

基于负荷参与的源荷互动调峰多目标优化方法

田浩^{1,2}, 刘文颖¹, 王方雨¹, 王维洲³, 药炜⁴

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 江苏科能电力工程咨询有限公司, 江苏南京 210036; 3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃兰州 730070; 4. 国网山西省电力公司太原供电公司, 山西太原 030012)

Multi-Objective Optimal Method of Source-Load Peaking Regulation Based on Participation of Loads

TIAN Hao^{1,2}, LIU Wenyang¹, WANG Fangyu¹, WANG Weizhou³, YAO Wei⁴

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Jiangsu Keneng Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210036, Jiangsu, China; 3. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. Taiyuan Electric Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030012, Shanxi, China)

ABSTRACT: With integration of large-scale wind power, narrowness of the transmission channel and lack of the peaking regulation ability of the conventional power source often lead to the serious problem of abandoned wind. Therefore, it is necessary to find out new ways to improve the wind power integration capability. In this paper, first of all, the characteristics of adjustable loads such as high-energy load, electric boilers and electric vehicles are analyzed. Secondly, based on the adjustable characteristics of all kinds of loads, a multi-objective optimal model of source-load interacting peaking regulation is established to minimize the operating cost and maximum the consumed capacity of wind power. Next, an improved genetic algorithm is used to solve the model. Finally, the feasibility and validity of peak shaving optimization method are verified by an example.

KEY WORDS: source-load interaction; peaking regulation; adjustable load; improved genetic algorithm

摘要: 大规模风电并网后,外送通道狭窄以及常规电源调峰能力不足导致弃风问题严重,为此,需要寻求提高风电消纳能力的新途径。分析了高载能负荷、电热锅炉和电动汽车负荷的可调节特性,基于各类负荷的可调节能力,建立以消纳风电最大和系统运行成本最小的源荷互动调峰多目标优化模型,并采用改进遗传算法进行求解。通过算例验证了调峰优化方法的可行性与有效性。

关键词: 源荷互动; 调峰; 可调节负荷; 改进遗传算法

近年来,我国风电装机容量迅速提高。由于外送通道狭窄,大规模新能源基地弃风问题严重。为消纳风电,常规机组压出力运行导致系统运行成本大幅升高^[1]。利用高载能企业、电动汽车、蓄热电锅炉等大容量负荷的可调节特性,形成源荷互动调峰模式,是提高电网风电消纳电量、降低系统运行成本的可行途径。

大容量可调节负荷用于源荷互动调峰,具有以下特性:1) 可调节容量大。高载能企业的用电成本占产品总值的比例一般在30%以上,大规模风电基地一般都建有高载能企业。高载能负荷在甘肃酒泉风电基地附近有大量分布;电动汽车、蓄热电锅炉负荷也在此地大量分布。2) 调节速度快。电动汽车的充放电能力来源于其蓄电池,目前蓄电池已能够实现快速充放电。电动汽车的调节速度很大程度上

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51377053); 国家科技支撑计划(2015BAA01B04); 国家电网公司科技项目(52272216002D); 国网甘肃省电力公司科技项目(SGGSKY00JNJS1700152)。

Project Supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51377053); the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAA01B04); the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (52272216002D); the Science and Technology Program of State Grid Gansu Electric Power Company of China (SGGSKY00JNJS1700152).

与调度模式相关,优化后的控制调度模式可实现分钟级的调节^[2-3]。蓄热电锅炉调节速度较快,能够针对风电出力做出一定幅度的功率调整,调整尺度可以达到小时级^[4]。高载能负荷的功率调整需要根据风电出力预测在日前做出调整计划,可以实现日内级别的调节^[5-6]。3) 调节精度较高。

在大规模风电接入电网的调峰分析方面,文献[7]应对外送通道建成后对系统调峰的影响,建立了考虑风电送出影响的省际调峰模型;文献[8]提出了24时段调峰裕度指标,考虑动态正负旋转备用,建立了以电网运行成本最优为目标的模型;文献[1]把火力发电机组的调峰过程细分为3个相互关联的阶段,从多角度对其经济性进行了分析;文献[9]针对风电与抽水蓄能的联合调峰机制进行了研究,但抽水蓄能容量较小,调峰效果有限。上述文献从传统的电网调峰层面进行了分析,但未涉及负荷参与调峰的研究。

