

DOI: 10.7667/PSPC160188

大规模可再生能源并网条件下天然气机组调峰空间估算

胡殿刚¹, 潘正婕², 徐昊亮³, 靳攀润³

(1. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 国网湖北省电力公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000;
3. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 风能等可再生能源在系统中的占比逐步增大, 对电力系统调峰提出了新的挑战。系统调峰容量的不足将严重影响系统安全稳定运行, 同时也在很大程度上限制了可再生能源的消纳。鉴于天然气机组良好的调峰优势, 主张燃气机适合作为电网主要的调峰电源之一。建立燃气机组调峰空间估算模型, 考虑风电等可再生能源发电和负荷的随机性对电力系统调峰需求的影响, 引入条件风险价值(conditional value-at-risk, CVaR)理论对电力系统调峰容量的不确定性进行较好的风险控制。最后计及其他各类电源调峰能力, 实现系统调峰容量的合理配置。通过对中国某地区系统实际情况进行算例分析, 表明该模型能有效求出一定置信水平和调峰裕度下的燃气机组调峰空间, 为电源规划提供参考。

关键词: 可再生能源; 调峰需求; 天然气机组; 调峰空间估算; 条件风险价值

Peaking capacity estimation of natural gas unit under the condition of large-scale renewable energy connecting with power grid

HU Diangang¹, PAN Zhengjie², XU Haoliang³, JIN Panrun³

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China;

2. Yichang Electric Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Yichang 443000, China;

3. Gansu Electric Power Company Economic Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The proportion of renewable energy such as wind power in power system is increasing gradually, which puts forward a new peak shaving challenge for power system. The deficiency in peaking capacity will seriously harm the reliable and stable operation of power system, and limit the consumption of renewable energy to a large extent at the same time. In view of the good peaking advantage of natural gas units, this paper argues that the gas turbine is suitable to be worked as one of the main peaking power source in the grid. The estimation model of peaking capacity of gas unit is established, considering the impacts of random renewable energy generation, like wind power, and load on peak-shaving demand; conditional value-at-risk (CVaR) theory is introduced to do better risk control of the uncertainty of power system peaking capacity; finally, the rational allocation of system peaking capacity is realized, considering the peaking ability of all kinds of peaking power sources. An actual situation of the power system in a certain area is analyzed in China, and the result shows that the model can effectively calculate the peaking capacity of natural gas unit under a certain confidence level and margin of peak-shaving, and provide reference for power source planning.

This work is supported by the China Sustainable Energy Program of Energy Foundation (No. G-1406-21484).

Key words: renewable energy; peak-shaving demand; natural gas unit; peaking capacity estimation; CVaR

0 引言

随着经济的发展,我国用电负荷高峰逐年增长,电力负荷峰谷差不断拉大,系统的调峰任务艰巨;并且随大规模可再生能源并网,发电侧的灵活性、

可控性变差,系统的调峰需求进一步增加。

不少专家学者就促进风电等可再生能源消纳吸收,提高电网适应负荷变化能力方面做了有益的探讨和研究。文献[1]归纳总结了大规模间歇性新能源并网控制的关键技术;文献[2-4]研究了大规模新能源并网后电力系统调峰能力;文献[5-7]研究了风电、光伏并网的电网协调规划以及输电网扩展规划方

基金项目: 能源基金会中国可持续能源项目 (G-1406-21484)

案；文献[8]考虑风电的不确定性，建立了含风系统旋转备用随机规划模型；文献[9]提出一种含大型风电场的电力系统调峰运行特性分析方法；文献[10-12]研究了风电和其他能源发电的联合优化模型。上述研究主要侧重于电网调度的协调优化和规划方法、新能源并网对电力系统调峰的影响以及调峰能力的计算方法等方面，均默认煤电机组和水电机组为主要调峰电源。

在欧美发达国家，电网中燃机、水电机组等灵活电源占比较大，调峰能力充裕。我国目前主要有火电和水电参与调峰，其中水电机组由于其优越的技术经济特性而会优先调度，但也受到地域和季节限制。在水电等清洁调峰电源匮乏地区，则由煤机承担主要的调峰任务，污染较重，能耗大。面对今后越来越严峻的环境形势和不断增长的调峰需求，特别是在对环保要求高的地区，煤机调峰已受到限制，亟待大力发展调峰性能好、环保效益高的灵活电源，替代煤机进行调峰。

