

DOI: 10.7667/PSPC170210

基于调峰能力评估的省间调峰互济交易模式

孙云涛, 宋依群

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 电网负荷峰谷差不断增大和跨区域输电的发展导致负荷低谷时段的调峰问题日益突出。提出一种电网低谷时段调峰能力评估模型, 对研究周期内大容量燃煤机组启停次数和最小下调功率裕度进行优化, 同时考虑机组运行的各类约束和电网负荷约束, 实现电网低谷时段调峰能力的量化评估。基于不同电网间调峰能力的差异性, 提出一种省间调峰互济交易机制, 分析了低谷交易和峰谷打捆交易两种交易模式, 并在调峰能力评估的基础上提出了调峰不足电网的调峰需求量确定方法。算例分析表明, 所提出的方法能有效评估电网调峰能力, 所提出的省间调峰互济交易模式具有可行性和有效性。

关键词: 调峰能力; 优化模型; 省间互济; 交易模式

Peak load regulation trading mode for trans-provincial aid based on evaluation of system regulation capability

SUN Yuntao, SONG Yiqun

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The increase of grid load peak-valley difference and the development of trans-regional power transmission lead to the peak load regulation problems in valley periods of load. An evaluation model of peak load regulation capability in valley periods of load is established, which optimizes the times of units' startup and shutdown and the minimum downward adjustable power during the research period considering various types of constraints of unit operation and grid operation and achieves the quantitative assessment of negative peak load regulation capability. On the basis of otherness of peak load regulation capability between two grids, a trading mechanism is proposed and two trading modes including valley trade and peak-valley-bundled trade are analyzed. Then a method to determining the regulation demand of lacking-load grid is proposed on the basis of evaluation model of peak load regulation capability. The results of typical case indicate that the proposed model can effectively evaluate the peak load regulation capability and the proposed trading mode for trans-provincial aid is feasible and effective.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 520800150014).

Key words: peak load regulation capability; optimization model; trans-provincial aid; trading mode

0 引言

随着我国特高压建设的不断推进, 跨区输电发展迅速, 但是在解决受电地区的用电需求外, 区外来电也给受端电网的低谷调峰带来了困难, 华东电网作为特高压受端电网, 面临低谷调峰压力, 并且网内各省市调峰压力差异明显^[1]。因此, 如何评估电网的调峰能力并比较不同电网间差异, 以及在此基础上如何开展调峰互济, 是值得研究的问题。

调峰能力主要指系统的有功出力平衡系统负荷变化的能力, 文献[2]以风电并网系统低谷时段下调最大电量为目标函数建立评价调峰能力的整数规划模型, 侧重于探索应对风电波动的调峰极限。文献[3]基于调峰容量比的概念, 得到调峰不足概率指标, 反映电网调峰充裕性。文献[4]基于机组的负调峰能力, 提出计算电网中常规发电机负调峰容量极限的数学模型。文献[5]分析了高载能负荷对电网调峰的影响以及参与调峰的方案, 侧重于分析节能效果。文献[6-9]研究了大规模新能源并网条件下电网调峰能力以及电网调峰能力对新能源消纳的影响。

基金项目: 国家电网公司科技项目(520800150014)

上述文献没有涉及机组启停调峰经济性以及对电网安全稳定运行的影响, 同时对机组实际运行中启停时间约束和爬坡率约束等考虑较少。

目前很多学者针对调峰权交易和调峰市场进行了大量研究。通过调峰权交易, 向下调峰不足的发电机组可以购买调峰权从而避免运行在较差工况, 提升整体经济效益^[10-12]。调峰市场方面, 文献[13]从调峰效用的角度给出了调峰交易数学模型, 证实了调峰交易实现调峰能力互济的同时可以降低发电成本。文献[14]针对风电和抽水蓄能电厂的联合调峰进行了交易模式的探索, 设计了两方联合调峰的市场流程和市场机制。文献[15]构建基于智能代理的低谷调峰市场, 采取买卖双方发电厂商分段报价的方式开展交易。虽然上述文献对调峰权和调峰市场进行了研究, 但并未从电网角度考虑网间调峰能力差异对调峰交易的影响。

