

# 风火调峰权交易促进风电再次接纳研究

江岳文, 张艺渊

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 系统调峰能力不足导致负荷低谷时期风电场大量弃风, 成为制约风电接纳水平的主要原因之一, 调峰权交易可以激励火电机组发挥调峰潜力, 为风电提供消纳空间。将风电引入调峰权交易模型中, 提出风电参与调峰权交易的市场模式, 分析火电机组调峰权交易成本和风电场调峰权交易效益, 建立以社会效益最大和风电再次接纳量最大为多目标的调峰权交易模型, 并采用多目标粒子群优化算法对模型进行求解。IEEE 14 节点测试系统的仿真结果验证了所提模型的有效性。

**关键词:** 风电再次接纳; 社会效益; 风火调峰权交易; 多目标粒子群优化算法; 风电; 模型

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.003

## 0 引言

2015 年 3 月, 国家发展改革委颁布了《国家能源局关于改善电力运行调节促进清洁能源多发满发的指导意见》, 提到能源资源丰富地区、清洁能源装机比重较大地区在统筹平衡年度电力电量时, 新增用电需求若无法满足清洁能源多发满发, 应采取市场化方式, 鼓励清洁能源优先与用户直接交易, 充分挖掘本地区用电潜力, 最大限度消纳清洁能源<sup>[1]</sup>。各地应建立完善调峰补偿机制, 加大调峰补偿力度, 鼓励通过市场化方式确定调峰承担方, 鼓励清洁能源直接购买辅助服务。2015 年 11 月, 《关于有序放开发用电计划的实施意见》中提到要组织实施替代, 同时实现可再生能源发电优先交易, 修订火电运行技术规范, 提高调峰灵活性, 为消纳可再生能源腾出调峰空间, 鼓励开展替代发电、调峰辅助服务交易<sup>[2]</sup>。在政策背景下, 进行调峰方面的市场化研究, 对促进风电接纳具有重要意义。影响风电接纳水平的因素主要包括两大类: 一类是电网自身因素, 如电网网架结构、系统调度、备用水平、负荷特性、系统内调峰能力和电网输电水平等; 另一类是风电本身的因素, 如风电的反调峰特性、随机性和间歇性、风电预测水平、风电场低电压穿越能力等<sup>[3]</sup>。提高风电接纳的措施主要有: 建设跨区电网和调峰电源; 提升风电并网调度运行关键技术; 提升风功率预测精确度, 提高风电机组本身的监控水平、故障穿越能力、有功无功控制能力; 从政策方面提高完善风电发展的措施; 加强需求侧管理; 利用储能技术平抑风功率波动等<sup>[4-5]</sup>。

传统的调峰服务是基于机组本身或者网络本身的优化<sup>[6-7]</sup>, 而从市场机制角度考虑通过调峰促进风

电接纳的研究较少<sup>[8]</sup>。国内学者于 2005 年提出调峰权的概念<sup>[9]</sup>, 调峰权是一种向下调峰容量购买选择权。购买调峰权的一方, 有权在合同规定的期限内向售电方按照合同规定的容量和时段购买调峰容量, 并且按照约定的价格支付。作为辅助服务的市场化手段, 调峰权市场独立于发电权市场存在, 在电力市场中首先进行调峰权的交易, 确定每台机组的调峰容量, 再进行发电权交易。调峰权市场分为期货市场和现货市场<sup>[9]</sup>。

文献[10]考虑风电场风速随机性、风电场不同季节的特性和负荷波动性, 研究了风电接纳对系统调峰特性的影响。文献[11-12]研究了调峰权交易的现货市场和期货市场, 分别以降低环境成本和能耗成本为出发点, 证明了通过调峰权市场能够降低火电机组的环境成本和能耗, 提高机组参与调峰的积极性。文献[13]考虑了调峰权和需求管理的关系, 但需求管理只考虑了负荷还原, 没有对需求响应进行深入研究。文献[14]对燃煤机组调峰交易双方的效用进行了分析和建模, 提出了一种火电机组间的调峰权交易数学模型, 并且验证了调峰权交易具有降低全网发电成本的作用, 但其没有考虑网络潮流约束。

