

DOI: 10.7667/PSPC161822

大规模直购电下基于让渡价格的日前发电计划研究

刘克俭¹, 王铁强¹, 时珉¹, 曹欣¹, 张德亮², 薛艳军²

(1. 国网河北省电力公司, 河北 石家庄 050021; 2. 北京清大科越股份有限公司, 北京 100084)

摘要: 近年来, 我国大用户直购电规模和清洁能源装机增长迅速。在电网发电计划编制过程中, 保证清洁能源消纳和火电厂直购电量完成之间的矛盾开始显现, 给调度运行带来严峻挑战。针对这一问题, 结合当前日前发电计划编制的业务流程, 引入让渡价格, 设计了日前发电计划中清洁能源与传统电源发电权交易的新机制。围绕该机制, 提出了直购电量优先完成的发电计划预编制方法。最后基于 IEEE-39 节点系统构造算例论证了所提出方法的有效性。

关键词: 大用户直购电; 清洁能源消纳; 电网调峰; 日前发电计划

Research of day-ahead generation plan based on assignment price under consumers' direct-purchasing electricity

LIU Kejian¹, WANG Tieqiang¹, SHI Min¹, CAO Xin¹, ZHANG Deliang², XUE Yanjun²

(1. State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050021, China;

2. Qingdakeyue Corporation, Beijing 100084, China)

Abstract: The size of consumers' direct-purchasing electricity and the installed capacity of clean energy is growing rapidly in recent years in China. The conflict between the absorption of clean energy and the fulfillment of direct-purchasing electricity began to stand out especially in the process of day-ahead generation schedule which challenges the power dispatching. To solve this problem, this paper proposes a new generation right trading mechanisms for clean energy and the traditional one by introducing the concept of assignment price based on the current generation schedule. Besides, a compilation method of generation schedule to ensure the consumers' direct-purchasing electricity based on the new mechanisms is proposed. At last, the validity of this method is proved by a case study based on IEEE 39-bus system.

This work is supported by Smart Grid Integrated Demonstration Project Characterized by Comprehensive Interaction (No. 2013BAA01B02).

Key words: consumers' direct-purchasing electricity; clean energy accepted; peak load regulation of electricity grid; day-ahead generation plan

0 引言

近年来, 我国电力行业的市场体制与电源结构发生了重大变化。市场体制方面, 中发 9 号文的推动下, 发用电量计划放开, 以大用户直购电为代表的市场交易模式正逐步代替传统计划电量模式。电源结构方面, 风电、光伏等清洁能源发展迅速, 在电力系统中的比例越来越大。

文献[1-2]介绍了当前大用户直购电的模式, 大

用户、电网企业、发电企业签署三方购售电协议, 用户保证达到一定用电量, 并由该发电企业负责供电; 该发电企业除了传统计划电量模式下的计划电量部分还将增加一部分直购电量; 电网公司则需要保证参与直购电交易的电厂电量按照合约完成。由于当前直购电主要由火电厂参与, 因此风电的新能源大规模接入下, 日前发电计划面临越发严峻的调峰和新能源消纳的压力, 文献[2-3]详细地论述了上述问题。文献[4]在月度直购电量分配中考虑了清洁能源电量与直购电量分配问题。文献[5-6]提出了大规模风电接入下含大用户直购电的电力系统调度模型研究, 然而该模型所提出的清洁能源消纳成本与

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAA01B02)“以多环节综合互动为特征的智能电网综合示范工程”

直购电量成本优化, 还是传统的电量计划模式, 没有充分考虑市场化下的要求。文献[7]提出了消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统, 实际上实现了日前到日内的多时序电量协调。文献[8]综合考虑电量协调与成本控制, 提出了日内滚动发电计划, 以解决新能源消纳问题。文献[9]则构造了清洁能源与火电之间电能发电权的交易模型。

从上述介绍不难看出, 当前大用户直购电下对于日前发电计划编制中所面临的新能源消纳与直购电量完成等问题, 还主要依靠计划调控的手段, 没有引入市场化价格引导机制。

为此, 本文首先系统分析了大用户直购电模式下新能源消纳在日前发电计划中所面临的问题, 接着引入让渡价格, 提出了基于让渡价格的日前发电计划模型和实施流程, 最后介绍了该方法系统开发上的相关要求, 并基于 IEEE-39 节点系统构造算例论证了本方法的有效性。