本文将机组启停调峰考虑在内, 在此基础上考虑电网研究周期内最小的下调功率裕度, 同时考虑电网负荷约束和机组运行约束, 建立 0-1 整数规划模型, 对大容量燃煤机组启停次数最少情况下的最小下调功率裕度进行优化。基于电网间调峰能力的差异, 本文建立省间调峰互济交易机制, 分别考虑低谷交易和峰谷打捆的交易模式, 并根据调峰能力评估模型研究调峰不足电网调峰需求量的确定方法。算例分析结果说明了所提评估方法和交易模式的有效性。

1 电网调峰能力评估方法

特高压受端电网调峰的主要问题存在于电网负荷低谷时段, 由于大容量燃煤机组启停调峰成本高, 并且存在机组停机后次日早峰前不能按时并网的情况, 不利于电网运行的经济性和安全性。评估电网调峰能力需要考虑大容量燃煤机组的启停调峰问题, 在此基础上对电网低谷时段下调空间进行优化。

1.1 目标函数

设研究周期为 T , 在研究周期内电网大容量火电燃煤机组启停调峰的启动和停机操作次数为

$$F = \sum_{i \in A_1} \sum_{t=1}^T [(1-u_{i,t})u_{i,t-1} + (1-u_{i,t-1})u_{i,t}] \quad (1)$$

在研究周期内电网最小下调功率裕度为

$$H = \min_{t \in T} [(1+\delta)L_t - P_{in,t} - \sum_{i \in A} u_{i,t} P_{G,i}^{\min}] \quad (2)$$

式中: $u_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的运行状态, $u_{i,t} \in \{0,1\}$, 0 代表停运状态, 1 代表运行状态; A 代表参与调峰的机组集合, A_1 代表大容量燃煤机组集合, $A_1 \in A$;

δ 为网损系数; L_t 为 t 时段电网负荷; $P_{in,t}$ 为 t 时段区外来电; $P_{G,i}^{\min}$ 为机组 i 的最小技术出力。

选取目标函数如下:

1) 研究周期内大容量火电燃煤机组启停调峰的启动和停机次数最少, 即

$$\min (F) \quad (3)$$

2) 研究周期内电网最小下调功率裕度最大, 即

$$\max (H) \quad (4)$$

1.2 约束条件

1) 电网负荷约束

$$\sum_{i \in A} u_{i,t} P_{G,i}^{\min} + R_{d,t} \leq L_t^{\text{eq}} \quad (5)$$

$$L_t^{\text{eq}} \leq \sum_{i \in A} u_{i,t} P_{G,i}^{\max} - P_{\text{limit},t} - R_{u,t} \quad (6)$$

式中: L_t^{eq} 代表电网等效负荷, 为考虑网损的电网实际负荷与区外来电的差值; $R_{d,t}$ 代表 t 时段的系统备用, $R_{u,t}$ 代表 t 时段的系统正备用; $P_{G,i}^{\max}$ 为机组 i 的最大技术出力; $P_{\text{limit},t}$ 代表 t 时段所有机组由于进行启停机操作受限制的有功出力, 具体来说为启动时段的机组和停机前一时段的机组仅能维持在最小技术出力。令 $\Delta P_{G,i} = P_{G,i}^{\max} - P_{G,i}^{\min}$, 上述变量具体表示为

$$L_t^{\text{eq}} = (1+\delta)L_t - P_{in,t} \quad (7)$$

$$P_{\text{limit},t} = \sum_{i \in A} [(1-u_{i,t-1})u_{i,t} \Delta P_{G,i} + u_{i,t}(1-u_{i,t+1}) \Delta P_{G,i}] \quad (8)$$

2) 机组最小的运行与停运时间约束

$$u_{i,t}(1-u_{i,t-1}) \left(\sum_{j=t}^{t+T_{\text{on},i}-1} u_{i,j} - T_{\text{on},i} \right) \geq 0 \quad (9)$$

$$u_{i,t-1}(1-u_{i,t}) \left[\sum_{j=t}^{t+T_{\text{off},i}-1} (1-u_{i,j}) - T_{\text{off},i} \right] \geq 0 \quad (10)$$

