

# Influence of the High-Energy Load's Helping Regulating on the Peak Regulation Margin with Significant Wind Power Integration

Yuwei Zhang<sup>1</sup>, Wenyong Liu<sup>1</sup>, Xiwei Fu<sup>1</sup>, Honglin Guo<sup>1</sup>, Weizhou Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electrical Power University, Beijing

<sup>2</sup>Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou Gansu

Email: holmes369@sina.com

Received: May 30<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jun. 10<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 21<sup>st</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

In recent years, wind power generation capacity keeps a rapid growth, and the peak regulation capacity of conventional unit can't meet the increasing needs of peak regulation, and the problem of wind power curtailment becomes increasingly serious, so the output of wind power is restricted. Raising the peak regulation margin has become an important problem to be studied and solved. Under the condition that a significant wind power integrates into the system, this paper first analyzes the influence of significant wind power integration on the system's peak regulation margin, and then discusses the high-energy load's characteristics and its feasibility of helping peak regulation. Based on this, this paper studies the influence of the high-energy load's participation on the system's peak regulation margin. Finally, an example is illustrated and researched with simulation, and the simulation results prove that the high-energy load's participating in regulation can increase the peak regulation margin effectively.

## Keywords

Wind Power, High-Energy Load, Peak Regulation Margin

# 大规模风电并网后高载能负荷参与调节对调峰裕度的影响

张雨薇<sup>1</sup>, 刘文颖<sup>1</sup>, 付熙玮<sup>1</sup>, 郭红林<sup>1</sup>, 王维洲<sup>2</sup>

文章引用: 张雨薇, 刘文颖, 付熙玮, 郭红林, 王维洲. 大规模风电并网后高载能负荷参与调节对调峰裕度的影响[J]. 智能电网, 2016, 6(3): 143-150. <http://dx.doi.org/10.12677/sg.2016.63016>

<sup>1</sup>华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

<sup>2</sup>国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州

Email: holmes369@sina.com

收稿日期: 2016年5月30日; 录用日期: 2016年6月10日; 发布日期: 2016年6月21日

## 摘要

随着大规模风电并网容量的快速增加, 机组的调峰容量已经满足不了不断增大的调峰需求, 弃风愈加严重, 风电功率送出受到了严重的制约。提高电网调峰裕度成为当前亟待研究和解决的问题。本文基于大规模风电接入电网, 首先对大规模风电并网对系统调峰裕度的影响进行了分析, 然后对高载能负荷的调节特性及其参与调峰的可行性进行了研究, 在此基础上, 研究了高载能负荷参与调节对调峰裕度的影响。最后以实例进行了仿真计算分析, 验证了高载能负荷参与调节可显著增大系统调峰裕度。

## 关键词

风电, 高载能负荷, 调峰裕度

## 1. 引言

由于风电具有随机性、波动性的特点, 大规模风电接入电网后增大了系统等效负荷峰谷差, 原有常规电源调峰裕度明显不足, 导致电力系统调峰困难, 弃风情况严重。

高载能负荷用电量较大并具有一定的用电“弹性”, 可更改用电时间和负荷大小。对于由风电波动引起的等值负荷峰谷差的增大, 高载能负荷可以参与调峰, 进行响应调节, 提高电力系统调峰裕度。

目前, 国内外学者针对风电并网系统调峰问题做了大量的研究。文献[1]分析了风电并网系统的负调峰问题, 提出了计算常规机组负调峰容量极限的模型和方法。文献[2]从常规机组调峰容量和机组爬坡能力两个角度出发, 研究了系统应对风电波动的低谷调峰能力。文献[3]对酒泉风电基地实际运行数据进行分析, 提出了建设一定规模的火电基地, 并在酒泉地区将其电能以特高压直流的方式外送, 以达到提高酒泉风电基地调频调峰能力的目的。

