

考虑煤耗率的火电机组灵活调峰 对风电消纳的影响效果研究

李明扬, 蒋媛媛

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

[摘 要] 火电机组灵活调峰是提高电网中风电消纳的重要手段之一, 然而火电机组在灵活调峰运行时的煤耗率较其正常运行模式有所提高, 现有电网调度模型未考虑该特性。本文采用分段线性函数表示考虑煤耗率火电机组发电费用函数, 建立灵活调峰火电机组与风电机组的日前机组组合优化模型, 该模型采用现有线性规划方法进行求解。最后采用实际风电机组和火电机组数据基于 IEEE-30 母线系统进行验证。结果表明, 本文提出的分段线性函数可以较好地拟合机组煤耗率与出力的关系; 火电机组深度调峰运行时煤耗率较其正常运行有所提高。本文计算方法有助于降低系统运行总费用, 提高电网中的风电消纳量。

[关 键 词] 电网; 调度模型; 火电机组; 灵活调峰; 煤耗率; 机组组合; 风电消纳

[中图分类号] TM732 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rld.201909194

[引用本文格式] 李明扬, 蒋媛媛. 考虑煤耗率火电机组灵活调峰对风电消纳的影响效果研究[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 45-51. LI Mingyang, JIANG Yuanyuan. Effect of flexible load regulation of thermal power units considering coal consumption rate on wind power utilization[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 45-51.

Effect of flexible load regulation of thermal power units considering coal consumption rate on wind power utilization

LI Mingyang, JIANG Yuanyuan

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Flexible load regulations of thermal power units are one of the key approaches to increase the wind power utilization in power systems. Power units under flexible load regulations have higher coal consumption rates than those in normal operating modes, while such characteristics are not captured by existing power system dispatch models. In this paper, a unit commitment model considering thermal power units in flexible load regulations is presented, and coal consumption rates of flexible units are characterized by using piecewise linear functions. The model is solved by using existing mixed integer linear programming (MILP) methods. Then, numerical examples on the IEEE 30-bus system with practical wind farm and thermal power unit data are presented. The verification results demonstrate that, the flexible load regulations of thermal power units can substantially improve the wind power utilization and reduce the generation costs.

Key words: power grid, dispatch model, thermal unit, flexible load regulation, coal consumption rate, unit commitment, wind power utilization

随着大规模新能源的接入,“弃风弃光”现象逐渐成为电网运行中的重要问题。近年来在特高压外送^[1]、需求响应^[2]、新能源与自备电厂替代交易^[3-4]等手段的作用下,我国平均弃风率逐年降低,但是

2018 年全国弃风电量仍高达 277 亿 kW h^[5]。造成弃风的主要原因是风能与负荷的时空不平衡性,即风电高发期大多在低负荷需求时段^[6-8],如冬季的夜晚,且风能丰富的地区往往远离负荷需求中心。这

收稿日期: 2019-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902100); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018ZD05)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2017YFB0902100); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2018ZD05)

第一作者简介: 李明扬(1983), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统分析及优化调度, limy@ncepu.edu.cn。

给很多区域电网的调峰带来一定困难^[9],使得大量风电无法有效消纳。

解决风电消纳问题的关键是合理地配置电网中的调峰资源。文献[10-13]考虑利用水电、天然气/石油发电、需求响应及储能等快速资源进行调峰,能够一定程度上促进新能源的消纳。然而,考虑到我国“贫油少气富煤”的能源结构,燃煤火电仍在我国发电结构中占据主要地位,传统火电机组的出力和调峰能力限制极大制约了电网对大规模新能源的消纳^[14-15]。