燃气发电理论上具备转换效率高、污染排放少、启停迅速、运行灵活的机组性能优势^[13]，其用于电力系统调峰，不但能够提高电网适应负荷变化的能力，而且更加环保。由于较高的天然气价、昂贵的燃气轮机设备费用及其维修费，国内气电成本一直高于煤电，经济性较差，其装机占比也始终处于较低水平。但燃机的低排放特性具有较大的环境效益，在污染日益严重的今天，尤其在经济发达的大城市，可以适当发展燃机，用以替代煤机进行调峰。

本文建立了燃气机组调峰空间估算模型，该模型综合考虑了风电、光伏发电以及负荷的不确定性对系统调峰需求的影响，研究某置信水平下电力系统需要的调峰容量，并引入条件风险价值 CVaR 理论^[14-15]降低调峰容量不足的风险；然后基于其他调峰电源的调峰能力，研究系统中燃气机组调峰空间。本文成果可以提升系统对可再生能源发电的消纳能力，同时也为电源规划提供一定的参考。

1 燃气机组调峰能力分析

本文从技术性能和污染物排放水平两方面，对燃气机组和燃煤机组的调峰能力进行对比分析。

由于煤机污染较重，而水电发展受到地理环境限制，本文认为这两类机组的调峰容量将不再明显增加。随着天然气管网建设不断扩大和国内天然气储量、产量的迅速增加，未来天然气供给情况将大为改善，燃气机组的地域限制性不再明显。

1.1 调峰技术性能

1) 启动时间

燃气轮机具有较快的启动特性，其中单循环燃气轮机启动时间最短，从启动到额定负荷一般不到 20 min；联合循环机组增加了余热锅炉和蒸汽轮机设备，启动时间比单循环机组要长^[16]。另外，燃气机组的启动时间和启动状态密切相关：热态启动时间最短，能低至几十分钟；冷态启动时间较长，不同机型所需时间从 100 多分钟到 500 多分钟不等。

燃煤机组从启动到额定负荷运行需要几个小时，甚至十几个小时，远慢于单循环燃气轮机；相较于联合循环燃气轮机，燃煤机组的启动时间一般也更长，燃气机组的快速启动优势明显。

2) 出力调节范围

从机组运行安全性角度考虑，单循环燃气轮机从空负荷到满负荷均能稳定运行，可调比例为 100%；联合循环机组的最小稳态负荷为 30% 额定出力。

对于燃煤机组，变负荷运行方式下，其最小出力一般为 40%~50% 的额定出力，出力调节范围低于燃气机组。

1.2 污染物排放水平

和燃煤机组相比，燃气机组污染物排放水平较低，基本上没有硫化物和烟尘排放，仅有少量的氮氧化物及一氧化碳的排放。并且负荷率越高，污染排放越少，NO_x 排放量能保持在 50 mg/m³ 以下，CO 排放量保持在 20 mg/m³ 以下。

此外，燃气发电机组热效率普遍高于煤机，节能环保效果明显，相较煤机，有更高的社会效益。

2 电力系统调峰需求模型

本文研究的电力系统调峰需求指为满足电力系统调度运行而需要电网保证的最小可调节容量，是研究系统理论上需要的调峰容量以及燃气机组调峰空间的重要前提。随着系统中可再生能源比例增大，其出力的间歇性、随机性，以及较低的预测精度，均会使系统调峰需求大幅增加。因此，首先需要先分析风电、光伏和电力负荷对调峰需求的影响，以及研究这些影响因素的不确定性模型。

2.1 系统调峰需求影响因素分析

统计分析表明，风电具有明显的反调峰特性，如图 1 所示^[17]。在负荷高峰时，风电出力水平较低，不能减轻电网的调峰压力，并且，若风电出力预测值大于实际值，则电网中的调峰机组还需再适当地增加出力；在负荷低谷时，风电出力会进一步降低电网调峰机组的出力水平，并且，若风电出力预测值小于实际值，调峰机组在计划发电的基础上还需适当减少出力。