国内外学者对高载能负荷的研究多注重其对新能源的消纳能力, 文献[4]以最大化风电消纳能力为目标, 协调各用户峰谷时段, 建立了适应高载能用户错峰风谷电价决策模型。文献[5]充分考虑断面功率约束和负荷可匹配上调容量约束, 计及负荷参与程度, 建立了高载能负荷参与电网消纳风电的三阶段统计模型和预评估的定量计算方法。文献[6]研究了高载能负荷与常规电源协调运行对风电消纳的影响机理, 建立了以风电消纳量最大和系统运行成本最小为目标的源荷协调多目标优化模型。对于大规模风电接入后高载能负荷参与调节对电网调峰裕度影响的研究较少。

本文在大规模风电接入电网的条件下, 研究了常规机组调峰能力和高载能负荷的可调节特性, 并对高载能负荷参与调节的方式进行了分析。通过计算高载能负荷参与调节前后调峰裕度, 量化了高载能负荷对电网调峰裕度的影响。最后采用 IEEE-RTS 32 机系统进行仿真计算, 验证了高载能负荷参与调节可显著提高系统调峰裕度。

## 2. 大规模风电并网对系统调峰裕度的影响

### 2.1. 常规电源的调峰能力

常规火电机组启停周期长, 不宜频繁启动。且火电机组出力调节范围受额定容量和最小技术出力限

制，其数学模型如下：

$$P_{TGi.min} \leq P_{TGi}^t \leq P_{TGi.max} \quad (1)$$

式中， $P_{TGi}^t$  为火电机组  $i$  在时刻  $t$  的出力， $P_{TGi.min}$  和  $P_{TGi.max}$  分别为火电机组  $i$  出力的安全调节下限和出力上限。

考虑机组的爬坡率约束：

$$-P_{TGi.down} \leq P_{TGi}^t - P_{TGi}^{t-1} \leq P_{TGi.up} \quad (2)$$

式中， $P_{TGi.down}$  和  $P_{TGi.up}$  分别为火电机组的下降出力限制和上升出力限制。其中，燃气火电机组的下降出力限制为零。

系统的调峰容量为：

$$P_{balance} = S^T (P_{G0.max} - P_{G0.min}) \quad (3)$$

式中， $S = [s_1^t, s_2^t, \dots, s_i^t, \dots, s_n^t]^T$ ，其中  $s_i^t$  表示第  $i$  台发电机在时刻  $t$  的状态， $s_i^t = 0$  时，表示第  $i$  台发电机在时刻  $t$  没有参与发电， $s_i^t = 1$  时，表示第  $i$  台发电机在时刻  $t$  参与了发电； $P_{G0.min}$  与  $P_{G0.max}$  分别为用  $n$  维列向量表示的各台机组的出力的安全调节下限和出力上限， $P_{G0.min} = [P_{G1.min}, P_{G2.min}, \dots, P_{Gi.min}, \dots, P_{Gn.min}]^T$ ， $P_{G0.max} = [P_{G1.max}, P_{G2.max}, \dots, P_{Gi.max}, \dots, P_{Gn.max}]^T$ 。

## 2.2. 风电并网对系统调峰裕度的影响

将风电出力视为负的负荷，大规模风电接入后，风电的随机性和波动性将使等效负荷峰谷差增加，其典型日曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出，风电接入系统前，系统的负荷峰谷差为  $P_{pvd.0}$ 。风电接入后，等效负荷峰谷差为  $P_{pvd.1}$ ， $P_{pvd.1} > P_{pvd.0}$ ，说明风电接入后增大了系统的负荷峰谷差。

风电并网对系统调峰裕度的影响如图 2 所示。

以等效负荷低谷时段为例，当风电出力为 0 时，系统调峰裕度为：

$$P_{mar.0} = P_{L.min} - P_{G0.min} \quad (4)$$

式中， $P_{L.min}$  为最小负荷。

从图中可以看出， $P_{mar.0} > 0$ ，即常规机组的调峰容量满足调峰需求。

当风电并网容量由图中风电出力 I 增加到风电出力 II 时，若常规电源的调峰能力不变，调峰裕度将减小：

$$\Delta P_{mar} = P_{mar.2} - P_{mar.1} \quad (5)$$

其中：

$$\begin{aligned} P_{mar.1} &= P_{EL1.min} - P_{G0.min} \\ P_{mar.2} &= P_{EL2.min} - P_{G0.min} \end{aligned} \quad (6)$$