1 日前发电计划中新能源消纳与保证直购电量的问题

直购电量一般按照年度签署, 由电网调度机构将其分解到月度计划、逐日电量计划中, 并保证执行。同时按照国家规定, 原则上要求在满足电网安全稳定运行要求的情况下对风电等清洁能源全额消纳。

在传统的计划电量模式下, 大规模新能源接入的影响主要体现在低谷时段的调峰问题上。风电等清洁能源逆调峰特性较为显著, 常为配合新能源消纳, 火电等传统能源需要深度调峰甚至启停调峰。而调峰成本则按照“两个细则”进行补偿。

而在大用户直购电迅速发展的时代, 上述矛盾将更为突出^[2-3]。对于火电厂, 其直购电量价格往往大幅低于标杆电价, 利润微薄, 同时直购电量结算优先于计划电量, 因此深调所损失的效益仅靠“两个细则”难以平衡。对于电网公司, 有义务保证直购电量完成。但在火电大量参与直购电、新能源大量接入的情况下新能源消纳和直购电量保证存在矛盾, 而日前计划中上述矛盾更加突出。

2 基于让渡价格的日前发电计划模型与模式

2.1 让渡价格思想的引入

让渡价格是指在日前发电计划编制过程中, 在保证火电机组不深度调峰且满足其电量计划的条件下, 对于风电等清洁能源机组所存在的弃风电量部分进行风电、火电发电权交易, 进行电量让渡所对应的电价。

发电权交易是电力市场中一种常见的交易形式, 其本质是不同发电厂之间的电量计划协商转移, 通过电量的二次分配, 使得所有发电厂效益得到改善。

2.2 基于让渡价格的日前发电计划实施模式

如图 1 所示, 基于让渡价格的日前发电计划实施模式主要包括以下四个步骤。

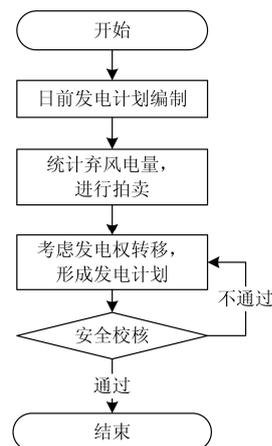


图 1 基于让渡价格的日前发电计划编制模式

Fig. 1 Day-ahead power generation planning model based on assignment price

1) 日前发电计划预编制

该模型需要注意如下内容: (1) 火电机组不进行深度调峰和启停调峰安排; (2) 由于调峰能力不足导致弃风等情况应在风电等新能源电厂中平均分配。该模型是在传统的经济调度模型基础上改造而得到的。将在下一节介绍这一模型。

2) 弃风电量拍卖

日前发电计划预编制将对风电等新能源日前功率预测曲线^[10]进行调整, 形成各风电场的日前发电计划曲线。规定各风电场的弃风电量即为日前功率预测曲线与日前发电计划曲线的差值。

上述弃风电量有两种原因产生: (1) 局部电网网络约束产生的弃风电量; (2) 调峰压力产生的弃风电量。

上述情况所导致的弃风电量由调度机构发布公告, 面向社会其他发电主体出让。出让的模式可以采用集中竞价、挂牌交易、双边协商等模式, 出让的结果是形成传统电源与新能源之间关于弃风、弃光电量转移的价量关系, 其中电量对应传统电源让渡给新能源供其避免弃风、弃光所对应的电量, 电价则是上述让渡新能源所需要支付给传统电源的价格费用。上述模式的本质是其他发电主体让渡其发电计划曲线所对应的电量, 从而使得风电等新能源能够减少弃风等电量损失。

3) 形成日前发电计划曲线

根据日前发电计划预编制的结果和风电场等新能源电厂与火电厂之间电量让渡拍卖的结果, 对各电厂的日前发电计划进行调整。

4) 安全校核分析

将步骤3)所得到的各电厂日前发电计划进行安全校核分析。如果有电厂出力不能满足安全校核要求, 则将调整建议反馈至步骤3), 通过取消其让渡电量等形式修正其发电计划, 直至结果满足安全校核的要求。