为从根本上改善制约新能源消纳的瓶颈因素,近年来我国大力推进燃煤火电机组的灵活调峰运行。国家发改委与国家能源局在 2018 年初联合发布《关于提升电力系统调节能力的指导意见》^[16],明确要求各地方政府与电力企业推进“实施火电灵活性提升工程”,并“加强电网调度的灵活性”,使得火电机组灵活性改造及其灵活调峰运行迅速得到工业界与学术界的密切关注。目前,我国北方部分发电机组已率先完成技术改造,如国电电力大连庄河发电有限责任公司超临界 600 MW 机组通过脱硝系统、燃烧系统和控制系统的改造优化,实现了纯凝工况下最小技术出力降低至 30%Pe;华能吉林发电有限公司长春热电厂、华能伊春热电厂有限公司亚临界 350 MW 机组通过增加固体电蓄热锅炉实现冬季供热中期整厂零出力等。

此外,在电网运行调度中还需要充分利用机组的灵活调峰特性来提高新能源消纳,现有研究关于火电机组灵活调峰运行的方法主要分为市场模式和计划模式 2 类。市场模式促进各种资源合理竞争和价值发现^[17-19],如文献[18]提出基于卡尔多改进的机制进行日前的深度调峰调度,但其未考虑启停成本;文献[19]提出在调峰困难时限制风电出力使系统中的风电装机总量提高的策略,但未深入分析火电机组组合决策问题。计划模式更侧重于从建模和算法角度深入挖掘调峰资源,调整模型资源结构,资源分配通常为统一计划^[20-25]。如文献[20-22]基于机组寿命损耗建立了深度调峰火电机组的分段成本函数,但未详细给出机组损耗的计算方法及其合理性验证;文献[23]建立了包含深度调峰火电机组、风电及可中断负荷的调度模型,验证了机组深度调峰能降低调度总成本,但未详细分析风电消纳情况。

针对火电机组灵活调峰运行的电网日前调度问题,本文首先基于对典型火电机组的灵活调峰煤

耗特性的分析,建立其煤耗曲线数值拟合模型,采用分段线性函数描述火电机组的发电成本。然后建立包含灵活调峰火电机组和风电机组的电力系统日前机组组合优化模型,该模型采用现有混合整数线性规划(MILP)方法求解。最后给出基于 IEEE-30 母线系统的算例结果,并在风电场景下与传统调度模型的结果进行对比分析,验证火电机组灵活调峰对于减少弃风电量,降低发电总成本的效果。

1 火电机组灵活调峰运行煤耗特性

图 1 为火电机组灵活调峰时煤耗曲线,其中 $P_{\max}$ 为最大出力, $P_{\min}$ 为深度调峰最小出力, P_b 为基础调峰最小出力,即传统意义的机组最小出力。由图 1 可见,灵活调峰运行区间可分为基础调峰区间 $[P_b, P_{\max}]$ 与深度调峰区间 $[P_{\min}, P_b]$ 。在基础调峰区间,机组煤耗率变化较平缓,一般为随负荷增大而减小的线性关系;在深度调峰区间,机组煤耗率变化很快,且稳定性较基础调峰区间小。我国典型火电机组的基础调峰最小出力 P_b 一般为 50%Pe^[26],经技术改造后机组的深度调峰最小出力 $P_{\min}$ 可达 30%Pe,甚至更低^[27-29]。

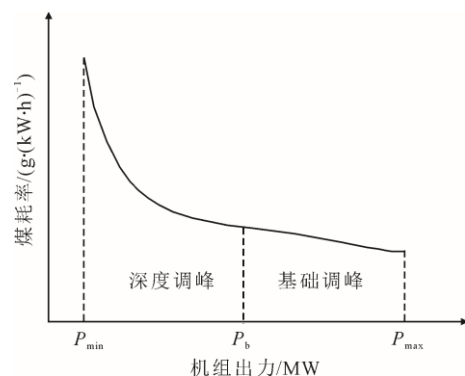


图 1 火电机组灵活调峰时煤耗曲线
Fig.1 The coal consumption rate curve of thermal units in flexible load regulations

