献[19]还考虑了需求响应的不确定性;文献[20]分别建立并比较了基于实时电价的随机和确定机组组合模



董 雷/副教授

关键词/Keywords

需求响应·
发电计划·
日前电价·
用户满意度·
双层优化·

型。上述研究成果为大规模风电消纳、减少弃风量的相关研究提供了很好的指导意见。但在多数计及价格型需求响应的机组组合研究中并未考虑用户体验和价格型互动资源的调用成本。

针对上述问题,提出一种在电源侧、需求侧协调互动,促进风电消纳的双层调度模型,不仅在引导用户用电行为调用需求侧资源时考虑用户满意度,以保障需求响应措施更好地开展,而且在系统运行成本中加入价格型需求响应调用成本。上层以常规机组起停和出力状况为决策变量,构建以系统总运行成本最低的发电优化子问题;下层侧重通过调整电价引导用户用电行为改变,构建应对风电消纳考虑用户满意度的需求侧实时电价优化子问题,并基于Yalmip工具箱设计了混合迭代求解算法,仿真验证了所提方法的有效性。所提双层优化方法无须任何主观决策过程,因此所得优化结果更加客观、可信。

1 发用电协调互济调度模式

1.1 融入需求侧调度对传统发电调度的影响

与传统的发电调度相比,发用电协调调度模式将需求侧与供电侧通过先进的智能电网数据监测体系与电力信息系统融合于一体。在电力市场的环境下,电网公司可以通过更新实时电价或签订激励合同来引导用户的用电行为,进而改变负荷响应曲线,使能量在发电侧和需求侧形成良性的互动,促进大规模新能源入网消纳,使得调度更加灵活、经济。

所涉及的发用电协调调度模式在负荷侧考虑了价格型需求响应形式,并且要遵循以下原则:电网功率供需平衡原则,发电侧根据负荷曲线的改变实时更新发电计划;在保证供需平衡的基础上优先调度风力发电模式,促进风电消纳;优化电价时,综合考虑电网成本以及用户的用电体验,保证用户积极参与响应。

1.2 双层规划理论

双层规划理论是一种基于博弈论的优化方法,其分为上层、下层两个优化问题,并能体现

两个不同主体的意愿与利益,且上、下两层模型服从一定的主从关系。双层规划问题的一般形式如下,即

$$\min F(x, y) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } Q(x, y) \leq 0 \\ H(x, y) = 0 \quad (2)$$

$$\min f(x, y) \quad (3)$$

$$\text{s. t. } q(x, y) \leq 0 \\ h(x, y) = 0 \quad (4)$$

式中, F 、 H 、 Q 和 x 分别为上层决策者的目标函数、等式、不等式约束和决策变量; f 、 h 、 q 和 y 分别为下层决策者的目标函数、等式、不等式约束和决策变量。

在双层决策系统中,上层决策者通过决策变量 x 控制并影响下层的决策,下层模型根据上层模型传递的 x 作决策,并作出自己最优的“合理反应” y 返回上层。同时,上层能够知道下层对自己决策的反馈并试图确定总目标最优。

1.3 建模和求解的总体思路

目前,含风电的机组组合问题通常以机组出力、机组起停计划等为决策变量,以系统运行经济性作为目标,即机组运行费用、机组起停费用等费用之和最低。在此基础上,考虑价格型需求响应形式,将需求侧资源引入到传统调度模式中。并且基于消费者心理学,为诱导更多的需求侧资源参与电网互动,需要合理制定分时电价,让用户参与电网互动的同时也有利益可得。所探讨的计及需求响应的双层调度模型基本框架如图1所示。