2.3 日前发电计划预编制模型

传统的经济调度模型本质上是一个以电网购电成本最低, 综合考虑电网运行约束和发电厂运行约束的规划问题。

在约束项中主要考虑的约束^[11-13]如下所述。

1) 电网运行约束

电网运行约束是指在经济调度优化中为了保证电网安全稳定运行所必须添加的约束条件, 主要包括如下约束项: (1) 电力电量平衡约束, 要求各时段全网电力电量平衡; (2) 传输断面潮流约束, 要求各时段断面潮流均在控制范围内, 并留有一定的安全裕度; (3) 备用约束, 要求旋转备用、调频备用均满足运行控制的相关要求, 备用充足, 能够满足调度运行需求。

2) 发电厂运行约束

发电厂运行约束是指经济调度优化中必须考虑的发电厂运行特性约束, 主要包括如下约束项: (1) 机组出力上下限约束, 水电、火电等传统电源出力必须处于其容量范围内; (2) 机组爬坡速率约束, 该约束重点针对火电厂, 由于火电厂出力调节速度有限, 因此必须考虑其爬坡能力, 要求其出力变化必须在爬坡速率范围内。

变量规定如下: 全网机组台数为 N_p ; 全网节点数为 N_B ; 第 i 台机组时段 t 的出力为 $P_{i,t}$; 第 b 个节点时段 t 的负荷为 $d_{b,t}$; 断面 L_k 的传输功率上、下限分别是 $\overline{P_{L_k}}$ 、 $\underline{P_{L_k}}$; 机组 i 对断面 L_k 的转移分布因子为 $G_{b_i-L_k}$; 节点对断面的转移分布因子为 G_{b-L_k} ; 机组 i 在时段 t 的正、负旋转备用容量为 $P_{i,t}^U$ 、 $P_{i,t}^D$; 全网正负旋转备用容量限值为 P^U 、 P^D ; 机组 i 出力上下限为 P_i^{\max} 、 P_i^{\min} ; 机组 i 升降出力能力为 RU_i 、 RD_i 。

以购电成本最小为优化目标, 有

$$\min \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T \rho_i P_{i,t} \right) + f(P) \quad (1)$$

式中, $f(P)$ 为由机组造成的网损函数。

约束项如下所述。

1) 发供电平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_p} P_{i,t} - \sum_{b=1}^{N_B} d_{b,t} = 0 \quad (2)$$

2) 线路传输功率约束

$$\underline{P_{L_k}} \leq \sum_{i=1}^{N_p} G_{b_i-L_k} P_{i,t} - \sum_{b=1}^{N_B} G_{b-L_k} d_{b,t} \leq \overline{P_{L_k}} \quad (3)$$

3) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^{N_p} P_{i,t}^U \geq P^U \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_p} P_{i,t}^D \geq P^D \quad (5)$$

4) 机组出力上下限约束

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (6)$$

5) 机组爬坡约束

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq RU_i \quad (7)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq RD_i \quad (8)$$

此外为了保证风电的弃风电量一致, 需在上述模型基础上增加如下约束。

$$\sum_{i=1}^T (P_{i,t}^{\text{WS}} - P_{i,t}^{\text{WR}}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T (P_{i,t}^{\text{WS}} - P_{i,t}^{\text{WR}})}{N_w} \quad (9)$$

式中: N_w 为风电场数量; $P_{i,t}^{\text{WS}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{WR}}$ 分别为第 i 个风电场在时段 t 的预测出力和计划出力, 且应满足 $P_{i,t}^{\text{WR}} \leq P_{i,t}^{\text{WS}}$ 。

对于网损项 $f(P)$, 本文参考文献[14]的研究成果, 可将其表示为二次项形式, 则上述模型将为二次目标凸规划问题, 可以直接调用 Cplex 等商用规划软件包求解。

2.4 让渡价格的形成方法

日前发电计划预编制所得的结果中, 当出现低谷调峰困难和断面约束限制时, 火电等传统电源降出力至其下限, 仍不能满足调峰需要或断面约束时, 则开始限制相关风电场出力。在不同时段所限制的风电电量即为让渡对象, 可以通过集中竞价等多种市场形势在传统电源和风电场之间形成协议, 即传统电源在保证安全运行的前提下低于出力下限降功率运行, 从而为风电消纳或消除阻塞创造空间, 而风电由此获得额外的发电空间, 避免弃风。为此风电需支付给相应的传统电源补偿费用, 即为让渡价格。关于让渡价格的形成需关注以下几个方面。