文献[10-11]从负荷侧出发,挖掘了负荷侧的调峰资源。文献[12-13]探讨了需求侧管理(即DSM)对调峰的影响,为以节能减排为目的的互动调峰研究指出了新思路。文献[6]提出了高载能负荷参与调峰的运行模式,弃风现象得到了初步缓解,但调节速度与精度不足以满足风电的迅速波动。

本文充分挖掘高载能负荷、蓄热电锅炉及电动汽车的调节潜力,提出基于负荷参与的源荷互动调峰方法。分析了源荷互动调峰在风电消纳领域的作用与机理,建立了以电网风电消纳电量最大与系统运行成本最小为目标的源荷调峰多目标优化模型,并采用改进遗传算法进行求解。通过算例验证了优化模型的可行性和有效性。

1 可调节负荷参与系统调峰分析

1.1 大规模风电并网对系统调峰的影响

为尽可能多地消纳风电,在分析风电并网对系统调峰的影响时,可将风电视为负的负荷,叠加至电网负荷之上,形成等效负荷。

如图1所示,风电出力夜间大白天小,具有典型的反调峰特性。与负荷曲线相比,等效负荷曲线的低谷点大幅下降,低于常规电源的最小出力极限。若此时仅采用常规的调峰方式,既增加了系统

调峰成本,也会造成风电送出受阻。此外,等效负荷峰谷差较之原始负荷显著增大,进一步增大了调峰难度。

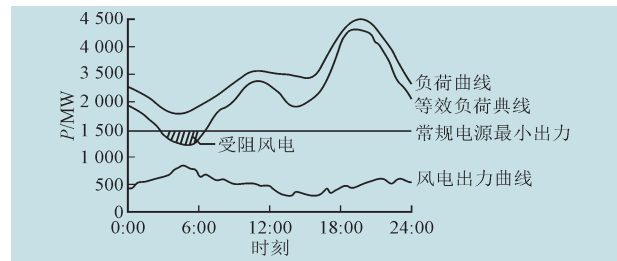


图1 风电并网对调峰的影响

Fig.1 The influence of wind power integration on peaking regulation

1.2 可调节负荷参与系统调峰可提高风电消纳能力

图2中传统模式下的等效负荷曲线为负荷 P_L 与风电出力 P_W 的差值,其功率 P_{equi} 的数学表达式为:

$$P_{equi} = P_L - P_W \quad (1)$$

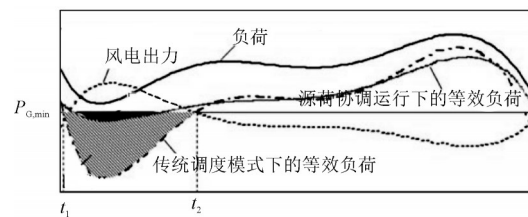


图2 源荷互动调峰原理

Fig.2 The principle of source-load interacting peaking regulation

从图2可看出, t_1 到 t_2 时段内,传统调峰模式下的等效负荷低于常规电源的最小出力极限 $P_{G.min}$,阴影部分表示出现了弃风,其面积表示弃风量的大小:

$$W_{aban} = \int_{t_1}^{t_2} (P_{G.min} - P_{equi}) dt \quad (2)$$

在源荷互动调峰模式下,在弃风时段内投入容量为 P_{inter} 的可调节负荷,则等效负荷可表示为

$$P_{equi}^* = P_L + P_{inter} - P_W \quad (3)$$

弃风电量为

$$W_{aban}^* = \int_{t_1}^{t_2} (P_{G.min} - P_{equi}^*) dt \quad (4)$$

2种模式下弃风电量的变化量为

$$\Delta W_{aban} = W_{aban}^* - W_{aban} = - \int_{t_1}^{t_2} P_{inter} dt < 0 \quad (5)$$