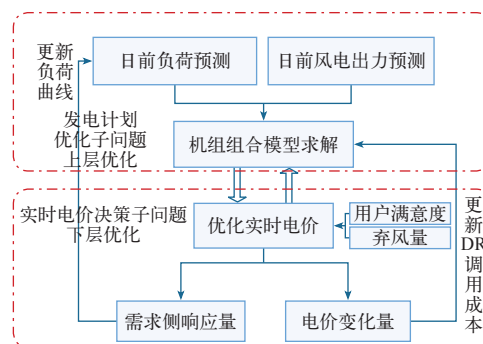


图1 双层模型的框架图

上层优化采用确定性机组组合模型；下层优化通过优化分时电价来调用需求侧资源，实现发、用电协调调度，并通过电源侧与需求侧资源的协调互动，以电价为决策变量，以减少弃风、提高用户满意度为目标函数进行优化。上层模型中机组出力与下层模型的电价作为内外层优化子问题的协调变量，通过双层优化模型的分解协调和迭代计算，求解出社会总利益最优解。

2 计及需求响应的双层调度模型建立

2.1 上层发电计划决策模型

所建上层模型在传统机组组合模型基础上，引入了需求响应资源的调用成本和弃风成本。需求响应资源调用成本用引入需求响应前后电力公司售电收入差来表示，考虑需求响应后的优化电价及负荷需求由下层模型返回。上层模型以系统总运行经济性最优为目标，即使机组运行和起停成本 C_G 、弃风成本 C_{GW} 和DR调用成本 C_{DR} 之和最低，即

$$\min F = C_G + C_{GW} + C_{DR} \quad (5)$$

其中

$$C_G = \sum_{i=1}^{N_G} U_{i,t} (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + U_{i,t} (1 - U_{i,t-1}) S_{i,t} \quad (6)$$

$$C_{GW} = \sum_{w=1}^{N_{WG}} \beta P_{w,GW,t} \quad (7)$$

$$C_{DR} = \sum_{t=1}^T (p'_t D'_t - p_t D_t) \quad (8)$$

式中， N_G 为系统中常规机组个数； $U_{i,t}$ 为常规机组 i 在时段 t 的起停状态，用0或1表示； $P_{i,t}$ 为常规机组 i 在时段 t 的有功出力； a_i 、 b_i 和 c_i 为常规机组燃料成本系数； $S_{i,t}$ 为机组起停费用； N_{WG} 为系统中风电场个数； β 为风电弃风惩罚系数； $P_{w,GW,t}$ 为风电弃风量； p'_t 、 p_t 分别为考虑需求响应优化前后的电价； D'_t 、 D_t 分别为考虑需求响应前后系统负荷需求。

分别从发电机自身约束和系统性约束对上层模型增加了约束条件。

(1) 有功出力上下限约束

$$U_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq U_{i,t} P_{i,\max} \quad (9)$$

式中， $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为常规机组有功出力的上限和下限。

(2) 爬坡速率约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_i^{\text{up}} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq R_i^{\text{down}} \end{cases} \quad (10)$$

式中， R_i^{up} 、 R_i^{down} 分别为常规机组单位时间内最大向上和向下爬坡功率。

(3) 最小起停时间约束

$$\begin{cases} (U_{i,t} - U_{i,t-1})(T_{i,t-1,\text{off}} - T_{i,\text{off}}) \geq 0 \\ (U_{i,t-1} - U_{i,t})(T_{i,t-1,\text{on}} - T_{i,\text{on}}) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中， $T_{i,\text{off}}$ 、 $T_{i,\text{on}}$ 分别为机组最小停机时间和最小运行时间； $T_{i,t-1,\text{off}}$ 、 $T_{i,t-1,\text{on}}$ 分别为截止到时刻 $t-1$ 机组 i 连续停机和运行的时间。

(4) 系统有功负荷平衡

$$\sum_{i=1}^{N_G} U_{i,t} P_{i,t} + \sum_{w=1}^{N_{WG}} (P_{w,t} - P_{w,GW,t}) = D_t \quad (12)$$

式中， $P_{w,t}$ 为风电预测有功出力。

(5) 系统备用约束

正旋转备用约束为

$$\sum_{i=1}^{N_G} \min \{(P_{i,\max} - P_{i,t}), R_i^{\text{up}}\} \geq \mu_{\text{wind}}^+ \sum_{w=1}^{N_{WG}} W_c + \lambda^+ D_t \quad (13)$$