在以上文献研究的基础上, 本文借鉴调峰权交易机制, 将风电引入调峰权交易模型中, 提出风电参与调峰权交易的市场模式, 分析火电机组调峰权交易成本与风电场调峰权交易效益。综合考虑社会效益和风电再次接纳量最大, 建立了多目标的调峰权交易模型, 使用多目标粒子群优化算法进行求解。

## 1 风电参与调峰权市场模式及效用分析

### 1.1 风电参与调峰权交易的市场模式

负荷低谷时, 火电机组大多以最低出力运行, 由于风电的反调峰特性, 预测的风功率比计划接纳的功率多, 导致弃风。在负荷低谷时风电场可以借助

收稿日期: 2017-05-02; 修回日期: 2017-10-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51707040)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51707040)

调峰权市场,使弃风最大限度地降低,达到国家提倡多发满发的政策要求。

假设电网在日前运行调度中对风电场  $j$  在  $t$  时段计划接纳水平为  $P^{\text{receive}}$ , 本文把  $P^{\text{receive}}$  称为风电一次消纳水平,即根据现有风电消纳技术和电网运行状态实现的风电计划被接纳水平。当风电场  $j$  在  $t$  时段预测出力  $P^{\text{forecast}}$  大于电网一次消纳水平  $P^{\text{receive}}$  (即  $\Delta P = P^{\text{forecast}} - P^{\text{receive}} > 0$ ) 时,风电场  $j$  可能会弃风。对于可能的弃风功率  $\Delta P$ , 促进全部或部分  $\Delta P$  的消纳称为风电的再次消纳。

本文将风电引入调峰权交易中,提出风电参与调峰权交易的市场模式,以促进风电的再次消纳。已有的研究中,调峰权交易是在调峰能力强的火电机组与调峰能力差的火电机组之间进行。考虑风电参与的调峰权交易市场是在调峰能力强的火电机组与风电场之间进行。由于时间尺度越短风电预测准确度越高,所以风电场参与调峰权交易市场以小时前市场为主,风电场参与的调峰权交易市场模式如下。

#### a. 调峰权交易市场交易申报。

交易中心在小时前组织调峰权交易市场,各风电场按照确定性边际发电收益及预测偏差情况向交易中心申报调峰权交易价格和容量;各火电机组按边际调峰成本向交易中心申报调峰权交易价格和容量。另外,火电机组需上报爬坡能力、出力上下限等;风电场需上报下一时段电网对风电场计划接纳的风电功率、风电场的预测功率以及预测精度。

#### b. 交易计划的形成。

交易中心以社会效益最大、风电再次接纳最大为目标,进行交易配对,形成初步交易计划。然后将交易计划提交调度部门,调度部门考虑电网安全约束,对交易计划进行调整,修改反馈给交易中心,最终形成考虑安全约束的交易计划。

#### c. 交易清算。

形成最终的交易计划后,交易中心将修改后的交易计划下达给各火电机组和风电场,各机组按照该时段出清价格进行结算。在下一时段交易双方按照交易容量对机组出力进行调整,若下一时段风电场实际出力无法达到交易规定的发电容量,则需要调用辅助服务,产生的费用作为风电场的惩罚成本。

交易中心的出清方式可以选择撮合或者双边协商方式。撮合是按机组报价进行排序,风电场按照报价从高到低排序,火电机组按照报价从低到高排序,直到双方申报的调峰权交易容量有一方已经完全交易完毕。采用统一边际出清,按双方报价曲线交易完毕的最后一对交易的平均价格进行统一出清,得到调峰权出清价格。双边协商出清方式是火