因此可看出,采用源荷互动调峰模式,使得弃风电量减少,即风电消纳电量增多,显著降低了等效负荷峰谷差,减小了调峰压力。

2 各类负荷可调节特性

2.1 高载能负荷可调节特性

高载能负荷参与电网调峰具有以下特性:1)可调节容量大,单台高载能负荷容量可达数百兆瓦,可发挥良好的削峰填谷作用;2)调节速度较快,与常规火电机组启停机需要大量时间相比,高载能负荷的调节所需时间大大缩短;3)调节成本较低,功率调整可以做到不影响产品质量,启停机无需耗费大量资金;4)调节方式十分灵活,可实现离散功率调节与连续功率调节,通过设置爬坡率大小可进行模式区分。

以水泥负荷为例,其生产流程中涉及磨机、立窑、破碎机、风机等负荷。其中,风机、立窑为不可中断负荷,仅可在额定功率上下10%范围内进行调节;磨机与破碎机为可中断负荷,调节功率范围为0到100%。与深度调峰下的常规火电机组相比^[1],调整100 MW水泥负荷功率所需成本可降低40%以上。图3为某水泥负荷的运行功率曲线。

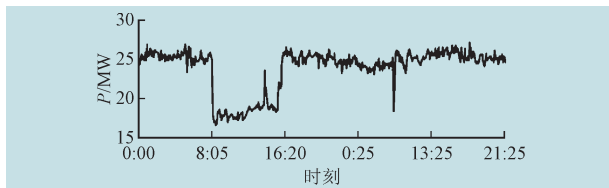


图3 水泥负荷运行功率曲线

Fig.3 The running power curve of the cement load

2.2 蓄热电锅炉可调节特性

图4为蓄热式电锅炉的调峰机理示意图。当风电出力较大存在弃风现象时,蓄热式电锅炉可主动增大负荷,利用一部分风电功率;同时,热电联产电厂可适当降低热负荷输出,相应的热负荷缺口由电锅炉填补,增大了消纳的风电电量^[14]。

研究表明,在给定条件下,蓄热电锅炉具有良好的调节能力。

2.3 电动汽车可调节特性

电动汽车因其具有优良的调节特性,可广泛应用于电网调峰领域。1)调节迅速,可实现负荷与电网间能量流动的毫秒级控制。2)理想条件下,充放电效率高达80%以上。3)调节功率精准,利用闭环PID控制,可精准跟踪风电功率变化。图5为利用电动汽车对用电负荷进行平滑调节的效果,负荷峰

谷差率显著降低^[15]。

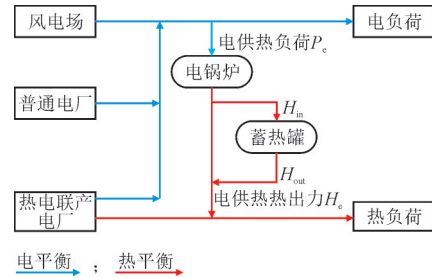


图4 蓄热电锅炉调峰原理

Fig.4 The peaking regulation principle of electric boilers

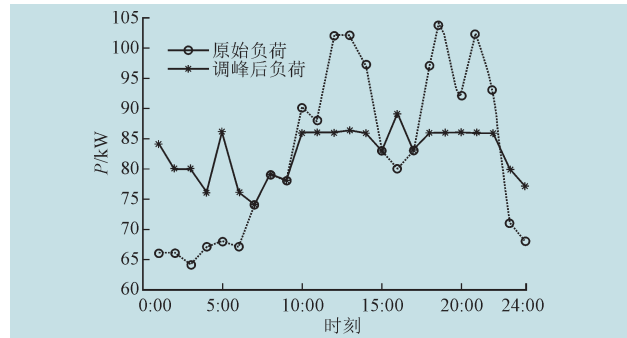


图5 电动汽车参与负荷调整结果

Fig.5 The peaking regulation result of electric vehicles

综上,高载能负荷、蓄热电锅炉与电动汽车的调节速率、调节容量与调整灵活性有一定的差别。可综合考虑上述3类负荷的可调节特性,实现基于负荷参与的大规模风电接入电网源荷互动调峰。