光伏发电出力特性与光资源特性密切相关, 晴天时, 光伏发电出力曲线光滑、规律性较强; 但阴雨天时, 出力的间歇性和波动性表现明显, 增加了电力系统调峰难度。光伏发电与风力发电相似, 出现反调峰时对系统的调峰需求影响较大。

传统电力系统中, 电力负荷的变化是系统调峰需求的主要影响因素, 负荷峰谷差越大, 调峰需求则越大。

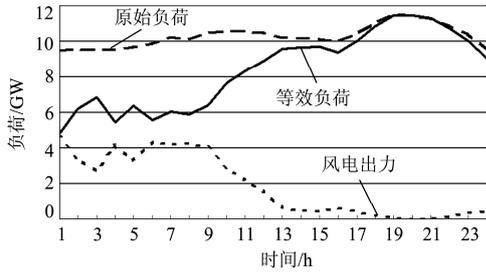


图1 风电反调峰时负荷与风电出力曲线

Fig. 1 Load and wind power output curve when wind power is doing reverse peak regulation

2.2 影响因素的不确定性模型

风电、光伏出力以及电力负荷均为随机变量, 预测值存在一定误差, 并且预测的时间越长, 误差越大。某时刻 t , 风电、光伏出力和负荷的实际值分别为

$$W_{A,t} = W_{F,t} + \varepsilon_{w,t} \quad (1)$$

$$P_{A,t} = P_{F,t} + \varepsilon_{p,t} \quad (2)$$

$$L_{A,t} = L_{F,t} + \varepsilon_{l,t} \quad (3)$$

式中: $W_{A,t}$, $W_{F,t}$, $\varepsilon_{w,t}$ 分别表示风电场在 t 时刻出力的实际值、预测值和预测误差; $P_{A,t}$, $P_{F,t}$, $\varepsilon_{p,t}$ 分别表示光伏电站在 t 时刻出力的实际值、预测值和预测误差; $L_{A,t}$, $L_{F,t}$, $\varepsilon_{l,t}$ 分别表示负荷在 t 时刻的实际值、预测值和预测误差。

为了计算方便, 本文假设风电和光伏发电出力的预测误差均为服从正态分布的随机变量^[18-19], 期望为 0, 标准差根据预测时间长短以及预测技术的不同而有所不同。

我国电力负荷预测技术已经较为成熟, 预测精度高。一般来说, 负荷短期预测误差不超过 $\pm 3\%$, 中期预测误差不超过 $\pm 5\%$, 因此, 负荷预测误差可以根据预测时间设为一个定值。

2.3 电力系统调峰需求模型

为保证电力系统能满足大部分情况下电力负荷以及风电、光伏发电对电网的调峰要求, 本文考虑电力系统调峰需求最大的情况, 即为: ① 负荷高峰时, 风电、光伏的出力水平最低; ② 负荷低谷时,

风电、光伏的出力水平最高, 并且发电侧保证尽量不弃风、光; ③ 负荷峰谷差为年最大峰谷差。此种情况下, 风电、光伏发电出力与负荷变化各自对调峰需求的影响均为最大, 互不影响。电力系统的最大调峰需求表达式为

$$D(W, P, L) = D_w + D_p + D_l \quad (4)$$

式中, D_w , D_p , D_l 分别表示由于风电、光伏出力以及负荷变化而引起的电力系统调峰需求。

其中,

$$D_w = (W_{F,t_1} + \varepsilon_{w,t_1}) - (W_{F,t_2} + \varepsilon_{w,t_2}) \quad (5)$$

$$D_p = (P_{F,t_1} + \varepsilon_{p,t_1}) - (P_{F,t_2} + \varepsilon_{p,t_2}) \quad (6)$$

$$D_l = M + \varepsilon_M \quad (7)$$

式中: t_1 为负荷低谷时刻; t_2 为负荷高峰时刻; M 表示负荷最大峰谷差的预测值; ε_M 表示负荷最大峰谷差的预测误差。

3 燃气机组调峰空间估算模型

3.1 电力系统条件风险调峰容量估算模型

在研究燃气机组调峰空间前, 需要根据调峰需求, 定量研究电力系统理论上需要的调峰容量。首先引入调峰裕度的概念, 建立调峰需求与调峰容量之间的联系, 并以此衡量电力系统的调峰能力是否充裕; 然后基于条件风险价值 CVaR 理论建立电力系统条件风险调峰容量预测模型, 较好地控制调峰容量不足的风险。