式中， $P_{mar.1}$  和  $P_{mar.2}$  分别对应风电出力 I 和风电出力 II 时的调峰裕度，图中情况  $P_{mar.1}$  和  $P_{mar.2}$  均为负值； $P_{EL1.min}$  和  $P_{EL2.min}$  分别为风电出力 I 和风电出力 II 所对应的等效最小负荷。

由此可以看出，大规模风电并网后，减小了系统调峰裕度，增加了电网的调峰压力。建设一定规模的火电基地和挖掘火电机组深度调峰能力能够有效缓解由大规模风电并网引起的调峰问题，但大规模风电基地一般自然环境比较恶劣，煤和水资源匮乏，不具备常规电源建设和运行的特点。因此，寻找能够有效提高系统调峰裕度的新途径至关重要。

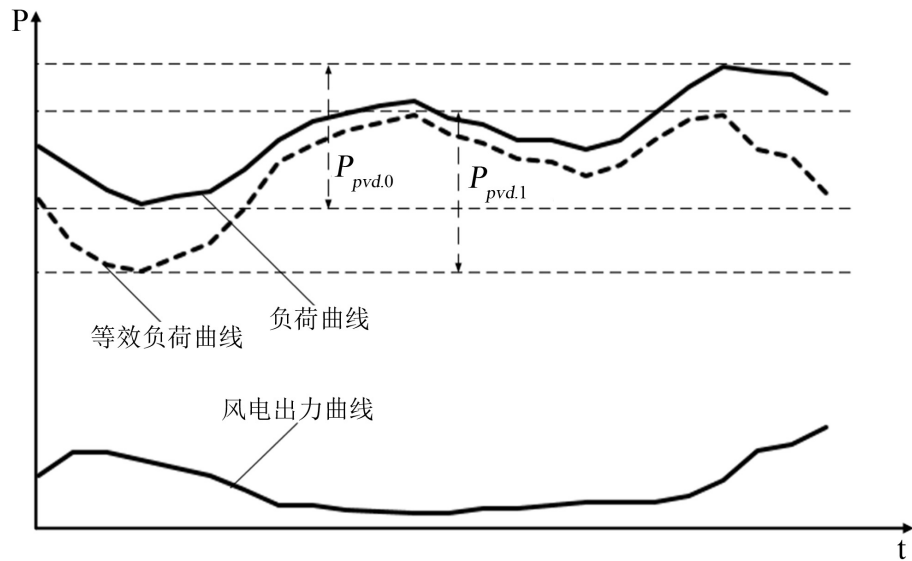


Figure 1. The reverse peak regulation characteristic of wind power  
图 1. 风电的反调峰特性示意图