电机组与风电场自行进行双边协商,一般采用交易双方报价的平均价格作为出清价格。

## 1.2 调峰权交易成本与效益分析

### 1.2.1 调峰权销售方调峰成本分析

调峰权的销售方为火电机组,由于调峰权交易,火电机组的出力将下降。出力下降对火电机组的影响主要有 3 个方面,火电机组参与调峰权交易的调峰成本也从这 3 个方面考虑:

a. 机组发电出力下降以后所造成的单位煤耗上升,单位发电成本增加,出力超过深度调峰时还需要增加投油燃烧的成本;

b. 机组出力变化过程中产生机械损耗,对机组寿命产生影响所增加的成本;

c. 机组因参与调峰权交易,不能按照计划发电所损失的发电收入。

调峰权交易旨在促使火电机组主动发挥自身的调峰潜力。由于深度调峰对火电机组损伤很大,在调峰权交易中,火电机组出售调峰权的数量是主动申报的,一般不会使自身出力下降至深度调峰状态。当机组不处于深度调峰状态时,出力变化过程产生的机械损耗成本相对燃煤成本很小且很难量化<sup>[14]</sup>,故本文暂忽略机械损耗成本,主要考虑出力改变所造成的发电成本变化和发电收入的损失。

火电机组出力调整是一个改变阀门大小的渐变过程,而不是跃变过程,所以发电成本的改变也是一个连续变化的过程。假设发电机组原出力为  $P_0$ ,调峰权交易下降的出力为  $P_C^*$ ,调峰权交易前后所产生的直接发电成本变化量为:

$$C_{S1} = \int_{P_0}^{P_0 - P_C^*} F'(P) dP = F(P_0 - P_C^*) - F(P_0) \quad (1)$$

$$F(P) = aP^2 + bP + c \quad (2)$$

其中,  $F(P)$  为机组的发电成本函数;  $F'(P)$  为火电机组的边际发电成本函数;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为发电机组的成本系数。

火电机组损失的发电收入为:

$$C_{S2} = \rho_C^{\text{BC}} P_C^* \quad (3)$$

其中,  $\rho_C^{\text{BC}}$  为火电机组的标杆电价。

调峰权交易销售方的调峰成本为:

$$C_S = C_{S2} + C_{S1} = \rho_C^{\text{BC}} P_C^* + [F(P_0 - P_C^*) - F(P_0)] \quad (4)$$

将式(4)左右两边同除以  $P_C^*$ , 并且令  $P_C^* \rightarrow 0$ , 即为机组的边际调峰成本:

$$\frac{\partial C_S}{\partial P_C^*} = \rho_C^{\text{BC}} - \lim_{P_C^* \rightarrow 0} \frac{F(P_0) - F(P_0 - P_C^*)}{P_C^*} = \rho_C^{\text{BC}} - C_{MS} \quad (5)$$

其中,  $C_{MS}$  为火电机组在出力为  $P_0$  时的边际发电成本。

如果  $\rho_C^{\text{BC}} > C_{MS}$ , 则火电机组的边际调峰成本大于 0, 为了在调峰权交易中受益, 火电机组调峰权交易报价底线应大于或等于边际调峰成本。

### 1.2.2 调峰权交易购买方效益分析

风电场购买调峰权后,所获得的收益与成本分析如下。

**a. 风电场发电收益增加。**风电场通过调峰权交易提升了电网对其再次接纳水平,风电场发电量增加,从而使发电收益增加。增加的发电收益等于风电场再次被接纳的发电量收入与发电成本之差<sup>[15]</sup>。

**b. 辅助服务成本增加。**若交易时段风电场实际出力无法达到调峰权交易规定的发电容量,则需要调用辅助服务,从而产生额外的交易成本,主要是购买旋转备用的成本。该成本和风电预测偏差有关,研究表明实际风电预测误差服从一定的概率分布<sup>[16]</sup>,因此备用成本为一个随机变量,本文称为不确定性的惩罚成本。