1) 市场组织机制。尽管可以采取集中竞价等多种方式, 但是考虑到执行效率, 为促进风电等新能源

源与火电厂尽快成交, 本文推荐采用挂牌交易的形式进行市场组织。具体执行过程中, 火电厂在获得弃风电量信息后在规定期限内向调度机构提交愿意出让的电量计划和期望获得的电量补偿。调度机构根据补偿价格、提交时间、让渡电量等信息制定原则撮合成交。

2) 挂牌价格限制。考虑到风电的上网价格和火电厂直购电价, 在执行过程中, 建议设定的补偿价格只能处于火电厂直购电价、风电上网电价之间。

3) 不同原因导致风电受限的处理方法差异。由于局部电网网络约束产生的弃风电量仅能由送端火电厂参与, 由其降低发电让渡电量给风电场。而调峰压力产生的弃风电量则可面向全网火电厂。当有用户可通过需求侧响应改变其用电计划时, 也可通过协议的形式参与拍卖。

2.5 让渡执行完毕后的计划修正

在风电与传统电源完成让渡交易后, 接受让渡价格的火电机组实际上承诺了在规定时段低于最小出力降功率运行。为此需要根据上述因素对 2.3 节所列的预编制模型进行修正。假定机组 i_{set} 和风电场 i_{wset} 之间关于时段 t 达成让渡协议, 机组将以低于其最小出力 $P_{i_{set}}^{min}$ 的功率 $P_{i_{set}}^{low}$ 运行。则需在预编制模型基础上增加如下约束。

1) 机组功率限定约束

$$P_{i_{set},t} = P_{i_{set}}^{low} \quad (10)$$

2) 风电出力限定约束

$$P_{wset,t} = P_{wset,t}^S + \gamma_{i_{set}-wset} (P_{i_{set},t}^S - P_{i_{set}}^{low}) \quad (11)$$

式中: $P_{i_{set},t}^S$ 、 $P_{wset,t}^S$ 分别为机组 i_{set} 和风电场 i_{wset} 预编制在时段 t 的计划功率; $\gamma_{i_{set}-wset}$ 为由于机组 i_{set} 降功率运行可为风电场创造的增发空间系数。当由于低谷调峰能力不足导致风电受限时, $\gamma_{i_{set}-wset} = 1$; 当由于断面限制导致风电受限时, $\gamma_{i_{set}-wset} = G_{b_{i_{set}}-L_k} / G_{b_{wset}} - L_k$ 。

由此重新启动计划编制, 并对优化结果进行安全校核即可得到最后的发电计划。

3 算例验证

本文在 IEEE-39 节点系统基础上构造算例, 对本文所提出的方法进行验证。IEEE-39 节点系统结构图如图 2 所示, 其中节点 30、31、32、33、34、35、36、37、38、39 为发电机节点, 其余节点为负荷节点, 相关参数见文献[15]。

算例中设定节点 30、37、39 所在区域电网机组送出存在断面限制, 其送出断面须控制线路

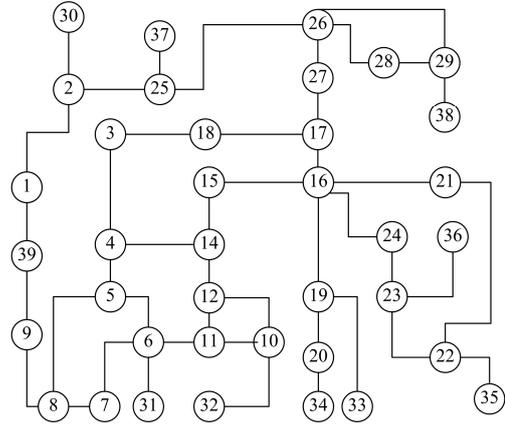


图 2 IEEE-39 节点系统

Fig. 2 IEEE-39 bus system

“9->39” + “2->3” + “25->26” 小于 400 MW。设定节点 30 机组为风电机组, 其功率预测曲线如图 3 中实线曲线所示; 设定节点 37、39 机组为火电, 其参数如表 1 所示。