3.1.1 电力系统调峰裕度

若电力系统的调峰容量大于最大调峰需求, 则说明系统的调峰能力是充裕的, 能满足任何情况下系统的调峰要求。电力系统的调峰裕度为

$$H(X, D) = \frac{X - D(W, P, L)}{X} \quad (8)$$

式中: H 表示调峰裕度; X 表示系统调峰容量; $D(W, P, L)$ 表示系统最大调峰需求。

电力系统的调峰容量充裕等价于

$$H(X, D) > 0 \quad (9)$$

由式(8)可得系统理论上需要的调峰容量为

$$X = \frac{D(W, P, L)}{1 - H} \quad (10)$$

值得注意的是, 式(10)中的 H 取值区间为(0, 1), 可以根据电力系统的具体情况要求来选值。

3.1.2 条件风险价值 CVaR 理论

鉴于风电、光伏出力水平预测误差较大, 会降低电力系统调峰需求的估算精度。为有效控制电力系统调峰容量不足的风险, 本文在电力系统调峰容

量估算模型中引入 CVaR 理论。

CVaR 与风险价值(value-at-risk, VaR)的概念相对应,最初应用在金融领域。其中, VaR 指资产价值中暴露于风险中的部分,也称为风险价值,是一个统计的概念,用于计算金融产品在未来价格波动下可能或潜在的最大损失。但是, VaR 不满足一致性公理,覆盖范围有限。CVaR 也称为尾部 VaR,含义为:在一定的置信水平上,损失超过 VaR 的条件均值,即 VaR 在置信区间外的极端值的平均值,是对 VaR 很好的补充。

因此,文中估算电力系统理论上需要的调峰容量时,为了最大限度地控制风险,采用的是 CVaR 方法,而不是 VaR。

3.1.3 条件风险调峰容量估算模型

设电力系统调峰容量 X 的概率密度函数为 $\varphi(x)$ 。由前面的模型可知,在调峰裕度 H 为定值 α 的情况下,系统的调峰容量 X 也是概率密度服从正态分布的随机变量,即

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

式中, μ, σ 分别为调峰容量的期望和标准差,计算公式如下:

$$\mu = \frac{1}{1-\alpha} [\mu(D_w) + \mu(D_p) + \mu(D_l)] \quad (12)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{(1-\alpha)^2} [\sigma^2(D_w) + \sigma^2(D_p) + \sigma^2(D_l)] \quad (13)$$

假设在某一置信水平 β 下,系统调峰容量在数学模型上对应的数值为 γ ,即系统的调峰容量在 γ 值以下的概率为 $\beta \times 100\%$,则有

$$\beta = \int_{x \leq \gamma} \varphi(x) dx \quad (14)$$

但是系统理论上需求的调峰容量 X 还是有很小的概率大于 γ 。为了较好地控制调峰容量不足的风险,引入 CVaR,提出条件风险调峰容量。条件风险调峰容量的数学意义为:调峰容量大于 γ 时的条件均值,表达式为

$$E(x) = \frac{1}{1-\beta} \int_{x > \gamma} x \cdot \varphi(x) dx \quad (15)$$

3.2 燃气机组调峰空间估算模型

已知电力系统理论上需要的调峰容量以及实际已有的调峰容量(不包括燃机的调峰容量),可以估算出燃气机组调峰空间,如式(16)所示。

$$X_g = \begin{cases} E(X) - (X_c + X_w + X_l), & \text{若 } E(X) > X_c + X_w + X_l \\ 0, & \text{若 } E(X) \leq X_c + X_w + X_l \end{cases} \quad (16)$$