在传统发电调度模型中,机组在基础调峰区间的煤耗率通常表示为出力的线性函数形式,相应的发电费用为出力的二次函数,在精度要求不高时发电费用也可用线性函数近似。在深度调峰区间,由于机组在该区间运行的燃烧效率降低,煤耗率增大,其发电费用曲线与基础调峰区间有所不同。为使模型简单,本文将机组在深度调峰与基础调峰区间的发电费用函数表示为

$$C(P)=\begin{cases} b_1P+c_1, & P_{\min}\leq P\leq P_b \\ b_2P+c_2, & P_b\leq P\leq P_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 为机组出力; b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 分别为各项特性系数, 与机组类型、燃烧品质和煤价有关。后面将基于电厂实际数据对机组发电成本函数的拟合效果进行分析。

2 灵活调峰机组日前调度模型

本文采用与文献[23]类似的火电机组日前机组组合决策模型, 调度周期为 T 。系统母线总数为 N , 输电线路采用两端母线编号的有序对 (i, j) 表示, 传输线集合记为 E 。系统中共有 G 台火电机组和 W 个风电场。

2.1 目标函数

日前机组组合的优化目标为总费用最小, 包括发电费用与机组启停费用:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G \left(C_g(p_g(t)) + c_{g,SU} v_g(t) + c_{g,SD} w_g(t) \right) \quad (2)$$

式中: $p_g(t)$ 为火电机组 g 在决策时段 t 的出力; $C_g(\cdot)$ 为机组 g 的分段线性发电费用函数; $c_{g,SU}$ 为机组 g 启动费用; $c_{g,SD}$ 为机组 g 关停费用; $v_g(t)$ 与 $w_g(t)$ 分别为机组启动和关停操作的 0-1 变量, 其取值为 1, 表示在决策时段 t 内将机组 g 启动或关停。

2.2 约束条件

日前机组组合问题的约束条件包括以下 6 组。

1) 发电与用电功率平衡约束

$$\sum_{\substack{g=1 \\ g \in IG(i)}}^G p_g(t) + \sum_{\substack{w=1 \\ w \in IW(i)}}^W p_w(t) - d_i(t) = \sum_{(i,j) \in E} f_{i,j}(t) - \sum_{(j,i) \in E} f_{j,i}(t), \quad i=1 \sim N, t=1 \sim T \quad (3)$$

式中: $p_w(t)$ 为风电机组 w 的出力, $d_i(t)$ 为母线 i 的用电负荷, $f_{i,j}(t)$ 为线路 (i, j) 上的潮流, $IG(i)$ 与 $IW(i)$ 分别为母线 i 上所连接的火电机组与风电场编号集。

2) 系统潮流传输容限约束

$$-F_{i,j} \leq f_{i,j} \leq F_{i,j}, \quad (i, j) \in E, t=1 \sim T \quad (4)$$

式中 $F_{i,j}$ 为传输线 (i, j) 的有功功率最大容限。

3) 火电机组出力范围约束

$$u_g(t) P_{g,\min} \leq p_g(t) \leq u_g(t) P_{g,\max}, \quad g=1 \sim G, t=1 \sim T \quad (5)$$

式中: $u_g(t)$ 表示机组 g 运行状态的 0-1 变量, 其取值为 1 表示机组处于运行状态, 为 0 表示停机状态; $P_{g,\max}$ 和 $P_{g,\min}$ 分别为机组 g 的最大和最小出力。

4) 火电机组爬坡率约束

为模型简单起见, 此处忽略火电机组爬坡速率在不同出力水平下的差异, 而将其设置为常数, 即

$$|p_g(t) - p_g(t-1)| \leq \Delta_g P_{g,\max}, \quad g=1 \sim G, t=1 \sim T \quad (6)$$

式中 Δ_g 为火电机组 g 的爬坡率。

5) 风电机组出力约束

$$0 \leq p_w(t) \leq p_{w,A}(t), \quad w=1 \sim W, t=1 \sim T \quad (7)$$

式中 $p_{w,A}(t)$ 为风电机组 w 在 t 时段的预测可用出力。

6) 对 3 组 0-1 变量的约束

$$v_g(t) - w_g(t) = u_g(t) - u_g(t-1), \quad g=1 \sim G, t=1 \sim T \quad (8)$$

$$\sum_{q=t-UT_g+1}^t v_g(q) \leq u_g(t), \quad g=1 \sim G, t=UT_g \sim T \quad (9)$$

$$\sum_{q=t-DT_g+1}^t w_g(q) \leq 1 - u_g(t), \quad g=1 \sim G, t=DT_g \sim T \quad (10)$$