负旋转备用约束为

$$\sum_{i=1}^{N_G} \min \{(P_{i,t} - P_{i,\max}), R_i^{\text{down}}\} \geq \mu_{\text{wind}}^- \sum_{w=1}^{N_{WG}} W_c + \lambda^- D_t \quad (14)$$

式中， μ_{wind}^+ 、 μ_{wind}^- 分别为风电预测误差对系统正、负旋转备用需求系数； λ^+ 、 λ^- 分别为系统负荷正、负旋转备用需求系数； W_c 为风电装机容量。

2.2 下层日前实时电价决策模型

考虑到需求响应措施能否顺利实施与用户用电满意度有较大关系，因此在制定和优化分时电价时，应充分考虑用户用电体验与利益，其集中体现在用户用电行为变化和用电费用支出这两个方面。如果不考虑用户满意度，可能会使优化结果危害到用户利益，不利于电力公司试图通过改变电价来调整用户用电负荷曲线来消纳风电这一目的。

为此，下层模型以上层模型结果为基础，以一天中各个时段电价优化调整量为决策变量，以

用户满意度 F_m 最大、系统日弃风量 F_{QW} 最小为目标函数，确定日前实时电价优化调整量。其中，用户满意度用文献[21]提出的用电方式满意度 M_f 与用电费用满意度 M_c 这两个指标进行衡量。因此下层模型是一个多目标模型，即

$$\max F_m = M_f + M_c \quad (15)$$

$$\min F_{QW} = \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^{N_{WG}} P_{w,GW,t} \quad (16)$$

其中

$$M_f = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} |D'_t - D_t|}{\sum_{t=1}^{24} D'_t} \quad (17)$$

$$M_c = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} |p'_t D'_t - p_t D_t|}{\sum_{t=1}^{24} p'_t D'_t} \quad (18)$$

约束条件如下。

(1) 电价调整约束

$$\Delta p_{t,\min} \leq \Delta p_t \leq \Delta p_{t,\max} \quad (19)$$

式中， $\Delta p_{t,\min}$ 、 $\Delta p_{t,\max}$ 分别为日前电价调整量的上限和下限。

(2) 电量调整约束

$$\Delta D_{t,\min} \leq \Delta D_t \leq \Delta D_{t,\max} \quad (20)$$

式中， $\Delta D_{t,\min}$ 、 $\Delta D_{t,\max}$ 分别为负荷调整量的上限和下限。

(3) 电价响应行为约束

$$\begin{pmatrix} \Delta D_1 \\ \Delta D_2 \\ \vdots \\ \Delta D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D'_1 & & \\ & D'_2 & \\ & & \ddots \\ & & & D'_n \end{pmatrix} \mathbf{E} \begin{pmatrix} \Delta p_1 / \Delta p'_1 \\ \Delta p_2 / \Delta p'_2 \\ \vdots \\ \Delta p_n / \Delta p'_n \end{pmatrix} \quad (21)$$

式中， $\mathbf{E}$ 为电量电价弹性矩阵，为一常数矩阵。

2.3 双层模型求解流程

该双层优化问题是一个同时含有离散和连续决策变量的非凸非线性问题。在解决上述问题的时候，使用遗传算法求解上层问题，使用成熟的YALMIP工具箱对下层问题进行求解。首先随机生成上层规划的种群样本，计算种群个体的上

层规划系统运行费用，同时对种群个体执行下层规划，得到各时段电价优化调整量；然后，根据下层优化的最优值计算上层模型适应度，选择、交叉和变异选择新种群直至满足遗传终止条件，得到各时段机组出力以及实时电价的最优实施方案。计算流程图如图2所示。