3 源荷互动调峰多目标优化方法

3.1 多目标优化模型

在源荷互动调峰方面,既要提高对风电的消纳能力,又要降低系统调峰成本。因此,本文以日前调度计划为背景,将系统成本最低和风电消纳电量最大作为优化目标,建立源荷互动调峰多目标优化模型。

3.1.1 运行成本优化

$$\min C = C_{\text{gene}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{inter_load}} \quad (6)$$

式中: C 为系统运行总成本; C_{gene} 为常规电源发电成本; C_{loss} 为电网损耗成本; $C_{\text{inter_load}}$ 为可调节负荷的调节成本。

1) 常规电源机组发电成本

$$C_{\text{gene}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_c} [u_{Gi,t} (a_i P_{Gi,t}^2 + b_i P_{Gi,t} + c_i) + u_{Gi,t} (1 - u_{Gi,t-1}) S_{Gi}] \quad (7)$$

式中: N_c 表示常规电源机组台数; $u_{Gi,t}$ 表示常规电

源机组 i 在 t 时段的启停状态(0 表示停机, 1 表示运行); a_i , b_i 和 c_i 为常规电源机组 i 运行成本的二次拟合系数; $P_{Gi,t}$ 表示常规电源机组 i 在时段 t 的出力; S_{Gi} 为常规电源机组 i 的启动成本。

2) 可调节负荷调节成本

对高载能负荷进行调节需要耗费一定的成本, 其成本与调节容量成正比。蓄热电锅炉与电动汽车调节方式相对简易, 其调节成本可以忽略不计。

可调节负荷的调节成本为

$$C_{\text{inter_load}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_H} \lambda_{Hk} S_{Hk,t} P_{Hk,t} \Delta T \quad (8)$$

式中: N_H 表示参与调节的高载能负荷组数; λ_{Hk} 表示高载能负荷 k 的单位调节成本; $S_{Hk,t}$ 表示高载能负荷 k 在时段 t 的投切状态(0 表示中断运行, 1 表示投入运行); $P_{Hk,t}$ 表示高载能负荷 k 的投切容量。

3.1.2 风电消纳电量优化

$$W_{\text{consumed}} + W_{\text{aban}} = E_{\text{wind}} = \text{Constant} \quad (9)$$

式中: W_{consumed} 为风电消纳量, W_{aban} 为弃风电量, 二者之和即为总的风电量 E_{wind} 。在选定优化时间段之后, E_{wind} 的数值大小不受本优化模型的影响, 可认为 E_{wind} 为定值, 保持不变。因此, 弃风电量越小, 则风电消纳电量越大。优化目标表达式可表示为

$$\min W_{\text{aban}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{G,\min}(\tau) - P_{\text{equi}}(\tau) d\tau \quad (10)$$

式中: $P_{G,\min}(\tau)$ 与 $P_{\text{equi}}(\tau)$ 分别为常规电源最小出力极限与等效负荷随时间 τ 变化的表达式; t_1 , t_2 分别为弃风起止时刻。

3.1.3 源荷互动调峰多目标优化模型

综合运行成本优化与风电消纳电量优化, 便形成以系统运行成本最小与电网风电消纳电量最大为目标的源荷互动调峰多目标优化模型:

$$\begin{cases} \min C = C_{\text{gene}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{inter_load}} \\ \min W_{\text{aban}} = \int_{t_1}^{t_2} (P_{G,\min}(\tau) - P_{\text{equi}}(\tau)) d\tau \end{cases}$$

3.2 约束条件

3.2.1 系统运行约束

1) 负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} u_{Gi} P_{Gi} + P_W + P_{\text{Loss}} = P_{\text{rLoad}} + P_{\text{inter}}, \forall t \quad (11)$$