式中: $T_{\text{on},i}$ 为机组 i 的最小运行时间, $T_{\text{off},i}$ 为机组 i 的最小停运时间。

3) 机组响应能力约束

$$L_{t_{u,p}}^{\text{eq}} - L_{t_{u,v}}^{\text{eq}} \leq \sum_{i \in A} (\Delta P_{u,i} + \Delta P_{u,i}^{\text{ramp}}) \quad (11)$$

$$L_{t_{d,p}}^{\text{eq}} - L_{t_{d,v}}^{\text{eq}} \leq \sum_{i \in A} (\Delta P_{d,i} + \Delta P_{d,i}^{\text{ramp}}) \quad (12)$$

式中: $t_{u,p}$ 和 $t_{u,v}$ 分别代表等效负荷上升阶段中等效负荷最高和最低点对应的时段序号; $t_{d,p}$ 和 $t_{d,v}$ 代表等效负荷下降阶段中等效负荷最高点和最低点对应的时段序号; $\Delta P_{u,i}$ 和 $\Delta P_{d,i}$ 代表电网等效负荷上升阶段和下降阶段机组 i 由于启动增加的有功出力或由于停机减少的有功出力; $\Delta P_{u,i}^{\text{ramp}}$ 和 $\Delta P_{d,i}^{\text{ramp}}$ 代表电网等效负荷上升阶段和下降阶段处于运行状态的机组

i 可调节有功出力。上述变量的表达式为

$$\Delta P_{u,i} = \sum_{j=t_{u,p}}^{t_{u,v}} u_{i,j}(1-u_{i,j-1})P_{G,i}^{\min} \quad (13)$$

$$\Delta P_{d,i} = \sum_{j=t_{d,p}}^{t_{d,v}} u_{i,j-1}(1-u_{i,j})P_{G,i}^{\min} \quad (14)$$

$$\Delta P_{u,i}^{\text{ramp}} = \min \left\{ \sum_{j=t_{u,p}}^{t_{u,v}} u_{i,j} r_i^{\text{up}} \Delta t, \Delta P_{G,i} \right\} \quad (15)$$

$$\Delta P_{d,i}^{\text{ramp}} = \min \left\{ \sum_{j=t_{d,p}}^{t_{d,v}} u_{i,j} r_i^{\text{dn}} \Delta t, \Delta P_{G,i} \right\} \quad (16)$$

式中： r_i^{up} 和 r_i^{dn} 分别代表机组 i 在出力调节范围内的向上、向下爬坡率限值； Δt 代表时段间的间隔时间。

4) 机组启停次数约束

$$\sum_{i=1}^T [(1-u_{i,t})u_{i,t-1} + (1-u_{i,t-1})u_{i,t}] \leq c_i, \quad i \in A \quad (17)$$

式中， c_i 为机组 i 在研究周期 T 内的启停次数限值。

1.3 模型分析

以上优化模型属于非线性 0-1 整数规划问题，为便于求解，可通过引入两组开关机操作变量将其线性化处理^[2]，两组开关机变量包括： $x_{i,t}^u \in \{0,1\}$ 代表机组 i 在 t 时段是否进行启动操作，1 代表进行启动操作，0 代表不进行启动操作； $x_{i,t}^d \in \{0,1\}$ 代表机组 i 在 t 时段是否进行停机操作，1 代表进行停机操作，0 代表不进行停机操作。开关机操作变量与机组运行状态变量之间的关系为

$$u_{i,t} - u_{i,t-1} - x_{i,t}^u + x_{i,t}^d = 0 \quad (18)$$

$$x_{i,t}^u + x_{i,t}^d \leq 1 \quad (19)$$

引入开关机操作变量后，可利用式(20)、式(21)将模型中目标函数和约束条件进行线性化处理。

$$(1-u_{i,t})u_{i,t-1} = x_{i,t}^u \quad (20)$$

$$(1-u_{i,t-1})u_{i,t} = x_{i,t}^d \quad (21)$$

1.4 评估流程

本文评估电网调峰能力考虑两个目标函数，但是这两个目标函数不能同时满足，也即大容量火电燃煤机组启停调峰的启动和停机操作次数的增加可使得最小下调功率裕度的增加，两者不能同时达到最优。在电网实际运行中，大容量燃煤机组启停不灵活、启停周期长且启停成本高，从而影响电网运行的经济性和安全性，是需要首先考虑的问题。因此将模型中的各目标分出主次，将第一优先级的目标函数取为研究周期内大容量火电燃煤机组启停调峰的启动和停机操作次数最少，将第二优先级的目标函数取为研究周期内最小下调功率裕度最大。基