式(8)表示 0-1 变量的状态转换关系, 式(9)和式(10)分别表示约束机组 g 的最短运行时间 UT_g 和最短停机时间 DT_g 。

上述目标函数式(2)和约束条件式(3)一式(10)构成了考虑灵活调峰火电机组的日前机组调度模型。该问题的目标函数为分段线性函数形式, 且所有约束条件均为线性形式, 故可采用分支定界法^[30]等现有混合整数线性规划方法进行求解。

3 灵活调峰火电机组算例分析

本节首先基于实际火电机组的煤耗率数据, 通过参数拟合得到其发电费用函数; 然后基于 IEEE-30 母线系统, 给出包含 1 个 450 MW 风电机组和 2 台 600 MW 灵活调峰火电机组的算例结果。该算例中的机组成本函数拟合在软件 MATLAB R2017a 版本中完成, 调度优化计算在 IBM ILOG CPLEX12.6 版本平台上实现。

3.1 发电成本拟合函数

采用 2017 年国电电力大连庄河发电有限责任公司火电机组数据。该机组额定出力为 600 MW, 基础调峰最小负荷 P_b 为 300 MW, 深度调峰最小负荷 $P_{\min}$ 为 180 MW, 参照环渤海动力煤价^[31]设置煤价为每吨 520 元。不同负荷下机组实际煤耗率见表 1。

表 1 不同负荷下机组实际煤耗率
Tab.1 The actual coal consumption rates of a typical thermal unit at different loads

负荷/ MW	煤耗率/ (g (kW h) ⁻¹)	负荷/ MW	煤耗率/ (g (kW h) ⁻¹)	负荷/ MW	煤耗率/ (g (kW h) ⁻¹)
180.06	352.38	300	322.05	500	307.27
200.00	362.00	350	317.91	550	304.89
240.25	333.99	400	313.79	600	302.52
250.00	334.28	450	310.52		