根据以上分析,风电参与调峰权交易效益由确定性的边际发电收益和不确定性的惩罚成本两部分构成。以下对这两部分分别进行推导。

#### a. 确定性的边际发电收益。

设风电机组购买调峰权之前的电网计划接纳风电场发电出力为  $P^{\text{receive}}$ ,但风电场预测出力  $P^{\text{forecast}}$  大于计划被接纳出力,风电场为了减少弃风,拟向火电机组购买调峰权容量  $P_{\text{W}}^*$ ,所得的发电收益增加值为:

$$C_{\text{BI}} = \rho_{\text{W}}^{\text{BC}} P_{\text{W}}^* - C_{\text{MB}} P_{\text{W}}^* \quad (6)$$

其中,  $\rho_{\text{W}}^{\text{BC}}$  为风电机组的标杆电价;  $C_{\text{MB}}$  为风电单位发电成本<sup>[15]</sup>。

风电场的确定性边际发电收益为:

$$\frac{\partial C_{\text{BI}}}{\partial P_{\text{W}}^*} = \rho_{\text{W}}^{\text{BC}} - C_{\text{MB}} \quad (7)$$

#### b. 不确定性的惩罚成本。

在常规的系统规划备用问题中,风电场实际出力与预测不同时,需要调用上下旋转备用,利用备用价格惩罚促使风电场能主动提高自身的预测精度。调峰权交易市场则不同,因为调峰权交易的前提是低谷调峰,在系统调峰压力很大的情况下,以市场的形式激励火电机组进行更深度调峰,促进风电再次接纳。购买下旋转备用会使系统调峰压力加剧,违背调峰权交易的初衷,所以不考虑风电场在出力盈余时购买下旋转备用,即风电场实际出力超过交易申报容量则弃风。若实际风电出力不能达到申报交易容量,需购买上旋转备用。因此,定义风电场惩罚成本为风电场申报交易容量确定的情况下,实际风电出力不足所需购买上旋转备用的成本。惩罚成本推导过程如下。

调峰权可交易风电容量为:

$$P_{\text{reality}}^{\text{receive}} = P^{\text{forecast}} - P^{\text{receive}} + \Delta P_{\text{F}} \quad (8)$$

其中,  $P_{\text{reality}}^{\text{receive}}$  为风电场调峰权可交易容量;  $\Delta P_{\text{F}}$  为风电场预测误差,假设其服从  $N(0, \sigma^2)$ 。

$P^{\text{forecast}}$  和  $P^{\text{receive}}$  是已知的,由式(8)可知  $P_{\text{reality}}^{\text{receive}}$  服从  $N(\mu_1, \sigma^2)$ ,其中  $\mu_1 = P^{\text{forecast}} - P^{\text{receive}}$ 。

惩罚成本为:

$$C_{\text{P}} = C_{\text{m}} \Delta P_{\text{W}} \quad (9)$$

$$\Delta P_{\text{W}} = \begin{cases} 0 & P^{\text{buy}} - P_{\text{reality}}^{\text{receive}} \leq 0 \\ P^{\text{buy}} - P_{\text{reality}}^{\text{receive}} & P^{\text{buy}} - P_{\text{reality}}^{\text{receive}} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $C_{\text{P}}$  为风电场的惩罚成本;  $C_{\text{m}}$  为上旋转备用价格;  $\Delta P_{\text{W}}$  为需要购买的上旋转备用容量;  $P^{\text{buy}}$  为风电场调峰权交易成交容量,即风电场再次被电网接纳的容量。

$\Delta P_{\text{W}}$  的概率分布为:

$$F(\Delta P_{\text{W}}) = \int_{-\infty}^{P^{\text{buy}}} f(P_{\text{reality}}^{\text{receive}}) dP_{\text{reality}}^{\text{receive}} + \int_{P^{\text{buy}}}^{+\infty} 0 dP_{\text{reality}}^{\text{receive}} = \Phi\left(\frac{P^{\text{buy}} - \mu_1}{\sigma}\right) \quad (11)$$

其中,  $f(P_{\text{reality}}^{\text{receive}})$  为  $P_{\text{reality}}^{\text{receive}}$  的概率密度函数;  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布的分布函数。