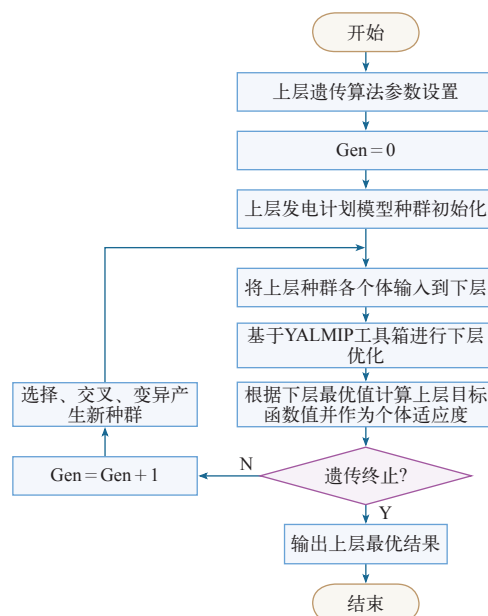


图2 双层模型计算流程

3 算例分析

3.1 测试系统和模型参数

通过10机1风电场的系统^[22-23]数据来测试所提的模型，日前负荷与风电出力预测曲线如图3所示。各机组参数取自文献[23]。假设初始电价为单一电价0.6元/kW·h，电量电价弹性系数矩阵取自文

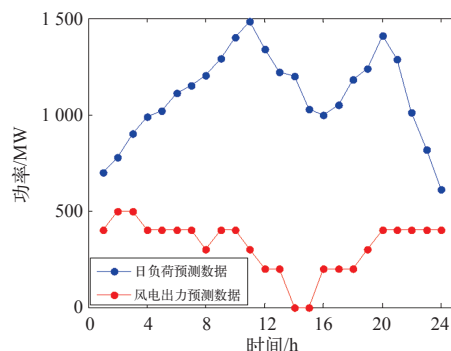


图3 典型日负荷数据和风机出力数据

献[24]。其中,自弹性系数取值为 -0.2 ,交叉弹性系数的取值为 0.033 ,用户的总用电量假设不变。

3.2 双层模型仿真验证

为了合理制定发电计划及实时电价,实现电网公司和用户的共赢,构建4种模式进行比较分析。

1) 模式1。不考虑需求响应,做传统含风电机组组合。

2) 模式2。考虑需求响应,不考虑用户满意度,以系统运行经济性最优为目标。

3) 模式3。考虑需求响应,并考虑用户满意度,以用户满意度最优为目标。

4) 模式4。采用本文双层优化模型,源荷协调调度。

不同模式的系统运行费用如下表所示。

表 不同模式下的优化结果

模式	用电方式 满意度	电费支出 满意度	起停费用 /元	运行费用 /元	需求响应调用 成本/元
1	1	1	68 060	394 960	0
2	0.786	1.043	58 325	368 830	681.89
3	0.959	1.145	63 610	387 080	2 299.41
4	0.902	1.089	63 155	375 400	1 411.36

由仿真结果可以看出,将需求侧资源调度融入到传统的发电调度中,无论是否考虑用户满意度都会大大降低系统总的运行费用,这是因为通过采取需求响应方式来调整负荷曲线可以降低传统机组的起停费用,提高机组的利用效率;另外,从模式2、模式3和模式4的结果对比中可以看出,在不考虑用户满意度的情况下,电力公司运行总费用的优化结果最低,但是这种模式下会严重损害用户的利益,模式3相比模式2,用户满意度大大提高,因为电力公司通过优化日前实时电价降低了用户的购电成本,提高了用户电费支出的满意度,相应地也提高了电网公司用于调用需求侧资源的成本,另外从用户用电方式满意度的提高中可以得出模式2负荷曲线的调整变化量小于模式3,由于传统机组受爬坡速率和最小起停时间的约束,会导致机组起停费用的提高。从模式4的优化结果中可以看出,本文建立的双层优化模型兼顾了电力公司与用户双方的利益,其用电方式