表 1 电厂参数表

Table 1 Power plant parameter

所在节点	最大出力/MW	最小出力/MW
37	300	150
39	300	150

经过日前发电计划预编制, 在时段 10-11 范围内 (如图 3 中虚线所示), 由于风电大发, 受断面限制, 风电最大出力为 112 MW, 造成该时段范围弃风电量累计 126 MWh。由于该弃风电量是由于断面限制造成, 仅在其断面范围内的节点 37、39 机组能够通过降低出力, 为其消纳提供裕度。假定风电机组以挂牌方式对时段 10-11 的电量以不超过 0.2 元/kWh 的方式挂牌。节点 37、39 的机组分别按照其实际技术水平以在最小技术出力上降 20 MW、25 MW 方

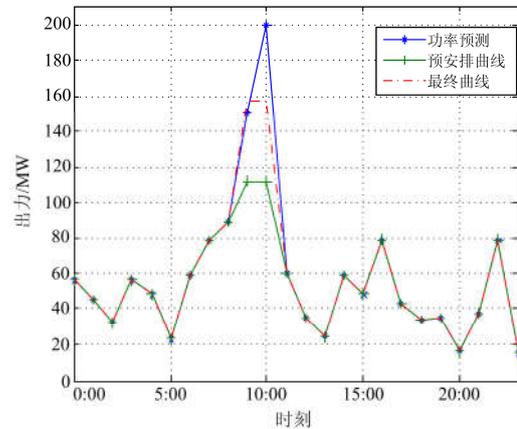


图 3 风电出力预测曲线

Fig. 3 Wind power forecasting curve

式摘牌。通过上述发电权转移,风电场最终的发电计划曲线如图3中点画线所示,将在虚线基础上增加45 MW的出力,而作为代价,风电场则需要以0.2元/kWh的价格向节点37、39的机组支付让渡费用分别为4000元、5000元。上述0.2元/kWh即为让渡价格。

经过上述让渡,风电场、节点37、39的机组其收益情况如表2所示。

表2 电厂收益变化

Table 2 Power plant revenue change

情况	对象	收益变化
	风电场	$90 \times (X - 0.2)$
让渡完成后	节点37 机组	$4000 - Y_1$
	节点39 机组	$5000 - Y_2$

让渡价格在现实生产中的实际意义在于对挖掘传统电源消纳新能源潜力提供了一种可行的方式。我国以火电为主的传统电源往往在并网调度协议中就规定了50%的调峰深度,与国外先进水平相比相距甚远,而实际中也存在机组具备低于50%额定容量运行的能力。由于没有足够的经济刺激,火电等传统电源缺乏足够的动力。表2中 X 为风电度电发电收益,对于清洁能源,其发电边际成本基本为0,故其度电发电边际收益可视为其电价,理论上当让渡价格不超过其电价时,风电场具有参与让渡交易的动力; Y_1 、 Y_2 分别为节点37、39的机组降出力的成本,对于火电机组,降出力至装机容量40%均不需要投油稳燃,这意味着一定程度的降出力对收益影响并不大,则当让渡价格超过其降出力成本时,火电机组就具有参与让渡交易的动力。

本文所提出的基于日前市场让渡电价模式实际上其过程能够清晰地展现出火电让出发电空间的过程,最大程度避免发电矛盾。

4 结论

本文深入分析了当前市场化改革不断深入、风电等新能源快速发展背景下电力系统发电计划编制所面临的问题。针对新能源消纳和保证直购电量的两难矛盾,提出了以新能源弃风电量等进行让渡的发电计划编制模型与模式。该模式的核心在于统计风电等弃风电量,在直购电价与风电上网电价这一相对合理的价格区间范围内,为风电弃风电量与火电发电权交易提供了交易平台,为双方开展交易提升效益提供了良好途径。随着市场化改革的不断深入,有望得到真正的应用实践。