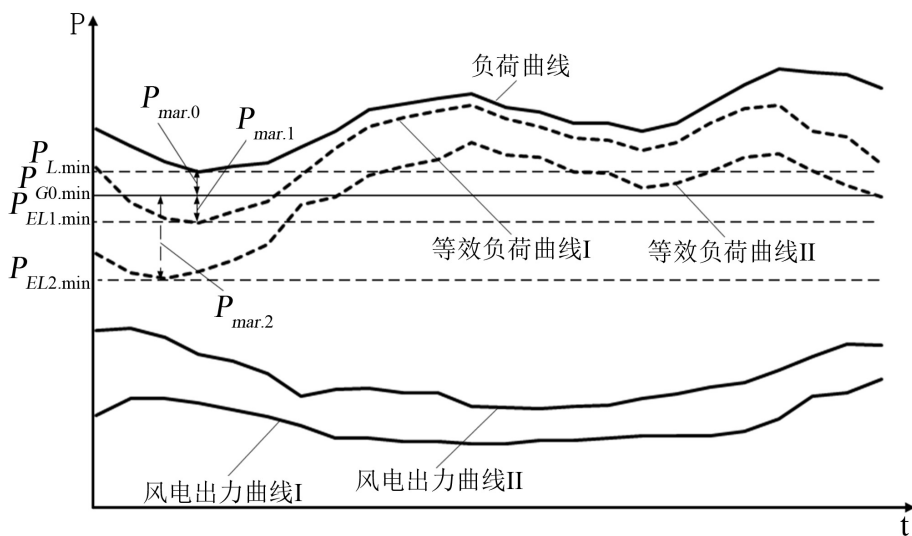


Figure 2. The impact of wind power integration on the peak regulation margin of system  
图 2. 风电并网对系统调峰裕度影响示意图

### 3. 高载能负荷调节特性的分析

高载能负荷具有良好的可中断和可调节特性，如果能参与系统调峰，则可中断负荷的可中断时长和可中断容量、可连续调节负荷的可调节容量及调节速度即爬坡率是可参与调节的重要指标。

#### 3.1. 可中断负荷调节特性分析

在电网需要时，可中断负荷能够在指定时间中断指定容量的负荷，也可在另外的时间继续用电，可中断负荷的调节特性曲线如图 3 所示。

可中断负荷原本在额定功率  $P_{n,1}$  下运行，接受电网中断指令后，在  $t_1$  时刻中断部分负荷至  $P_{m,2}$ ，在时刻  $t_2$  恢复额定负荷生产。考虑到负荷中断对企业生产效益和其它工艺流程的影响，中断容量  $\Delta P_m$  有所限制：

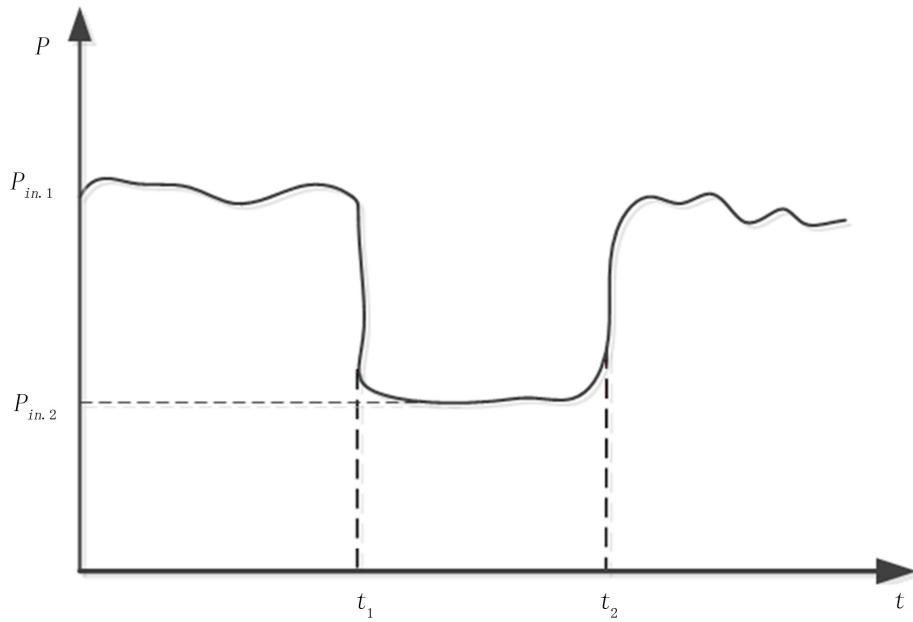


Figure 3. The regulation characteristic curve of the interruptible load  
图 3. 可中断负荷的调节特性曲线