和电费支出满意度的优化结果相较模式2分别提高了 19.2% 和 4.4% ,系统运行总费用相比模式3降低了 3.1% 。

更明确地说,在电力市场的环境下,倘若电力公司作发电计划决策时不考虑需求侧用户满意度的影响,将会使自身作出的发电计划过于激进,不符合客观需要,从而难以推动需求响应方案的顺利开展,降低电力公司的竞争力;而对需求侧来说,若在参与需求响应的过程中过分追求自身用电满意度,降低购电成本,将会导致电力公司运行费用的提高从而没有制定出合理的发电计划造成资源浪费。采用本文的双层优化模型,在电力公司利益与用户利益的博弈过程中寻求出一个综合利益最大优化方案,即保证了用户的用电体验,也不会使得电力公司运行成本提高得过大。

3.3 风电消纳能力分析

图4进一步比较了4种模式下最终负荷需求的供给来源及风电的弃风情况。通过面积对比可

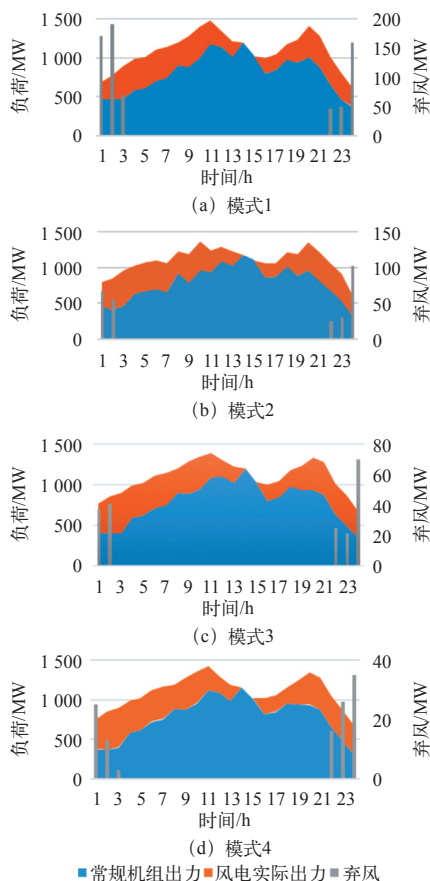


图4 不同模式下负荷供给来源构成

见,将需求侧资源纳入传统调度体系中,对原来负荷曲线起到削峰填谷的作用。另外,采用双层优化模型,风电总实际出力及其在各时段供给负荷需求的电能比例明显高于其他3种模式,其弃风总量为118 MW,弃风率仅为1.53%,而模式1、模式2和模式3的弃风率依次为8.92%、3.64%和2.52%。上述结果表明,本文的发用电双层调度模型对风电具有更强的消纳能力,可降低系统弃风的风险,保证了需求侧的用电满意度。

3.4 系统运行费用与用户满意度的关系

上文给出了双层模型的最优解,但是这一理想情况往往难以实现。下文将用户满意度设定5个等级,如图5中横坐标所示,以0.05作为满意度等级差额,将3.2节中模式3优化得到的用户满意度设定为最高等级(综合满意度归一化为1)并在相应的等级指标范围内应用本文的双层模型优化系统运行方式,得到的结果如图5所示。结果表明,当用户满意度小于0.85时,采用合适的日前实时电价调整用户用电实时需求可以适当降低系统总运行成本;当用户满意度大于0.85时,随着用户满意度的升高,电力公司的运行成本也会逐步增加,并且增加的幅度越来越大。因此,在电力公司根据不同的实际情况权衡系统运行费用与用户满意度制定日前发电计划时,其可以起到辅助决策的作用。