式中: P_W 为风电场的有功出力预测值; P_{Loss} 为系统有功损耗; P_{rLoad} 为非互动用户的有功负荷; P_{inter} 为高

载能负荷、蓄热电锅炉及电动汽车的有功功率之和。

2) 正、负旋转备用约束

$$\begin{cases} U_{\text{GR}+} = \sum_{i=1}^{N_G} u_{Gi} (P_{Gi,\max} - P_{Gi}) \geq U_{\text{SR}+}, \forall t \\ U_{\text{GR}-} = \sum_{i=1}^{N_G} u_{Gi} (P_{Gi} - P_{Gi,\min}) \geq U_{\text{SR}-} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $U_{\text{GR}+}$ 与 $U_{\text{GR}-}$ 分别为常规发电机组的正负旋转备用容量; $P_{Gi,\max}$ 与 $P_{Gi,\min}$ 分别为单台常规发电机组的输出功率上下限; $U_{\text{SR}+}$ 与 $U_{\text{SR}-}$ 分别为系统正负旋转备用需求。

3.2.2 常规机组约束

1) 输出功率上下限约束

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max}, \forall t \quad (13)$$

2) 爬坡率约束

$$\begin{cases} u_{Gi,t} P_{Gi,t} - u_{Gi,t-1} P_{Gi,t-1} \leq P_{Gi,\uparrow}, \forall t \\ u_{Gi,t-1} P_{Gi,t-1} - u_{Gi,t} P_{Gi,t} \leq P_{Gi,\downarrow} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $u_{Gi,t-1}$ 与 $P_{Gi,t-1}$ 分别为机组在 $t-1$ 时段的启停状态与输出功率; $P_{Gi,\uparrow}$ 为机组出力上升出力限制; $P_{Gi,\downarrow}$ 为机组出力下降速度限制。

3.2.3 高载能负荷约束

1) 功率约束

$$P_{Hk,\min} \leq P_{Hk} \leq P_{Hk,\max}, \forall t \quad (15)$$

式中: $P_{Hk,\max}$ 为高载能负荷 k 的投入功率上限; $P_{Hk,\min}$ 为高载能负荷 k 的投入功率下限。

2) 调节时间长度约束

$$\begin{cases} (S_{Hk,t-1} - S_{Hk,t})(T_{Hk,\text{on},t} - T_{Hk,\text{on},\min}) \geq 0, \forall t \\ (S_{Hk,t} - S_{Hk,t-1})(T_{Hk,\text{off},t} - T_{Hk,\text{off},\min}) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $S_{Hk,t-1}$ 为高载能负荷 k 在时段 $t-1$ 的投切状态; $T_{Hk,\text{on},\min}$ 与 $T_{Hk,\text{off},\min}$ 为高载能负荷 k 最小连续投入时间与最小连续中断时间; $T_{Hk,\text{on},t}$ 与 $T_{Hk,\text{off},t}$ 为高载能负荷 k 在时段 t 的投入时间与中断时间。

3.2.4 蓄热电锅炉约束

1) 电锅炉功率约束

$$P_{Bi,\min} \leq P_{Bi} \leq P_{Bi,\max}, \forall t \quad (17)$$

式中: P_{Bi} 为蓄热式电锅炉 i 的用电功率; $P_{Bi,\max}$ 与 $P_{Bi,\min}$ 分别为蓄热式电锅炉 i 的用电功率最大值与最小值。

2) 蓄热罐热量约束

$$H_{Bi} = \eta_B \int_0^t P_{Bi} dt - \bar{h}_{Bi} t \quad (18)$$

$$H_{Bi, \min} \leq H_{Bi} \leq H_{Bi, \max}, \forall t \quad (19)$$

式中: H_{Bi} 为蓄热电锅炉 i 蓄热量; η_B 为电热转化当量系数; \bar{h}_{Bi} 为蓄热电锅炉的平均放热速度; $H_{Bi, \max}$ 为蓄热式电锅炉的最大蓄热容量限值; $H_{Bi, \min}$ 为其最小蓄热容量限值。