由式(11)可知,  $\Delta P_{\text{W}}$  服从  $N(\mu_1, \sigma^2)$ 。由式(9)可知,当  $C_{\text{m}}$  为常数时,  $C_{\text{P}}$  的概率分布与  $\Delta P_{\text{W}}$  相同,  $C_{\text{P}}$  服从  $N(C_{\text{m}}\mu_1, (C_{\text{m}}\sigma)^2)$ 。

#### c. 风电场参与调峰权交易的效益。

风电场参与调峰权交易的效益为:

$$C_{\text{B}} = C_{\text{BI}} - C_{\text{P}} = (\rho_{\text{W}}^{\text{BC}} - C_{\text{MB}}) P_{\text{W}}^* - C_{\text{P}} \quad (12)$$

其中,  $C_{\text{B}}$  为风电场参与调峰权交易的效益。

从式(12)可以看出,风电场参与调峰权交易,通过增加自身再次接纳的容量发电获得收益,同时还要承担风电随机性造成的惩罚。风电场在调峰权交易中,报价上限为确定性边际发电收益,并且需要对不确定性成本部分进行考虑,才能在调峰权交易中获益。

## 2 调峰权交易促进风电接纳模型

典型的以社会效益最大化的双边拍卖市场交易模型如下<sup>[14,17]</sup>:

$$\max \sum_{j=1}^{M_{\text{B}}} \rho_{\text{Bj}}^{\text{bid}} P_j^{\text{buy}} - \sum_{i=1}^{M_{\text{S}}} \rho_{\text{Si}}^{\text{bid}} P_i^{\text{sell}} \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{M_{\text{B}}} P_j^{\text{buy}} = \sum_{i=1}^{M_{\text{S}}} P_i^{\text{sell}} \quad (14)$$

$$0 \leq P_j^{\text{buy}} \leq P_j^{\text{bid}} \quad (15)$$

$$0 \leq P_i^{\text{sell}} \leq P_i^{\text{bid}} \quad (16)$$

其中,  $P_j^{\text{buy}}$ 、 $P_i^{\text{sell}}$  分别为买方  $j$ 、卖方  $i$  成交的交易量;  $\rho_{\text{Bj}}^{\text{bid}}$ 、 $\rho_{\text{Si}}^{\text{bid}}$  分别为买方  $j$ 、卖方  $i$  的报价;  $P_j^{\text{bid}}$ 、 $P_i^{\text{bid}}$  分别为买方  $j$ 、卖方  $i$  申报的交易量;  $M_{\text{B}}$  和  $M_{\text{S}}$  分别为买方和卖方的个数。

式(13)~(16)拍卖模型的目的是使社会效益最大化,文献[14]在此基础上深入探究了调峰权交易双方的调峰效用,但仅考虑火电机组间的调峰权交易。本文将风电引入调峰权交易中,针对风电出力的

不确定性,在社会效益中考虑风电出力随机性变化对交易产生的影响,以科学评估风火调峰权交易实际产生的社会效益。在完全竞争市场下,交易双方若根据边际成本或边际效用报价,将达到社会效益最大化。因此,本文根据确定性的火电厂边际调峰成本(式(5))和确定性的风电场调峰边际发电效用(式(7)),考虑风电不确定性的惩罚成本(式(9)–(11)),可得到基于社会效益最大化的风火调峰权交易目标如式(17)所示。

目标函数 1:社会效益最大。

$$\begin{aligned} \Pi = & \max \sum_{j=1}^{W_B} [(\rho_{W_j}^{BC} - C_{MBj})P_j^{buy} - C_{Pj}] - \\ & \sum_{i=1}^{G_S} [(\rho_{G_i}^{BC} - C_{MSi})P_i^{sell}] \end{aligned} \quad (17)$$