为比较不同函数形式的拟合效果,采用4个不同函数来拟合表1中的煤耗率数据,图2为典型火电机组的发电费用函数拟合曲线。

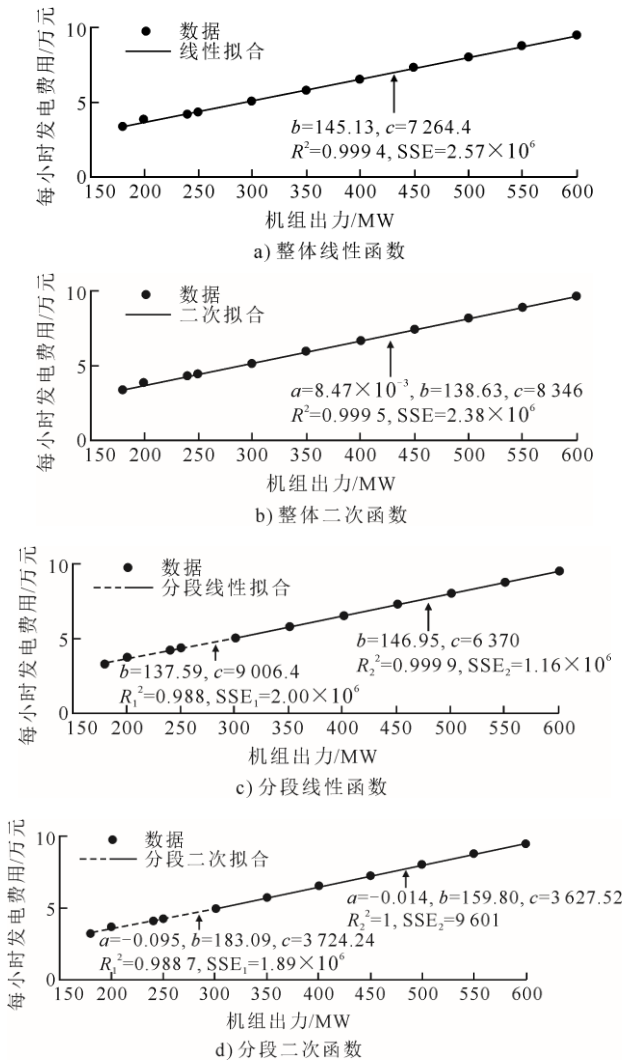


图2 典型火电机组的发电费用函数拟合曲线

Fig.2 The fitting curves of the generation cost function of typical thermal units

图2a)和图2b)分别为对整体机组负荷区间[180, 600] MW采用线性函数和二次函数进行拟合的结果;图2c)和图2d)分别为对机组负荷区间[180, 300] MW和[300, 600] MW分别采用不同的线性函数和二次函数进行拟合的结果。由图2可见:虽然图2a)和图2b)的整体拟合程度尚可,但其和方差(SSE)较大;图2c)和图2d)对深度调峰出力区间的煤耗率拟合效果很好,且图2c)采用的分段线性函数形式比图2d)的分段二次函数更简单。因此,本文采用图2c)的分段线性的机组发电费用函数

$$C_g(p_g) = \begin{cases} 137.592p_g + 9006.4, & 180 \leq p_g < 300 \\ 146.952p_g + 6370, & 300 \leq p_g \leq 600 \end{cases} \quad (11)$$

其在传统运行模式下的机组发电成本函数为

$$C'_g(p_g) = 146.952p_g + 6370, \quad 300 \leq p_g \leq 600 \quad (12)$$

3.2 日前机组优化调度

基于IEEE 30 母线测试系统^[32]的日前机组组合问题仿真结果,灵活调峰火电机组日前优化调度问题的决策周期为24 h,决策间隔为1 h。图3为用电负荷与4个场景下的预测风电出力情况。该系统中母线1和11上分别连接1台具备灵活调峰能力的火电机组,其负荷范围为[180, 600] MW,发电成本函数为式(11)。2台机组的最短停机时间 DT_g 和最短运行时间 UT_g 都为8 h,启动成本 $c_{g,SU}$ 为520 000元,关停成本 $c_{g,SD}$ 为0,爬坡率 Δ_g 为每小时100%,起始负荷 $p_g(0)$ 均为300 MW,起始状态均为运行状态,即 $u_g(0)=1$ 。母线8上连接1个风电场。用电负荷在文献^[32]数据的基础上按照2009年10月28日于天津蓟县采集的区域用电负荷曲线趋势发生波动,如图3中的黑实线所示。所有传输线潮流容限均为-500~500 MW。

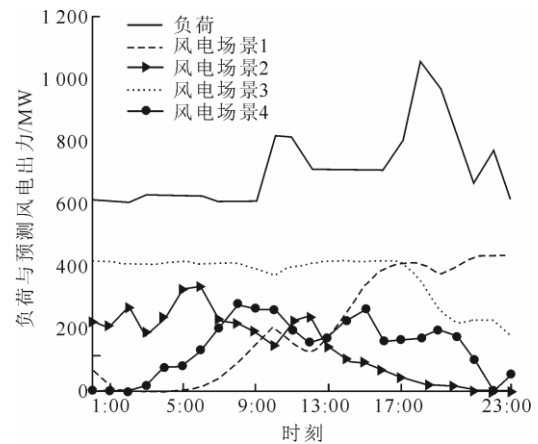


图3 用电负荷与4个场景下的预测风电出力情况
Fig.3 The electricity demand and evaluated wind power outputs in four scenarios

为分析不同风电负荷对机组组合结果的影响,选取大唐玉门昌马风电有限公司2013年4个不同风场景的风电负荷(图3),其中场景1的风电负荷总体呈上升趋势;场景2的风电负荷总体呈下降趋势;场景3整体风电负荷较高,尤其在0:00—17:00时刻内较高;场景4中白天风电负荷较高,夜晚负荷较小。另外,为将本文提出的机组灵活调峰调度模型与传统调度模型进行对比,采用式(12)作为传统模型中的机组发电成本函数,且机组负荷范围为[300, 600] MW。