3.2.5 电动汽车约束

1) 功率约束

$$-P_{EVj-, \max} \leq P_{EVj} \leq P_{EVj+, \max}, \forall t \quad (20)$$

式中: P_{EVj} 为电动汽车 j 的用电功率; $P_{EVj+, \max}$ 为电动汽车的最大充电功率; $P_{EVj-, \max}$ 为其最大放电功率。

2) 电量约束

$$SOC_j = SOC_{j0} + \eta_{EV} \int_{t_1}^{t_2} P_{EVj} dt \quad (21)$$

$$SOC_{j, \text{desire}} \leq SOC_j \leq SOC_{j, \max} \quad (22)$$

式中: SOC_j 为电动汽车充电结束时所含的电量值; SOC_{j0} 为电动汽车充电之前的电量值; η_{EV} 为充放电效率; t_1 与 t_2 分别为电动汽车开始充电与结束充电的时间; $SOC_{j, \text{desire}}$ 为用户希望电动汽车结束充电时储存的最低电量; $SOC_{j, \max}$ 为电动汽车的储存电量上限值。

3.3 基于改进遗传算法的优化模型求解

首先利用偏好因子与加权思想,将上述提出的源荷互动调峰多目标优化模型转化为较容易求解的单目标优化模型。

$$\min F = \lambda C + (1 - \lambda) W_{\text{aban}} \quad (23)$$

式中: λ 为偏好因子, $0 < \lambda < 1$ 。 λ 取值越小表明风电消纳效果指标越重要, λ 取值越大表明成本经济性指标越重要。若不满意给定 λ 取值下的优化结果,可根据需求人为设定 λ 新值,实现模型与用户的交互。

在此基础上,采用改进遗传算法求解源荷互动调峰优化模型,求解步骤如下所示。

1) 输入原始数据。包括发电机组耗量成本系数、启停成本、运行上下限以及爬坡率限制,系统正负旋转备用需求、综合负荷预测曲线,风电功率预测曲线、弃风成本系数,高载能负荷调节成本系数以及负荷的调节限制等。

2) 种群初始化。通过采用十进制整数与实数

的混合编码方式,可以提高编码精度并减少对计算机内存的需求^[16]。本文采用文献[16]提出的混合编码方式以提高初始个体质量,并加快收敛速度。

3) 个体选择、交叉与变异。以电网运行成本作为适应度评判核心,对种群中的个体进行筛选;筛选出的个体两两交叉得到子代新个体,同时新个体可能发生变异。将精英保留策略引入个体间的选择、交叉与变异过程,进一步加快收敛速度。

4) 重复进行步骤 3),直至最优个体在连续多次迭代后仍保持不变或保持基本不变。最后得到运行成本和弃风电量最小的发电机组出力计划、风电发电计划、可调节负荷用电计划。

4 算例分析

4.1 系统条件设定

针对 IEEE-30 节点系统,进行日前时段的仿真分析。系统接线如图 6 所示。风电功率预测与负荷预测情况如图 7 与图 8 所示。

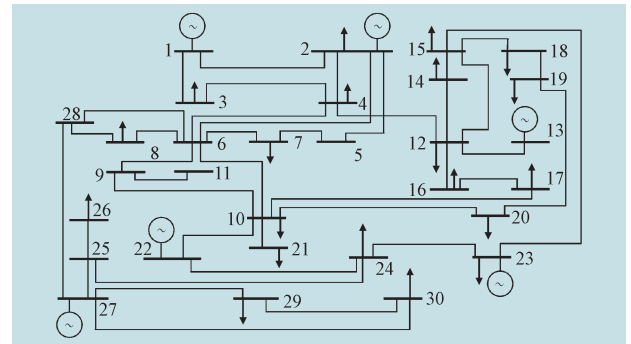


图6 IEEE-30节点系统接线图

Fig.6 The topology of IEEE-30 system

该风电场的总装机容量为 300 MW (150 台风力发电机组),考虑到风电场附近负荷较少,故将其接入 28 号节点。6 台常规发电机组分布于节点 1、2、13、22、23 和 27,高载能负荷接入节点 12 与 14,电动汽车集群点接入节点 17 与 19,蓄热电锅炉集群点接入节点 24 与 29。常规发电机组参数如表 1 所示。