$$\Delta P_m = P_{in,1} - P_{in,2} \leq P_{in,max} \quad (7)$$

式中， $P_{in,max}$  为可中断负荷的最大可中断容量。

中断持续时间  $\Delta t$  也不得超过规定的最大值：

$$\Delta t = t_2 - t_1 \leq t_{in,max} \quad (8)$$

式中， $t_{in,max}$  为可中断负荷的最大可中断时间。

### 3.2. 可连续调节负荷调节特性分析

可连续调节负荷主要是指高载能负荷中的自备电厂，与常规机组类似，可连续调节负荷出力  $P'_{ad}$  能连续调节，其范围受调节容量上下限制：

$$P_{ad,min} \leq P'_{ad} \leq P_{ad,max} \quad (9)$$

式中， $P_{ad,min}$  和  $P_{ad,max}$  为可连续调节负荷的可连续调节下限和上限。

负荷爬坡率限制：

$$\left| P'_{ad} - P'^{-1}_{ad} \right| \leq \Delta P_{ad,up} \quad (10)$$

式中， $\Delta P_{ad,up}$  为可连续调节负荷的最大爬坡率。

## 4. 高载能负荷参与调节对调峰裕度的影响

### 4.1. 可中断负荷参与调节对调峰裕度的影响

由 2.1 节所分析的可中断负荷调节特性可知，在电网需要时，采用可中断负荷参与调节，如图 4 所示。

图中曲线 I 为未计入风电出力的负荷曲线，曲线 II 为计入风电出力后的等效负荷曲线，等效负荷峰谷差为  $P_{pvd,1}$ 。当机组最大出力  $P_{G,max}$  不能满足等效负荷最大值  $P_{EL1,max}$  时，在  $t_1$  时刻开始中断部分负荷容量  $\Delta P_m$ ，中断容量须满足式(7)，中断时间  $t_2 - t_1$  满足式(8)。图中第二个等效负荷高峰缺电时段也采用可

中断负荷调节，中断容量和中断时间也需满足要求。可中断负荷调节前的调峰裕度为：

$$P_{mar.0} = P_{balance} - P_{pvd.1} = P_{balance} - (P_{EL0.max} - P_{EL0.min}) \quad (11)$$

可中断负荷调节后的调峰裕度变为：

$$P_{mar.1} = P_{balance} - P_{pvd.2} = P_{balance} - (P_{EL1.max} - P_{EL0.min}) \quad (12)$$

其中  $P_{pvd.1} > P_{pvd.2}$ ，所以  $P_{mar.1} > P_{mar.0}$ ，因此，可中断负荷参与调节后提高了系统的调峰裕度。

#### 4.2. 可连续调节负荷参与调节对调峰裕度的影响

由 2.2 节所分析的可连续调节负荷调节特性可知，可连续调节负荷在负荷高峰和负荷低谷时段机组调峰能力不足时均可参与系统调节，如图 5 所示。

在等效负荷低谷时段，当机组的安全调节下限大于最小等效负荷时，使可连续调节负荷按照其爬坡率要求逐渐增加功率，并且最大功率要小于其调节容量上限。在等效负荷高峰缺电时段，使可连续调节负荷按照其爬坡率要求逐渐减少功率，并且最小功率要大于其调节容量下限。可连续调节负荷调节前的调峰裕度仍由式(11)得到，可连续调节负荷调节后的调峰裕度变为：

$$P_{mar.1} = P_{balance} - P_{pvd.2} = P_{balance} - (P_{EL1.max} - P_{EL1.min}) \quad (13)$$

其中  $P_{pvd.1} > P_{pvd.2}$ ，所以  $P_{mar.1} > P_{mar.0}$ ，因此，可连续调节负荷参与调节后提高了系统的调峰裕度。

### 5. 算例分析

本文算例采用 IEEE-RTS 32 机系统，装机容量为 3405 MW，最小机组容量为 12 MW，最大机组容量 400 MW，年最大负荷为 2850 MW [7]。机组调峰容量根据机组类型给出，如表 1 所示，计算得到系统最大调峰容量为 1901 MW。负荷时序采用测试系统中的冬季第一周星期一的日负荷时序，负荷峰谷差为 936.74 MW，合理假设其中可中断负荷可中断容量占当日最大负荷的 2%，可连续调节负荷可调节容量占当日最大负荷的 4%。由于测试系统中并无风电，采用某大型风电基地的某冬日风电出力，风电接入电网的时序如表 2。