表2和表3分别为机组日前优化调度后本文模

型与传统模型的发电总费用和弃风电量。从表2和表3可见,在所有风电出力场景下本文模型的发电总费用均少于传统模型的,在场景1、场景2和场景4中本文模型弃风电量比传统模型减少90%以上,验证了火电机组灵活调峰运行对提高风电消纳和降低运行总费用的效果。

表2 本文模型与传统模型的发电总费用

Tab.2 The total generation costs by using the proposed model and the conventional model

场景	本文模型/ $\times 10^7$ 元	传统模型/ $\times 10^7$ 元	总费用减少/%
1	2.102	2.297	8.49
2	2.324	2.647	12.20
3	1.816	2.216	18.05
4	2.324	2.525	7.96

表3 本文模型与传统模型的弃风电量

Tab.3 The abandoned wind energy by using the proposed model and the conventional model

场景	本文模型/(MW·h)	传统模型/(MW·h)	弃风电量减少/%
1	50.07	1 466.89	96.59
2	158.92	2 436.52	93.48
3	1 874.67	1 275.40	-46.99
4	43.02	1 435.65	97.00

在风电出力场景3中,虽然本文模型的发电总费用低于传统模型,但是本文模型的弃风电量有所增加,其原因是灵活调峰模式下火电机组较长时间保持低负荷运行,而传统模式下则将此机组停机。这说明从经济角度而言,虽然深度调峰运行会提高火电机组煤耗率,但是一定条件下其运行费用仍将高于机组频繁启停的方案。

为进一步分析火电机组灵活调峰对电网消纳风电的影响,图4给出了场景1下本文模型与传统模型的火电机组和风电场出力曲线。由图4可见,在风电出力较低的0:00—9:00时段,2台火电机组均正常出力;在9:00—19:00时段风电出力逐渐升高,而用电负荷也在增加,故2台火电机组仍正常出力;从20:00时起用电负荷逐渐下降,而风电出力仍较高,故传统模式下在20:00时将机组1关停,灵活调峰模式下则在20:00时将机组1出力降至最低出力180 MW,维持1 h后在21:00时将其关停。由图4b)可见,灵活调峰模式下风电场出力在6:00—10:00时段、12:00—18:00时段和20:00—23:00时段内均比传统模式下的风电场出力高,验证了火电机组灵活调峰运行对提高电网中风电消纳水平的效果。

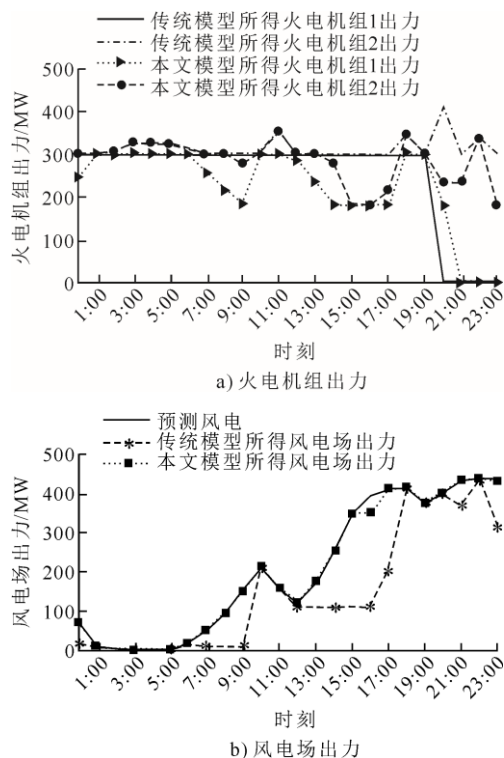


图4 场景1 本文模型与传统模型的火电机组与风电场出力
Fig.4 The wind and thermal power outputs by using the proposed model and the conventional model in Scenario 1