式中: X_g 表示燃气机组调峰空间; $E(X)$ 表示系统条件风险调峰容量; X_c, X_w 和 X_l 分别为燃煤机组、水电机组和联络线的调峰容量。

燃煤、水电机组调峰容量计算如式(17)所示。联络线的调峰能力,需参考不同地区的具体情况。

$$X_i = k_1 \times k_2 \times C_i \quad (17)$$

式中: $i=c$ 或 w , 即表示燃煤机组或水电机组; k_1 表示调峰机组占比; k_2 表示调峰范围; C_i 表示机组的装机容量。

此模型考虑了燃煤机组和水电机组的最大调峰容量,并认为其将不再大幅增加。大规模可再生能源并网后,引发的大量调峰容量缺额应由燃气发电机组提供。文章通过研究天然气机组调峰空间,估算出理论上需要的燃气发电机组装机,为系统的电源规划提供参考。

4 算例分析

4.1 原始数据

本文以我国某地区电力系统为例进行算例分析,该地区风、光资源丰富,将规划建立大规模的风电场和光伏电站。2020年煤电、水电等电源装机容量规划值以及电力负荷预测值分别如表1、表2所示,联络线不参与调峰。

表1 电源装机容量

	燃煤	水电	风电	光伏
装机容量/MW	31 392	557.9	20 860	3930

表2 负荷情况

最大负荷/MW		最大峰谷差/MW	
非供热期	供热期	非供热期	供热期
40 700	40 330	5700	5100

4.2 计算系统条件风险调峰容量

计算该地区2020年系统理论上需要的调峰容量时,假定风电、光伏装机容量就是其规划值,在此基础上对风电、光伏发电功率的预测可以认为是2020年情景下的短期预测。其中,风电功率短期预测误差的标准差^[18]近似为

$$\sigma_{w,t} = \frac{1}{5} W_{F,t} + \frac{1}{50} W_1 \quad (18)$$

式中, W_1 为风电装机总容量,这里为20 860 MW。光伏预测系统的技术手册中规定:光伏电站

发电时段(不含出力受控时段)的短期预测月均方根误差应小于 0.15。因此, 可以近似认为短期预测误差的标准差为

$$\sigma_{p,t} = 0.15 \times P_{F,t} \quad (19)$$

对 2020 年的电力负荷水平进行预测, 属于中期预测范畴, 规定的预测误差不超过±5%。这里考虑最坏的情况, 即负荷预测误差就是±5%。

通过统计该区域风电场出力水平的历史数据可知, 风机最大、最小出力水平约为其装机的 70%、35%。该地区负荷低谷均在夜间出现, 此时光伏电站不发电; 负荷高峰在白天出现, 光伏电站最小出力水平约为装机的 25%。

不同置信水平 β 、调峰裕度 α 下的条件风险调峰容量 $E(X)$ 值的计算结果如表 3 所示。

表 3 不同 β 、 α 下的 $E(X)$ 值

Table 3 $E(X)$ values with different β and α

	置信度 β	调峰裕度 α		
		5%	8%	10%
		非供热期	0.85	19 221.3
$E(X)/MW$	0.90	20 030.5	20 683.6	21 143.3
	0.95	21 271.8	21 965.5	22 453.6
	供热期	0.85	18 558.2	19 163.3
$E(X)/MW$	0.90	19 367.3	19 998.9	20 443.3
	0.95	20 608.7	21 280.7	21 753.6

4.3 计算燃气机组调峰空间

该区域调峰电源(除燃气机组)的装机及调峰容量分别如表 4、表 5 所示, 联络线不参与调峰。

表 4 燃煤机组装机及调峰容量

Table 4 Installed capacity and peak regulation capacity of coal-fired unit

燃煤机组	300 MW 及以下		300~600 MW		600 MW 及以上	
	供热机组	非供热机组	供热机组	非供热机组	供热机组	非供热机组
装机容量/MW	3142	5690	12 283	6677	2323	1277
调峰容量/MW	情景①	非供热期: 15 696 供热期: 12 146				
	情景②	非供热期: 11 184 供热期: 8365				

考虑到燃煤机组较差的调峰性能, 本文在计算煤机调峰容量时设置了两种情景: 情景①, 所有煤机均参与有偿调峰, 且最大调峰范围规定为 50%, 供热期时供热机组的调峰范围降至 30%; 情景②,