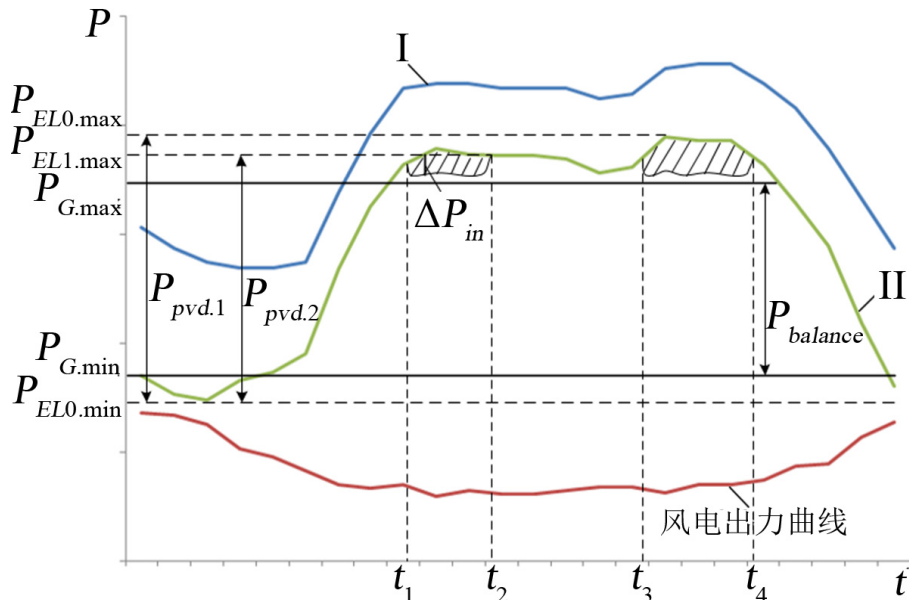


Figure 4. The impact of the interruptible load's regulation on the peak regulation margin  
图 4. 可中断负荷参与调节对调峰裕度的影响示意图

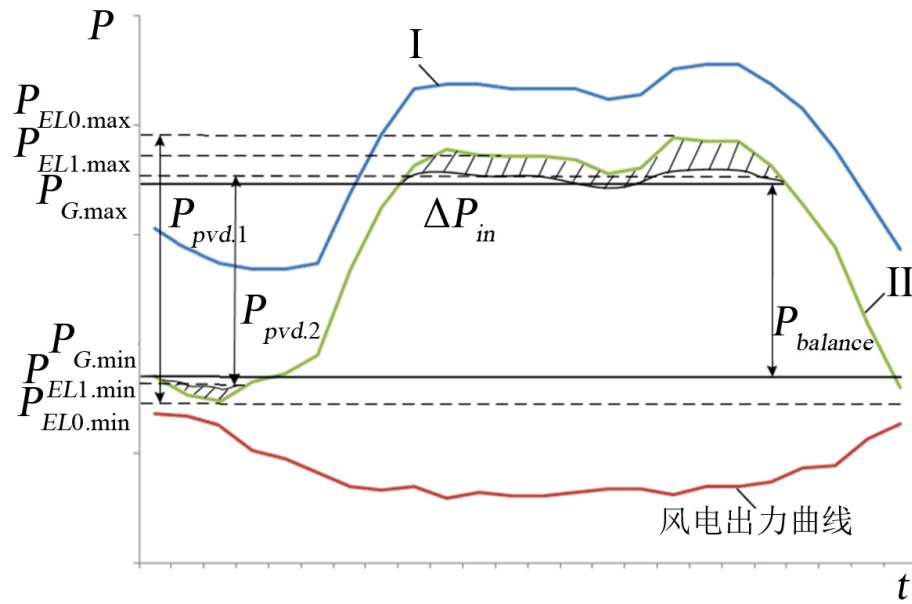


Figure 5. The impact of the adjustable load's regulation on the peak regulation margin  
图 5. 可连续调节负荷参与调节对调峰裕度的影响示意图