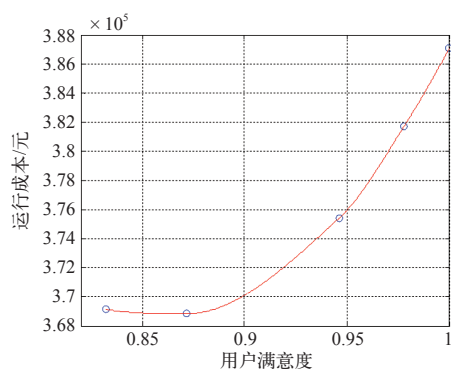


图5 系统运行费用与用户满意度的关系图

4 结束语

考虑了市场环境下电源侧和负荷侧两个不同主体有不同利益需求的情况,提出了一个发用电

协调调度双层优化模型,并在上层模型系统运行成本中添加了价格型需求响应的调用成本项。利用遗传算法对双层模型进行求解,算例结果分析表明:采用本文所提的双层模型制定日前发电计划与电价能够反映相关利益者之间的博弈关系,即发电侧与需求侧相协调,否则不利于双方利益的最大化;电力公司的运行费用与用户满意度之间相互冲突,合理制定日前电价可以有效地调整负荷需求曲线,进一步促进风电的消纳,降低电力公司的运行费用。最后,还给出电力公司运行费用与用户满意度关系的拟合曲线,对相关部门进行发电计划和电价的制定具有辅助决策作用。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] Schlueter R A, Park G L, Lotfalian M, et al. Modification of power system operation for significant wind generation penetration [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983 (1): 153-161.
- [3] Schlueter R A, Park G L, Reddoch T W, et al. A modified unit commitment and generation control for utilities with large wind generation penetrations [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985 (7): 1630-1636.
- [4] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (4): 51-56.
- [5] 张国强, 张伯明. 考虑风电接入后二次备用需求的优化潮流算法电力系统自动化 [J]. 2009, 33 (8): 25-28.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Siahkali H, Vakilian M. Fuzzy based generation scheduling of power system with large scale wind

- farms [C]. 2009 IEEE Bucharest PowerTech Conference, 2009: 1-7.
- [9] Bahman Bahmani-Firouzi, Ebrahim Farjah, Rasoul Azizipanah-Abarghooee. An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties [J]. Energy, 2013, 50 (1): 232-244.
- [10] 黄杨, 胡伟, 闵勇, 等. 计及风险备用的大规模风储联合系统广域协调调度 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (9): 471-475.
- [11] 颜拥, 文福栓, 杨首晖. 考虑风电出力波动性的发电调度 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (6): 79-88.
- [12] 张伯明, 吴文传, 正太一, 等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (1): 1-6.
- [13] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型与策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (22): 3664-3673.
- [14] 王卿然, 谢国辉, 张粒子. 含风电系统的发用电一体化调度模型 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (5): 15-18.
- [15] 刘晓, 艾欣, 彭谦. 计及需求响应的含风电场电力系统发电与碳排放权联合优化调度 [J]. 电网技术, 2012, 36 (1): 213-218.
- [16] 夏叶, 康重庆, 宁波, 等. 用户侧互动模式下发用电一体化调度计划 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (1): 17-23.
- [17] Botterud A, Zhou Z, Wang J, et al. Demand dispatch and probabilistic wind power forecasting in unit commitment and economic dispatch: a case study of illinois [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4 (1): 250-261.
- [18] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 36 (22): 35-44.
- [19] 孙宇军, 李扬, 王蓓蓓, 等. 计及不确定性需求响应的日前调度计划模型 [J]. 电网技术, 2014, 38 (10): 2708-2714.
- [20] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 基于实时电价的大规模风电消纳机组组合和经济调度模型 [J]. 电网技术, 2014, 38 (11): 2955-2963.
- [21] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (20): 14-18.
- [22] Gaing Z L. Constrained dynamic economic dispatch solution using particle swarm optimization [C]. 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, Colorado, USA, 2004: 153-158.
- [23] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (13): 115-121.
- [24] Kirschen D S, Strbac G, Cumerayot P, et al. Factoring the elasticity of demand in electricity of demand in electricity prices [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (2): 612-617.

(收稿日期: 2015-08-25) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告