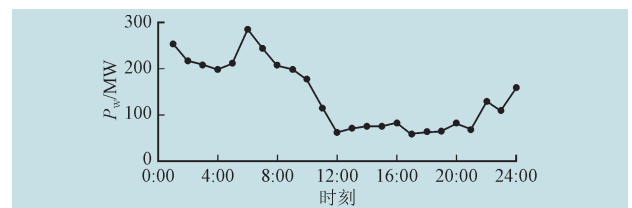


图7 日前风电功率预测曲线

Fig.7 The day-ahead forecasting curve of wind power

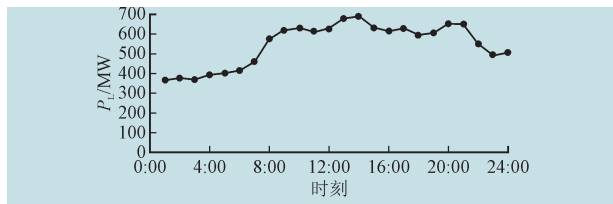


图8 日前系统综合负荷功率预测曲线

Fig.8 The day-ahead forecast curve of the comprehensive load

表1 常规发电机组参数表

Tab.1 Parameters of regular generators

机组所在节点编号	发电成本系数 (a_i, b_i, c_i)	出力极限 ($P_{Gi,max}, P_{Gi,min}$)/MW	爬坡率极限 ($P_{Gi,1}, P_{Gi,-1}$)/ ($MW \cdot h^{-1}$)
1	0.1536, 36.54, 784.26	300,75	50,50
2	0.0280, 40.69, 1056.34	100,25	30,30
13	0.0280, 40.69, 1056.34	100,25	30,30
22	0.1054, 45.21, 951.69	200,50	40,40
23	0.0280, 40.69, 1056.34	100,25	30,30
27	0.0280, 40.69, 1056.34	100,25	30,30

可调节负荷参数列于表2中。

表2 可调节负荷容量及调约束

Tab.2 Capacities and constraints of adjustable loads

可调节负荷所在节点编号	负荷功率调整 上限/MW	负荷功率调整 下限/MW	单台设备调节 次数限制
12	60	40	5
14	60	40	5
17	20	0	无限制
19	20	0	无限制
24	40	20	7
29	40	20	7

4.2 结果分析

4.2.1 风电消纳电量分析

图9与图10分别为在传统调峰模式下与在基于负荷参与的源荷互动调峰模式下,风电的预测与计划出力情况对比。

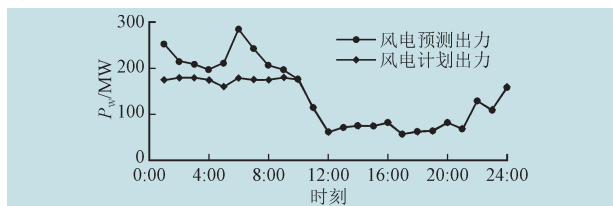


图9 传统调峰模式下风电预测与计划出力曲线

Fig.9 The forecast and planning output curves of wind power in traditional peaking regulation mode

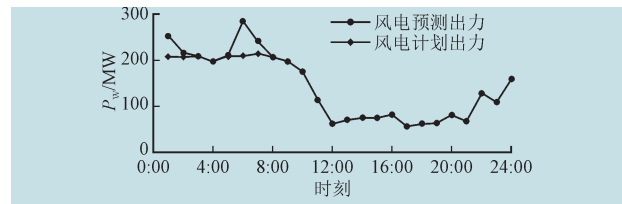


图10 源荷互动调峰模式下风电预测与计划出力曲线

Fig.10 The forecast and planning output curves of wind power in source-load interacting peaking regulation mode

表3 2种模式下风电消纳电量对比

Tab.3 Comparison of wind power consumptions in two modes

调峰模式	风电消纳电量/($MW \cdot h$)
传统调峰模式	2976.79
源荷互动调峰模式	3256.82

通过两者比较可知,源荷互动模式下风电的计划出力更高,可多消纳风电 $280.03 MW \cdot h$ 。其原因在于可调节负荷在风电大发时期通过调整增加了负荷功率。