Table 1. Data of test system units

表 1. 测试系统机组数据

机组类型	机组容量/MW	机组数量	调峰容量/MW
燃油	12	5	60
燃气	20	4	80
燃油	50	6	300
燃煤	76	4	82
水电	100	3	300
燃煤	155	4	242
燃油	197	3	189

Table 2. The hourly output of a large wind power base on someday in winter (h/MW)

表 2. 某大型风电基地冬季风电日出力时序(h/MW)

时刻/h	出力/MW	时刻/h	出力/MW	时刻/h	出力/MW
1	1400	9	350	17	200
2	1370	10	290	18	356
3	1300	11	325	19	710
4	1250	12	308	20	920
5	1100	13	309	21	1050
6	500	14	326	22	1120
7	350	15	356	23	1256
8	336	16	199	24	1369

将风电出力记为负的负荷叠加在负荷时序曲线上得到等效负荷曲线，等效负荷最大值  $P_{EL0,max} = 2061.88 \text{ MW}$ ，等效负荷最小值  $P_{EL0,min} = 69.38 \text{ MW}$ ，等效负荷峰谷差  $P_{pvd,1} = 1992.5 \text{ MW}$ ，系统装机容量  $P_{G,max} = 3405 \text{ MW}$ 。系统最大调峰容量  $P_{balance} = 1901 \text{ MW}$ ，系统调峰裕度  $P_{mar,0} = P_{balance} - P_{pvd,1} = -91.5 \text{ MW}$ ，在等效负荷低谷时段，仅靠机组下调出力不能满足等效最小负荷。因此，采用可连续调节负荷通过增加出力增大等效最大负荷，可连续调节负荷的可调节容量  $\Delta P_{ad} = 91.39 \text{ MW}$ ，调节后的系统等效负荷峰谷差  $P_{pvd,2} = 1901.11 \text{ MW}$ ，系统调峰裕度  $P_{mar,1} = P_{balance} - P_{pvd,2} = -0.11 \text{ MW}$ 。由此可得，高载能负荷参与调节后系统调峰裕度增加了  $\Delta P_{mar} = P_{mar,2} - P_{mar,1} = 91.39 \text{ MW}$ 。

## 6. 结论

本文基于大规模风电接入电网，首先对大规模风电并网对系统调峰裕度的影响进行了分析，得出风电大规模并网会增大系统负荷峰谷差，且风电接入规模越大，负荷峰谷差越大的结论。然后对高载能负荷的调节特性及其参与调峰的可行性进行了研究，在此基础上，研究了高载能负荷参与调节对调峰裕度的影响，得出高载能负荷参与调节能够提高系统调峰裕度的结论。最后由仿真实例计算结果可知，在大规模风电并网的基础上，高载能负荷参与调节可显著提高系统调峰裕度。

## 基金项目

国家科技支撑计划项目(2015BAA01B04)和国家电网公司重大项目(52272214002C)。

## 参考文献 (References)

- [1] 杨宏, 刘建新, 苑津莎. 风电系统中常规机组负调峰能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2010(16): 26-31.
- [2] 杨冬锋, 周苏荃, 鲍锋. 风电并网系统低谷时段的调峰能力分析[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1446-1451.
- [3] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 陟晶. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010(10): 1-7.
- [4] 崔强, 王秀丽, 王维洲. 考虑风电消纳能力的高载能用户错峰峰谷电价研究[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 946-952.
- [5] 刘聪, 刘文颖, 王维洲, 朱丹丹, 文晶, 孟珺遐. 高载能负荷参与的电网消纳风/光电能力定量预评估方法[J]. 电网技术, 2015(1): 223-229.
- [6] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 王维洲, 梁琛. 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.
- [7] The Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee (1979) IEEE Reliability Test System. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, **98**, 2047-2054.