4 结 论

1) 本文研究了燃煤火电机组灵活调峰运行的煤耗特性的日前机组调度问题。首先基于曲线拟和方法,得到灵活调峰运行火电机组的分段线性发电费用函数;然后建立了含火电机组与风电场的日前机组组合优化模型;最后基于国电电力大连庄河发电有限责任公司火电机组的实测数据和 IEEE-30 母线系统进行实际算例分析,验证了本文模型的有效性。

2) 火电机组深度调峰运行时的煤耗率较其正常出力时有所提高,数据拟合结果表明采用分段线性函数可以较好地表示机组煤耗率与出力的关系;火电机组灵活调峰运行有助于降低系统运行总费用及提高电网中的风电消纳量。

3) 今后,应进一步研究火电机组在不同出力区间的煤耗率、爬坡速率等特性,构建更精细的发电机组出力特性模型;同时进一步研究用于求解含灵活调峰运行机组的日前调度问题的高效算法。

[参 考 文 献]

- [1] 董存,梁志峰,礼晓飞,等. 跨区特高压直流外送优化提升新能源消纳能力研究[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 41-50.

- DONG Cun, LIANG Zhifeng, LI Xiaofei, et al. Study on power optimization of the trans-regional UHVDC delivery channels in promoting renewable energy accommodation capacity[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 41-50.
- [2] WU H, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Demand response exchange in the stochastic day-ahead scheduling with variable renewable generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 516-525.
- [3] 华夏, 罗凡, 张建华, 等. 促进新能源消纳的自备电厂发电权交易模式可行性探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 200-206.
HUA Xia, LUO Fan, ZHANG Jianhua, et al. Feasibility analysis of trade mode promoting new energy consumption based on generation rights trade of self-generation power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 200-206.
- [4] 邵世圻, 戴赛, 胡林献, 等. 计及热网特性的电热联合系统调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 24-30.
SHAO Shiqi, DAI Sai, HU Linxian, et al. Research on heat-electricity combined scheduling method considering the characteristics of the heating network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 24-30.
- [5] 国家能源局. 2018 年风电并网运行情况[EB/OL]. (2019-01-28)[2019-06-24]. http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780779.htm.
National Energy Administration. The operation of wind power integration in 2018[EB/OL]. (2019-01-28)[2019-06-24]. http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780779.htm
- [6] 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.
WANG Beibei, LIU Xiaocong, LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 35-44.
- [7] 黄国栋, 许丹, 丁强, 等. 考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 162-170.
HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, et al. Review of grid dispatching considering thermal power and large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 162-170.
- [8] RAFAEL S. Application of a battery energy storage for frequency regulation and peak shaving in a wind diesel power system[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 764-770.
- [9] 白建华, 辛颂旭, 贾德香, 等. 中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 14-17.
BAI Jianhua, XIN Songxu, JIA Dexiang, et al. Study of major questions of wind power digestion and transmission in China[J]. Advantages of Power System & Hydroelectric Engineering, 2010, 26(1): 14-17.
- [10] 高志华, 任震, 黄雯莹. 电力市场中调峰权及其交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 88-92.
GAO Zhihua, REN Zhen, HUANG Wenying. Peak regulation right and the corresponding transaction mechanism in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 90-94.
- [11] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 计及需求侧资源的大规模风电消纳随机机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3714-3723.
LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Stochastic unit commitment model for high wind power integration considering demand side resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3714-3723.
- [12] YANG B, SHI K, LI D, et al. Research on power flexible load regulation technology based on demand response [C]//2018 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), Beijing: IEEE, 2018: 150-153.
- [13] 宋艺航, 谭忠富, 李欢欢, 等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 610-615.
SONG Yihang, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, et al. An optimization model combining generation side and energy storage system with demand side to promote accommodation of wind power[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 610-615.
- [14] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8.
- [15] 孙勇, 魏敏, 王磊, 等. 基于系统调峰约束的电网风电消纳水平研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 107-112.
SUN Yong, WEI Min, WANG Lei, et al. Study on wind power consumption based on system peak regulation capability constrain[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 107-112.
- [16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家能源局关于提升电力系统调节能力的指导意见[EB/OL]. (2018-02-28)[2019-06-24]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201803/t20180323_880128.html.
National Development and Reform Commission. The guidance of National Energy Administration on improving the regulation capability of power systems[EB/OL]. (2018-02-28)[2019-06-24]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201803/t20180323_880128.html
- [17] 张高航, 李凤婷, 周强, 等. 考虑风电并网友好性的日前分层调度计划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 118-124.
ZHANG Gaohang, LI Fengting, ZHOU Qiang, et al. Day-ahead hierarchical dispatching model considering friendliness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 118-124.
- [18] 菅学辉, 张利, 杨立滨, 等. 高比例风电并网下基于卡尔多改进的深度调峰机制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 110-118.
JIAN Xuehui, ZHANG Li, YANG Libin, et al. Deep-peak regulation mechanism based on Kaldor improvement under high-penetration wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 110-118.
- [19] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-66.
LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61-66.
- [20] 林俐, 田欣雨. 基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2255-2263.
LIN Li, TIAN Xinyu. Analysis of deep peak regulation