其中,  $C_{MBj}$ 、 $C_{MSi}$  分别为风电场  $j$  的单位发电成本和火电机组  $i$  的边际发电成本;  $W_B$  为风电场的数量;  $G_S$  为火电机组的数量;  $\rho_{W_j}^{BC}$ 、 $\rho_{G_i}^{BC}$  分别为风电场  $j$ 、火电机组  $i$  的标杆电价;  $C_{Pj}$  为风电场  $j$  的惩罚成本。

式(17)中等号右边第一部分表示风电参与调峰权交易的效益,为发电收益与调用上旋转备用的成本之差;第二部分为火电机组参与调峰权交易的成本。风电功率预测偏差使得惩罚成本很难精确估计,从而社会效益也很难精确估计,因此本文采用期望社会效益作为社会效益的估计值,即:

$$\begin{aligned} E(\Pi) = & \max \sum_{j=1}^{W_B} [(\rho_{W_j}^{BC} - C_{MBj})P_j^{buy} - E(C_{Pj})] - \\ & \sum_{i=1}^{G_S} [(\rho_{G_i}^{BC} - C_{MSi})P_i^{sell}] \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $E(\Pi)$  为调峰权交易期望社会效益;  $E(C_{Pj})$  为风电场  $j$  期望的惩罚成本。

目标函数 1 从经济效益的角度优化调峰权交易;另外,本文从再生能源消纳最大化的角度出发优化资源配置,增加目标函数 2,如式(19)所示。这 2 个目标相辅相成,既保证调峰权交易的社会效益,调动参与者的积极性,同时也为可再生能源的充分消纳提供支持。

$$\max \sum_{j=1}^{W_B} P_j^{buy} \text{ 或 } \max \sum_{i=1}^{G_S} P_i^{sell} \quad (19)$$

约束条件如下。

a. 买卖双方交易容量约束:

$$\sum_{j=1}^{W_B} P_j^{buy} = \sum_{i=1}^{G_S} P_i^{sell} \quad (20)$$

b. 卖方交易容量约束:

$$0 \leq P_i^{sell} \leq P_i^{bid} \quad (21)$$

c. 买方交易容量约束:

$$0 \leq P_j^{buy} \leq P_j^{bid} \quad (22)$$

d. 潮流约束:

$$|P_l| \leq P_{L,max} \quad l=1,2,\dots,L \quad (23)$$

e. 火电机组爬坡约束:

$$\begin{cases} P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta P_{i,down} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_{i,up} \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $P_l$  为支路  $l$  的有功潮流功率;  $P_{l,max}$  为对应的上限值;  $L$  为支路总数;  $P_{i,t-1}$ 、 $P_{i,t}$  分别为火电机组  $i$  在  $t-1$  时段和  $t$  时段的出力;  $\Delta P_{i,up}$  和  $\Delta P_{i,down}$  分别为火电机组  $i$  的上、下坡限制。

### 3 基于多目标粒子群优化算法的调峰权交易求解

多目标问题中,多个目标函数彼此可能是互相冲突的,一个解对于某个目标函数可能是较好的,而对于其他目标函数可能是较差的,这样就存在一个折中解的集合,称为 Pareto 最优解或者非支配解集,所有 Pareto 最优解组成的曲面称为 Pareto 前沿,该前沿能为决策制定者提供有价值的折中信息。决策者能根据决策意愿和市场导向,利用理想点法或模糊隶属度法或交互式方法<sup>[18]</sup>,从中挑选出某一个折中解,得到确定的交易结果。

针对调峰权交易,本文采用基于 Pareto 最优的多目标粒子群优化算法。粒子群的单个粒子设计为  $m \times n$  维,其中  $m$  为调峰权出售方的个数,  $n$  为调峰权购买方的个数,则矩阵中的元素为第  $i$  个调峰权购买方和第  $j$  个调峰权方所交易的容量,每行的和为第  $i$  个购买方的总购容量,每列的和为第  $j$  个出售方的总售容量,需要满足其所申报容量上限的限制,如图 1 所示。