参考文献

- [1] 胡江溢, 陈西颖. 对大用户直购电交易的探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 40-45.
HU Jiangyi, CHEN Xiyi. Preliminary discussion of direct electricity purchasing[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 40-45.
- [2] 张森林, 张尧, 陈皓勇. 大用户直购电交易若干关键问题研究[J]. 华东电力, 2009, 37(4): 523-528.
ZHANG Senlin, ZHANG Yao, CHEN Haoyong. Key issues on direct power purchase by large consumers[J]. East China Electric Power, 2009, 37(4): 523-528.
- [3] 张森林, 张尧, 陈皓勇. 大用户直购电关键问题深度剖析(1)[J]. 电力技术经济, 2009, 21(3): 17-21.
ZHANG Senlin, ZHANG Yao, CHEN Haoyong. Analysis on key issues of direct power purchase for large users (1)[J]. Electric Power Technologic Economics, 2009, 21(3): 17-21.
- [4] 李婷, 张慧玲, 邵鹏, 等. 考虑直购电影响的月度发电计划经济评估方法[J]. 企业技术开发, 2016, 35(1): 56-59.
LI Ting, ZHANG Huiling, SHAO Peng, et al. Economic evaluation method of monthly power generation plan considering the direct power purchase' influence[J]. Technological Development of Enterprise, 2016, 35(1): 56-59.
- [5] 张文韬, 王秀丽, 吴雄, 等. 大规模风电接入下含大用户直购电的电力系统调度模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2927-2935.
ZHANG Wentao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. An analysis model of power system with large-scale wind power and transaction mode of direct power purchase by large consumers involved in system scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2927-2935.
- [6] 丁涛, 郭庆来, 柏瑞, 等. 考虑风电不确定性的区间经济调度模型及空间分支定界法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3707-3714.
DING Tao, GUO Qinglai, BO Rui, et al. Interval economic dispatch model with uncertain wind power injection and spatial branch and bound method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3707-3714.
- [7] 张伯明, 吴文传, 郑太一, 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.
ZHANG Boming, WU Wenchuan, ZHENG Taiyi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 1-6.

- [8] 白杨, 钟海旺, 夏清, 等. 电量协调与成本控制的日内滚动发电计划[J]. 电网技术, 2013, 36(10): 2965-2972.
BAI Yang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. An intraday rolling scheduling with unit energy coordination and operating cost control[J]. Power System Technology, 2013, 36(10): 2965-2972.
- [9] 赵文会, 高姣倩, 于金龙, 等. 计及碳交易和绿色证书交易机制的发电权交易模型[J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1129-1137.
ZHAO Wenhui, GAO Jiaoqian, YU Jinlong, et al. Generation rights trade model with carbon trading and green certificate trading mechanisms[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(8): 1129-1137.
- [10] 刘爱国, 薛云涛, 胡江鹭, 等. 基于GA优化SVM的风电功率的超短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 90-95.
LIU Aiguo, XUE Yuntao, HU Jianglu, et al. Ultra-short-term wind power forecasting based on SVM optimized by GA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 90-95.
- [11] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文, 等. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统旋转备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 94-100.
LU Pengming, WEN Buying, JIANG Yuewen, et al. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and unit commitment coordination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 94-100.
- [12] 文旭, 郭琳, 王俊梅, 等. 面向节能减排的电力系统发购电计划研究述评[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 136-144.
WEN Xu, GUO Lin, WANG Junmei, et al. Overview of power dispatch and purchasing plan in power system from energy-saving and emission-reducing[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 136-144.
- [13] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0017-x
- [14] 赵维兴, 林成, 孙斌, 等. 安全约束条件下综合煤耗最优的节能调度算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 18-22.
ZHAO Weixing, LIN Cheng, SUN Bin, et al. Study on economic dispatch method of the optimal composite coal loss under security constraints[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 18-22.
- [15] 王旭冉, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 计及电动汽车充放电负荷的分布式电压稳定监控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 32(16): 43-49.
WANG Xuran, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Distributed voltage stability assessment and control considering electric vehicle charging and discharging load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 32(16): 43-49.

收稿日期: 2016-11-02; 修回日期: 2017-05-30

作者简介:

刘克俭(1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事于电网管理工作;

王铁强(1970—), 男, 通信作者, 博士, 从事于电网调度计划管理工作。E-mail: 18003218260@189.cn

(编辑 姜新丽)