于以上分析，电网调峰能力的评估流程如下：

1) 读入原始数据，包括机组容量约束、爬坡率约束、启停时间和次数约束、电网预测负荷数据和区外来电数据；

2) 以式(3)为目标函数，以式(5)、式(6)、式(9)一式(12)、式(17)为约束条件，求解优化模型，得到大容量火电燃煤机组启停调峰的启动和停机次数的最小值 F_{\min} ；

3) 将 $F=F_{\min}$ 作为约束条件添加到模型中，同时将目标函数修改为式(4)，在 2) 的解集中寻找满足研究周期内最小的下调功率裕度最大的解，相较 2)，这一步对参与启停机组的启停机时段进行进一步优化，得到满足 $F=F_{\min}$ 的最小下调功率裕度的最大值 H_{\max} 。

2 基于调峰能力评估的省间调峰互济交易

2.1 省间调峰互济交易机制

本文基于向下调峰容量交易，以省间的调峰能力互济为主要目的设计日前调峰市场机制。

各省级电网在考虑短期负荷预测和区外来电输电计划的基础上，结合本地电网的调峰能力，确定是否有调峰支援需求。若某省级电网有调峰支援需求，则在区域电网的调峰交易平台发布本地各时段的调峰需求量。同时能够提供调峰支援的省级电网的发电厂商在满足本地电网调峰要求的基础上发布机组可下调容量和调峰服务价格，按照发电厂商报价从低到高进行市场出清，达成交易，实现省间调峰互济。

省间调峰互济交易应不影响发电厂商年度合约电量，即因提供向下调峰容量少发的电量会在购买省调峰不困难的时段得到返还。

2.2 省间调峰互济交易模式

根据电量返还方式的不同，研究省间调峰互济交易的两种交易模式。

1) 低谷交易

调峰能力不足的省级电网通过购买低谷时段的向下调峰容量来满足自身电网的调峰需求，通过调峰互济交易的电量在交易完成后调峰不困难的日期进行返还，从而达到电量的平衡，即低谷交易方式不在当日进行电量返还。

2) 峰谷打捆交易

电网调峰能力不足的省级电网购买低谷时段的向下调峰容量对应的电量在当日电网负荷高峰时返还，这种交易方式使得通过调峰容量交易产生的电量互换在一天内达到省间平衡。

2.3 调峰需求量的确定

考虑当某省级电网需要安排大容量燃煤机组日内启停参与调峰时, 则该省有调峰支援需求, 需要通过省间互济来缓解自身调峰压力。因此, 调峰需求量的确定原则为大容量火电燃煤机组不参与日内启停调峰, 也即

$$F = 0 \quad (22)$$

在满足式(22)的基础上, 求解研究周期内电网的最小调峰需求量, 目标函数为

$$\min Y = \sum_{t \in T} L_{\text{valley},t} \Delta t \quad (23)$$

式中, $L_{\text{valley},t}$ 为 t 时段的向下调峰需求量。

两种交易模式对电网等效负荷的影响不同, 针对两种交易模式分别分析。

1) 低谷交易

低谷交易模式下, 调峰能力不足电网在省间调峰互济交易后的等效负荷为

$$L_t^{\text{eq}} = (1 + \delta)L_t - P_{\text{in},t} + L_{\text{valley},t} \quad (24)$$

向下调峰需求量应满足:

$$L_{\text{valley},t} \geq 0, t \in T \quad (25)$$

求解以式(23)为目标函数, 以式(5)、式(6)、式(9)一式(12)、式(17)、式(22)和式(25)为约束条件的优化模型, 可得到低谷交易模式下调峰能力不足电网的调峰需求量。

2) 峰谷打捆交易

峰谷打捆交易使得通过调峰容量交易产生的电量互换在一天内达到省间平衡, 因此需计及高峰返还的电量, 调峰能力不足电网在省间调峰互济交易后的等效负荷为

$$L_t^{\text{eq}} = (1 + \delta)L_t - P_{\text{in},t} + L_{\text{valley},t} - L_{\text{peak},t} \quad (26)$$