- and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2255-2263.
- [21] 杨凯洪, 许丹, 谢华宝, 等. 计及燃气-蒸汽联合循环机组的热电联合调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 137-144.
YANG Kaiqi, XU Dan, XIE Huabao, et al. Combined heat and power dispatching model based on gas-steam combined cycle unit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 137-144.
- [22] 邓婷婷, 娄素华, 田旭, 等. 计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 37-59.
DENG Tingting, LOU Suhua, TIAN Xu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with wind power considering demand response and deep peak regulation of thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 37-59.
- [23] 刘新东, 陈焕远, 姚程. 计及大容量燃煤机组深度调峰和可中断负荷的风电场优化调度模型[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 95-99.
LIU Xindong, CHEN Huanyuan, YAO Cheng. Economic dispatch considering deep peak-regulation and interruptible loads for power system incorporated with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 95-99.
- [24] 于娜, 李伟蒙, 黄大为, 等. 计及可转移负荷的含风电场日前调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 61-67.
YU Na, LI Weimeng, HUANG Dawei, et al. Day-ahead scheduling model in wind power integrated system incorporating shiftable load[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 61-67.
- [25] 杨楠, 王璇, 周峥, 等. 基于改进约束序优化方法的带安全约束的不确定性机组组合问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 109-117.
YANG Nan, WANG Xuan, ZHOU Zheng, et al. Research on uncertain unit commitment problem with security constraints based on improved constraint ordinal optimization method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 109-117.
- [26] 林俐, 邹兰青, 周鹏, 等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.
LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-27.
- [27] 齐建军, 廉俊芳, 赵志宏. 600 MW 火电机组深度调峰能力探讨与经济安全性分析[J]. 内蒙古电力技术, 2013, 31(4): 51-53.
QI Jianjun, LIAN Junfang, ZHAO Zhihong. Research on peak-load regulation of 600 MW thermal power units and its economic security analysis[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2013, 31(4): 51-53.
- [28] 付亦殊, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 51-57.
FU Yishu, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. A bi-layer peak-regulation compensation mechanism for large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 51-57.
- [29] KORY W H, MICHAEL C F, RICHARD P O, et al. Co-optimization of generation unit commitment and transmission switching with N-1 reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1052-1063.
- [30] DIMITRI P B. 非线性规划[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 567.
DIMITRI P B. Nonlinear programming[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 567.
- [31] 环渤海动力煤价报收 520 元/t, 跌 5 元/t[J]. 中国能源, 2015, 37(1): 47.
Thermal coal price at Circum-Bohai-Sea closed at 520 RMB per ton, reduced 5 RMB per ton[J]. China Energy, 2015, 37(1): 47.
- [32] University of Washington. Power system test case archive [EB/OL]. [2019-06-25]. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>.

(责任编辑 杜亚勤)