4.2.2 系统运行成本分析

系统运行成本见表4。由表4可知,本文所提的基于可调节负荷参与的源荷互动调峰模式的运行成本比传统调峰模式的运行成本低。其原因在于可调节负荷具有良好的调峰特性,等效负荷峰谷差因此降低,进而发电机组出力更加平稳,减少了频繁启停造成的额外发电成本。

表4 系统运行成本

Tab.4 Operating costs of the power system 万元

成本	传统调峰模式	源荷互动调峰模式
常规电源发电成本 C_{gene}	403.89	353.64
损耗成本 C_{loss}	9.86	6.59
可调节负荷的调节成本 C_{inter_load}	0	23.57
总成本 C	413.75	383.80

5 结论

本文针对大规模风电接入造成系统调峰能力不足导致的弃风问题,分析了高载能负荷、电热锅炉和电动汽车负荷的可调节特性。在此基础上建立了以系统运行成本最小与电网风电消纳电量最大为目标的源荷互动调峰多目标优化模型,并采用改进遗传算法进行求解,形成可调节负荷参与的

源荷互动调峰多目标优化方法。算例分析表明,论文提出的可调节负荷参与源荷互动调峰优化方法,可有效提高风电的消纳能力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [3] LUO Xiao. Plug-in electric vehicle charging control for wind power integration enhancement[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2016.
- [4] 崔杨. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4080.
CUI Yang. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4072-4080.
- [5] 姜希伟. 大规模风电接入电网的荷源双时间尺度控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- [6] 刘文颖. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
LIU Wenyong. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [7] 吴雄,王秀丽,李骏,等. 考虑风电外送的省级系统调峰分析模型[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1578-1583.
WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A model to analyze peak load regulation of provincial power system considering sending-out of wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1578-1583.
- [8] 曾雪婷,刘天琪,李茜,等. 基于动态调峰裕度的风电并网协调优化调度[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1685-1690.
ZENG Xueting, LIU Tianqi, LI Xi, et al. A dynamic peak load regulation margin based coordinated optimal dispatching under grid-connection of wind farm[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1685-1690.
- [9] 樊志超. 风电与抽水蓄能联合调峰机制研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2013.
- [10] 杨永标,颜庆国,徐石明,等. 公共楼宇空调负荷参与电网虚拟调峰的思考[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 103-107.
YANG Yongbiao, YAN Qingguo, XU Shiming, et al. Thinking of public building air-conditioning load participating in grid with virtual peak clipping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 103-107.
- [11] 王续芳. 公共楼宇大规模空调负荷虚拟调峰关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
- [12] 刘晓. 新能源电力系统广域源荷互动调度模式理论研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
- [13] 吕良,刘文颖,吕思琦,等. 高载能负荷参与调节消纳受阻风电的控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 103-110, 115.
LÜ Liang, LIU Wenyong, LÜ Siqi, et al. The control strategy of high load energy load involved in regulation and elimination of obstructed wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(6): 103-110, 115.
- [14] 吕泉,姜浩,陈天佑,等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 6-12.
LÜ Quan, JIANG Hao, CHEN Tianyou, et al. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 6-12.
- [15] 杨玉红,张峰,张艳芳. 电动汽车参与电网调峰的分析研究[J]. 电力学报, 2012, 27(4): 306-309, 312.
YANG Yuhong, ZHANG Feng, ZHANG Yanfang. Analysis of power grid peak shaving with electric vehicles[J]. Journal of Electric Power, 2012, 27(4): 306-309, 312.
- [16] 张粒子,舒隽,林宪枢,等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 5-8.
ZHANG Lizi, SHU Jun, LIN Xianshu, et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 5-8.

收稿日期: 2017-09-29。

作者简介:

田浩(1993—),男,硕士,研究方向为电力系统运行分析与控制;

刘文颖(1955—),女,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析与控制、电力系统智能调度及大电网安全防御等。

(编辑 冯露)