式中, $L_{\text{peak},t}$ 为 t 时段需要返还的容量。

向下调峰需求量和返还容量满足以下关系:

$$\begin{cases} L_{\text{valley},t} \geq 0 \\ L_{\text{peak},t} \geq 0 \\ \sum_{t \in T} L_{\text{valley},t} \Delta t = \sum_{t \in T} L_{\text{peak},t} \Delta t \end{cases}, t \in T \quad (27)$$

求解以式(23)为目标函数, 式(5)、式(6)、式(9)一式(12)、式(17)、式(22)和式(27)为约束条件的优化模型, 可得到峰谷打捆交易模式下调峰能力不足电网的调峰需求量。

3 算例分析

本文以华东两省级电网 A 和 B 夏季实际运行数据为例进行分析。研究周期为 1 天, 时段数 $T=96$, 时间间隔 $\Delta t=15 \text{ min}$ 。

A 省和 B 省电网 300 MW 及以上容量火电机组台数如表 1 所示, 本文对燃煤机组容量在 300 MW 及以上的机组的启停调峰进行优化, 也即大容量燃煤机组集合包括电网所有容量大于等于 300 MW 燃煤机组。若机组参与启停调峰, 则在一天内完成一次启停过程。

对于机组最低出力: 常规燃煤火电机组取其 40% 额定装机容量; 燃机机组取其 50% 额定容量; 水电机组取 0; 抽水蓄能机组取为负的额定装机容量(即运行在用电状态)。

表 1 300 MW 及以上容量的火电机组台数

Table 1 Numbers of thermal units with capacities of

容量/MW	台数	
	A 省	B 省
$P \geq 1000$	4	1
$1000 > P \geq 900$	2	0
$900 > P \geq 600$	6	21
$600 > P \geq 300$	23	26

对于机组爬坡率: 常规燃煤机组取为 15% 额定容量/15 min; 燃机机组取为 45% 额定容量/15 min; 水电机组和抽水蓄能机组取为 45% 额定容量/15 min。

对于机组最小运行与停运时间: 常规燃煤机组取为 12 h; 燃机机组和水电机组取为 4 h。

A 省和 B 省夏季某典型日的负荷和区外来电情况如图 1 所示, 本文取网损率为 7%^[21], 系统正备用为系统容量最大的发电机组的装机容量, 系统负备用为最低负荷的 4%。A 省等效负荷上升阶段为时段 28—42、49—54, 下降阶段为时段 45—48、61—72、90—96; B 省等效负荷上升阶段为时段 38—45、76—81, 下降阶段为时段 45—48、67—76。

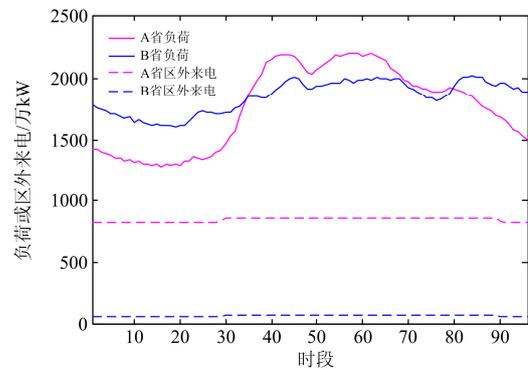


图 1 A 省和 B 省的负荷和区外来电

Fig. 1 Load and power from outside of A and B province

基于本文所提方法, 采用 Matlab 编程调用 CPLEX 优化软件对 A 省和 B 省调峰能力进行评估,

评估结果如表 2 所示, A 省和 B 省全天各时段的功率下调裕度如图 2 所示。

由表 2 和图 2 可以看出, A 省和 B 省的调峰能力差异明显, A 省需要大容量燃煤机组启停次数达到 6 次才能够满足调峰需求, 即使如此, A 省最小下调功率裕度仍然远小于 B 省。这主要是由负荷特性和区外来电特性的不同导致, 对比图 1 可以看出, A 省的负荷峰谷差明显大于 B 省, 区外来电在负荷中所占比例远大于 B 省, 这导致 A 省面临严峻的低谷调峰压力。