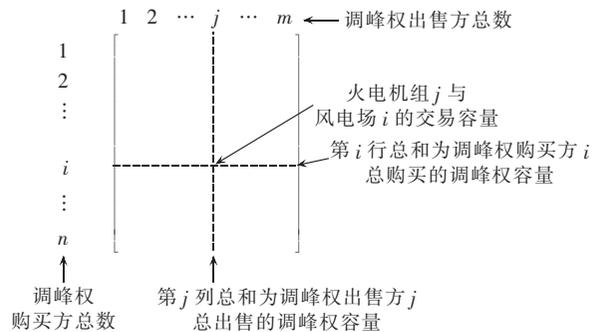


图 1 粒子设计示意图

Fig.1 Schematic diagram of particle design

基于多目标粒子群优化算法的流程如图 2 所示,图中  $z_{best}$  为个体最优值,  $g_{best}$  为全局最优值。

### 4 算例分析

#### 4.1 系统参数设置

算例选取 IEEE 14 节点 5 机系统,设火电机组的标杆电价为 60 \$/(MW·h),风电场的标杆电价为 100 \$/(MW·h),在节点 2、3、6、8 分别增加 4 台火电机组出售调峰权,在节点 12 接入容量为 100 MW 的

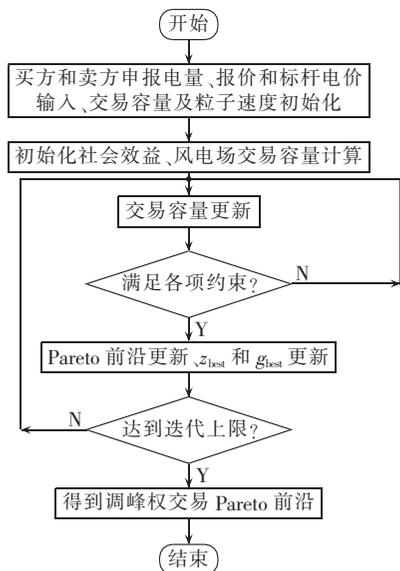


图 2 多目标粒子群优化算法流程图

Fig.2 Flowchart of multi-objective particle swarm optimization algorithm

风电场,火电机组数据部分采用文献[19]中的数据,如表 1 所示。 $P_{\text{forecast}}=61.3 \text{ MW}$ ,  $P_{\text{receive}}=52 \text{ MW}$ ,  $\sigma=5\%$ ,  $C_{\text{MB}}$  采用文献[15]中的数据,取  $61.5 \text{ \$/ (MW}\cdot\text{h)}$ ,  $C_p=30 \text{ \$/ (MW}\cdot\text{h)}$ 。采用 Monte-Carlo 模拟 10000 个实际风电出力偏差。所有火电机组的  $\Delta P_{\text{up}}$  和  $\Delta P_{\text{down}}$  取  $90 \text{ MW/h}$ 。

表 1 火电机组参数

Table 1 Parameters of thermal units

节点	机组容量/MW	计划出力/MW	$a/[\text{\$}\cdot(\text{MW}^2\cdot\text{h})^{-1}]$	$b/[\text{\$}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}]$	$c/[\text{\$}\cdot\text{h}^{-1}]$
2	40	30	0.0211	36.3278	0
3	60	50	0.0280	40.3965	0
6	80	60	0.0354	38.3055	0
8	40	30	0.0179	38.2704	0

粒子群优化算法的种群规模为 300, 迭代次数为 300。

风电场和火电机组申报容量,火电机组根据边际调峰成本报价,风电场根据边际发电收益报价。由式(5)和式(7)得到的火电机组和风电场报价见表 2。

表 2 各机组申报调峰权交易容量和报价

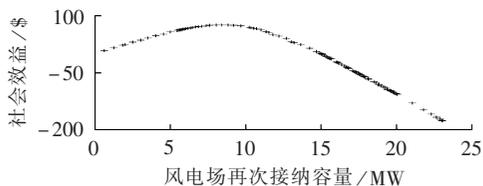
Table 2 Trading capacity and quotation of peak regulation right trading for each unit