300 MW 及以上装机容量的机组最大调峰范围降至 30%, 并且供热期时, 其供热机组调峰范围降至 15%, 其他机组调峰范围与情景①相同。

表 5 水电机组装机及调峰容量

Table 5 Installed capacity and peak regulation capacity of hydroelectric unit

	常规水电机组	抽水蓄能机组
装机容量/MW	558	0
调峰机组占比 k_1	100%	—
调峰范围 k_2	50%	—
调峰容量/MW	279	

系统理论上需要的燃气机组调峰空间 X_g 的计算结果如表 6 所示。

表 6 系统理论上需要的燃气机组调峰空间

Table 6 Peaking capacity of gas unit needed in theory

置信水平 β	调峰裕度 α	燃气调峰空间 X_g/MW			
		情景①		情景②	
		非供热期	供热期	非供热期	供热期
0.85	5%	3246.3	6133.2	7758.3	9914.5
	8%	3873.1	6738.3	8385.1	10 519.6
	10%	4314.2	7164.2	8826.2	10 945.5
0.9	5%	4055.5	6942.3	8567.5	10 723.6
	8%	4708.6	7573.9	9220.6	11 355.2
	10%	5168.3	8018.3	9680.3	11 799.6
0.95	5%	5296.8	8183.7	9808.8	11 965
	8%	5990.5	8855.7	10 502.5	12 637
	10%	6478.6	9328.6	10 990.6	13 109.9

该区域所有燃气机组均为非供热机组, 且最大调峰范围是 70%, 可以算出系统理论上需要的燃气机组装机容量, 结果如表 7 所示。

表 7 系统理论上需要的燃机装机容量

Table 7 Installed capacity of gas unit needed in theory

置信水平 β	调峰裕度 α	理论上需要的燃机装机容量/MW			
		情景①		情景②	
		非供热期	供热期	非供热期	供热期
0.85	5%	4637.6	8761.7	11 083.3	14 163.6
	8%	5533.0	9626.1	11 978.7	15 028.0
	10%	6163.1	10 234.6	12 608.9	15 636.4
0.9	5%	5793.6	9917.6	12 239.3	15 319.4
	8%	6726.6	10 819.9	13 172.3	16 221.7
	10%	7383.3	11 454.7	13 829.0	16 856.6
0.95	5%	7566.9	11 691.0	14 012.6	17 092.9
	8%	8557.9	12 651.0	15 003.6	18 052.9
	10%	9255.1	13 326.6	15 700.9	18 728.4

通过分析算例结果可知,大规模风电、光伏并网后,燃煤机组和水电机组远不足以承担系统的调峰任务。特别是在限制大容量燃煤机组的调峰范围后,火电机组调峰能力普遍降低,调峰容量供不应求的矛盾更加突出,需要规划建设较大容量的燃气发电机组,以满足系统较大的调峰需求,最大限度接纳风电等可再生能源并网发电。

5 结论

1) 由于燃气机组调峰技术性能好,热效率高,污染物排放少,本文认为其适合作为今后电网主要的调峰电源之一,并建立燃气机组调峰空间估算模型。

2) 针对我国风电、光伏出力水平预测误差较大的问题,在模型中引入条件风险价值 CVaR 理论,有效降低了系统调峰容量不足的风险。

3) 算例估算了某风、光资源较多的区域在供热期和非供热期的燃机调峰空间。结果表明,置信水平和安全裕度的要求越高,燃机调峰空间越大,并且供热期大于非供热期;特别是在煤机调峰范围受到限制后,燃机调峰空间进一步加大,需要规划建设相应容量的天然气机组。算例结果可以为电力系统的电源规划提供依据,并有效促进可再生能源的大规模并网。

参考文献

[1] 罗剑波, 陈永华, 刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.
 LUO Jianbo, CHEN Yonghua, LIU Qiang. Overview of large-scale intermittent new energy grid-connected control technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 140-146.

[2] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.
 ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.

[3] 杨宏, 苑津莎, 吴立增. 基于风电功率预测的电网静态调峰能力极限研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 266-273.
 YANG Hong, YUAN Jinsha, WU Lizeng. Research of static regulation capacity limit based on wind power

prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 266-273.

[4] 周鑫, 张慧玲, 刘娟楠. 大规模风电接入对宁夏电网调峰的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 105-110.
 ZHOU Xin, ZHANG Huiling, LIU Juannan. Impacts of large-scale grid-connected wind power on peak regulation in Ningxia Grid[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 105-110.