表 2 调峰能力评估结果

Table 2 Evaluation results of system regulation capability

省份	F_{min} /次	H_{max} /万 kW
A 省	6	67.67
B 省	0	877.76

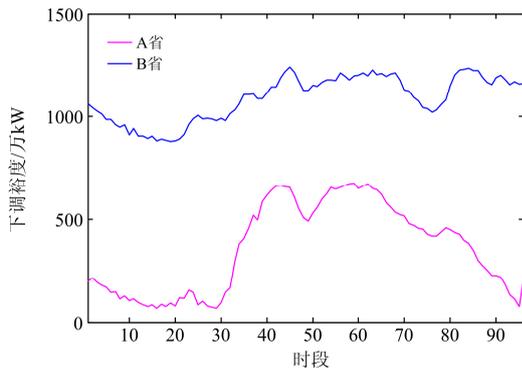


图 2 各时段的功率下调裕度

Fig. 2 Downward adjustable power in all the time periods

调峰能力的差异给省间调峰互济交易提供了可行性基础, 基于本文提出的省间调峰互济交易模式, 求解得到低谷交易和峰谷打捆交易两种交易模式下 A 省交易前后的电网负荷如图 3 所示。

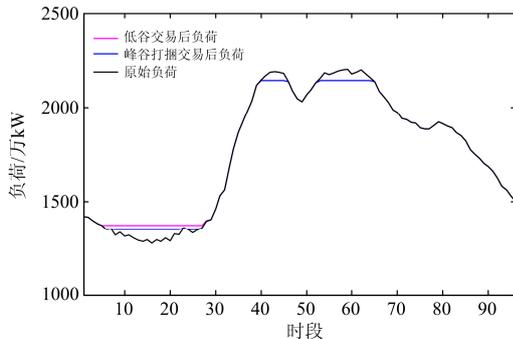


图 3 省间调峰互济交易前后 A 省负荷

Fig. 3 Load of A province before and after peak load regulation trading for trans-provincial aid

通过省间调峰互济交易, A 省大容量燃煤机组启停操作次数由 6 次降为 0 次, 可避免大容量燃煤

机组启停带来的电网安全问题和经济损失。从图 3 可以看出, 低谷交易对调峰能力不足电网起到填谷作用, 峰谷打捆交易由于在一天内形成跨省调峰互济电量平衡, 对调峰能力不足电网起到削峰填谷的作用, 对于负荷峰谷差的改变效果更为明显。

低谷交易和峰谷打捆交易两种模式下 A 省的调峰需求量如图 4 所示。

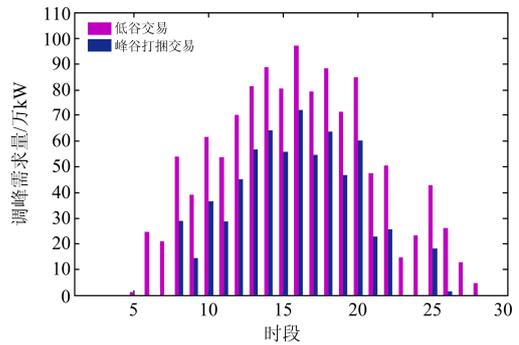


图 4 两种交易模式下的调峰需求量

Fig. 4 Regulation demand under two trade modes

对比图 4 两种模式可以看出, 峰谷打捆交易模式下, A 省需要向其他省购买的向下调峰容量及对应的电量小于低谷交易模式。其中, 低谷交易模式下 A 省需要购买的向下调峰容量对应的电量为 305.15 万 kWh, 峰谷打捆交易模式下为 174.11 万 kWh, 因此对于调峰能力不足电网, 峰谷打捆交易模式下需支付的调峰服务费用小于低谷交易模式。

4 结论

电网负荷峰谷差不断增大和特高压输电的发展使得受端电网低谷调峰形势日益严峻, 本文建立了电网调峰能力评估模型, 综合考虑电网和机组各类约束, 对大容量燃煤机组启停次数最少情况下的最小下调功率裕度进行优化。基于省间调峰能力差异提出了省间调峰互济交易机制, 研究了低谷交易和峰谷打捆交易模式, 并基于调峰能力评估模型提出电网调峰支援需求量的确定方法。算例表明所提模型能定量评估电网调峰能力并确定调峰不足电网低谷的调峰需求量, 并且验证了省间调峰互济能避免大容量燃煤机组启停调峰, 为电网应对低谷调峰问题提供参考。

参考文献

[1] 程春田, 励刚, 程雄, 等. 大规模特高压直流水电消纳问题及应用实践[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 549-560.