[5] 颜伟, 吕冰, 赵霞, 等. 分布式风电源与配网联络线协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 1-6.
 YAN Wei, LÜ Bing, ZHAO Xia, et al. Coordinated allocation of DGs and tie lines in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 1-6.

[6] ORFANOS G A, GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1355-1362.

[7] 魏刚, 范雪峰, 张中丹, 等. 风电和光伏发展对甘肃电网规划协调性的影响及对策建议[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 135-141.
 WEI Gang, FAN Xuefeng, ZHANG Zhongdan, et al. Influence of wind power and photovoltaic's development on Gansu power grid planning coordination and suggestions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 135-141.

[8] 王雁凌, 许传龙, 岳巍澎. 时变可靠性约束下含风电系统旋转备用的随机规划模型[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1311-1316.
 WANG Yanling, XU Chuanlong, YUE Weipeng. A stochastic programming model for spinning reserve of power grid containing wind farms under constraint of time-varying reliability[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1311-1316.

[9] 侯婷婷, 娄素华, 吴耀武. 含大型风电场的电力系统调峰运行特性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 105-111.
 HOU Tingting, LOU Suhua, WU Yaowu. Analysis on peak load regulation operation characteristics of power system integrated with large-scale wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 105-111.

[10] 程世军, 孟杰, 王晓晖, 等. 风电-储能联合日运行优化调度模型[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(4): 68-72.
 CHENG Shijun, MENG Jie, WANG Xiaohui, et al. A joint daily operational optimization model for wind power

- and energy storage devices[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(4): 68-72.
- [11] 李燕青, 李浩闪. 风蓄火联合运行电力系统动态经济优化调度[J]. 陕西电力, 2014, 42(11): 40-45.
LI Yanqing, LI Haoshan. Dynamic economic optimal dispatching of power system with wind power-pumped storage-thermal power joint operation[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(11): 40-45.
- [12] 卓结彬, 李亮枫. 考虑不确定性风电功率预测的风电-抽水蓄能联合优化运行[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 19-23.
ZHUO Jiebin, LI Liangfeng. Wind power and pumped storage optimization operation considering the uncertainty of wind power forecasting[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 19-23.
- [13] 张贲, 张毅威, 梁旭, 等. 燃气机组发电特性及其在电网中运行方式的研究[J]. 燃气轮机技术, 2009, 22(2): 14-18.
ZHANG Ben, ZHANG Yiwei, LIANG Xu, et al. Research of the generation characteristics and the operation mode in electric power grid of gas-fired genset[J]. Gas Turbine Technology, 2009, 22(2): 14-18.
- [14] URYASEV S. Conditional value at risk, optimization algorithms and applications[J]. Financial Engineering News, 2000, 2(3): 1-5.
- [15] ROCKAFELLER T, URYASEV S. Conditional value-at-risk for general loss distributions[J]. Journal of Banking and Finance, 2002, 26(7): 1443-1471.
- [16] 杨天海. 燃气轮机发电技术及其对电网调峰的影响[J]. 燃气轮机发电技术, 2004, 6(3/4): 80-84.
YANG Tianhai. The development of CCGP & the influence to power grid in China[J]. Gas Turbine Power Generation Technology, 2004, 6(3/4): 80-84.
- [17] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 152-158.
ZHANG Ning, ZHOU Tianrui, DUAN Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 152-158.
- [18] BOUFFARD F, GALIANA F D. Stochastic security for operations planning with significant wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 306-316.
- [19] 林少伯, 韩民晓, 赵国鹏, 等. 基于随机预测误差的分布式光伏配网储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 25-33.
LIN Shaobo, HAN Minxiao, ZHAO Guopeng, et al. Capacity allocation of energy storage in distributed photovoltaic power system based on stochastic prediction error[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 25-33.

收稿日期: 2016-02-04; 修回日期: 2016-04-05

作者简介:

胡殿刚(1975-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网发展及工程应用;

潘正婕(1992-), 女, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为新能源发电与智能电网建设; E-mail: 15210828393@163.com

徐昊亮(1981-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、智能电网规划应用研究。

(编辑 魏小丽)