CHENG Chuntian, LI Gang, CHENG Xiong, et al. Large-scale ultra high voltage direct current hydropower absorption and its experiences[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2015, 35(3): 549-560.
- [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.
YANG Dongfeng, ZHOU Suquan, BAO Feng. Analysis on peak load regulation capability of power grid integrated with wind farms in valley load period[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1446-1451.
- [3] 张宏宇, 印永华, 申洪, 等. 大规模风电接入后的系统调峰充裕性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 26-31.
ZHANG Hongyu, YIN Yonghua, SHEN Hong, et al. Peak-load regulating adequacy evaluation associated with large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 26-31.
- [4] 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, 30(16): 26-31.
YANG Hong, LIU Jianxin, YUAN Jinsha. Research of peak load regulation of conventional generators in wind power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 26-31.
- [5] 李淑鑫, 刘文颖, 李亚龙, 等. 荷源联合调峰运行方案的电力节能评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 7-14.
LI Shuxin, LIU Wenying, LI Yalong, et al. Evaluation of energy-saving on peak load regulation scheme based on source-load coordination[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 7-14.
- [6] 张涛, 李家珏, 张延峰, 等. 计及电网调峰约束的风电接纳调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 74-80.
ZHANG Tao, LI Jiajue, ZHANG Yanfeng, et al. Research of scheduling method for the wind power acceptance considering peak regulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 74-80.
- [7] 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.
- [8] 胡殿刚, 潘正婕, 徐昊亮, 等. 大规模可再生能源并网条件下天然气机组调峰空间估算[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 87-93.
HU Diangang, PAN Zhengjie, XU Haoliang, et al. Peaking capacity estimation of natural gas unit under the condition of large-scale renewable energy connecting with power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 87-93.
- [9] YUAN B, ZHOU M, ZONG J. An overview on peak regulation of wind power integrated power systems[C] // 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, July 6-9, 2011, Weihai, China: 145-150.
- [10] 刘扬洋, 蒋传文, 李磊, 等. 考虑需求侧管理的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 38-43.
LIU Yangyang, JIANG Chuanwen, LI Lei, et al. Peak regulation right trading model considering DSM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 38-43.
- [11] 耿静, 严正, 蒋传文, 等. 考虑环境成本的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 111-114.
GENG Jing, YAN Zheng, JIANG Chuanwen, et al. The studies of peak regulation transaction considering environment costs[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 111-114.
- [12] 李安均, 陈川. 基于 MAS 的调峰权交易模型[J]. 四川电力技术, 2014(5): 86-90.
LI Anjun, CHEN Chuan. Peak regulation right trade model based on MAS[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014(5): 86-90.
- [13] 梅坚, 杨立兵, 李晓刚, 等. 调峰市场效用分析与低谷调峰市场设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 134-138.
MEI Jian, YANG Libing, LI Xiaogang, et al. Utility analysis for peak regulation market and trading market design for peak regulation capacity in valley time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 134-138.
- [14] 王睿淳, 马明娟, 薛松, 等. 我国抽水蓄能电站与风电场联合调峰交易模式设计[J]. 水电能源科学, 2013(5): 231-234.
WANG Ruichun, MA Mingjuan, XUE Song, et al. Joint peak regulation transaction mode design of pumped storage power station and wind farm in China[J]. Water Resources & Power, 2013(5): 231-234.
- [15] 范杰. 基于智能代理模型的华东电网跨省电能集中竞价市场与调峰市场仿真研究[D]. 上海: 上海大学, 2013.
FAN Jie. An Agent-based simulation research for trans-provincial power market and peak regulation market of East China Power Grid[D]. Shanghai: Shanghai University, 2013.

收稿日期: 2017-02-19; 修回日期: 2017-05-08

作者简介:

孙云涛(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、需求响应; E-mail: ytsun1993@163.com

宋依群(1970—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场、电力系统分析、智能电网。E-mail: yqsong@sjtu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)