节点	调峰权交易容量/MW	边际发电成本 (风电单位发电成本)/ $[\text{\$}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}]$	边际调峰成本 (边际发电收益)/ $[\text{\$}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1}]$
2	10	36.96	23.03
3	10	41.80	18.20
6	5	40.43	19.57
8	5	38.81	21.19
12	23	61.50	38.50

#### 4.2 算例结果分析

根据式(17)–(24),以 1 h 为考察期,基于上述

参数,采用多目标粒子群优化算法得到调峰权交易社会效益和风电场再次接纳容量变化的曲线如图 3 所示。

图 3 风电场再次接纳容量和社会效益的 Pareto 前沿  
Fig.3 Pareto front of second accommodation of wind power and social benefit

从图 3 中可以看出,社会效益曲线先增大后减小。因为随着风电场再次接纳容量增大,风电场社会效益增加,但惩罚成本也随之增加,因此有一个达到社会效益最大的交易容量。此时风电再次接纳容量为  $8.46 \text{ MW}$ ,即调峰权交易使风电接纳增加了  $8.46 \text{ MW}$ ,产生的社会效益为  $\$74.57$ 。

根据式(17),调峰权交易社会效益可分为两部分,一部分是风电场发电收益与火电机组调峰成本之差,另一部分是惩罚成本,这两部分的差值为社会效益,如图 4 中的  $AB$  段( $\sigma=5\%$ )所示。从图 4 中可以看出,风电场发电收益与火电机组调峰成本之差的增长速率不变,惩罚成本的增长速率不断增加,当二者速率相同即风电场再次接纳量为  $P_1$ ( $\sigma=5\%$ )时,达到社会效益最大。在 2 条线的交点  $E$  上,社会效益为  $0$ ( $\sigma=5\%$ )。

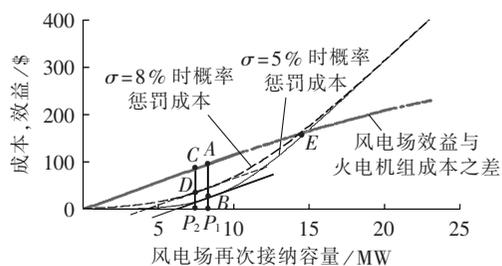


图 4 社会效益两部分之间的关系

Fig.4 Relationship between two parts of social benefits

#### 4.3 调峰权交易模型参数对风电再次接纳影响分析

为更好地分析调峰权交易模型中参数设置对风电再次接纳及社会效益产生的影响,对风电预测误差  $\sigma$ 、上旋转备用价格、电网计划接纳风电场容量、风电场和火电厂标杆电价进行分析。分析结果如图 5—9 所示。

风电预测误差  $\sigma$  对 Pareto 前沿的影响如图 5 所示,从图 5 中可以看出, $\sigma$  增大对 Pareto 前沿的影响如下。

a. Pareto 前沿整体向左下方移动,达到社会效益最大的风电场再次接纳容量逐渐降低。图 4 中  $\sigma=8\%$  时惩罚成本变化曲线对应的最大社会效益为  $CD$

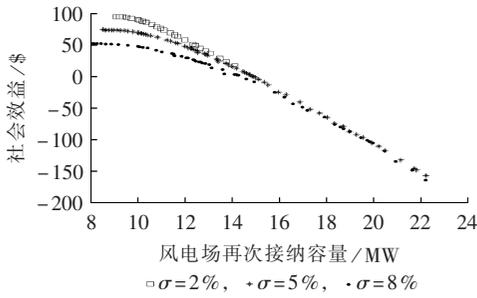


图 5 风电预测误差  $\sigma$  对 Pareto 前沿的影响  
Fig.5 Impact of wind power prediction error  $\sigma$  on Pareto front

段,相应的风电场再次接纳容量为  $P_2$ ,易知  $P_2 < P_1$ ,所以随着  $\sigma$  增大,Pareto 前沿向左移。

b. 风电场再次接纳容量范围逐渐增大。因为  $\sigma$  越大,代表风电预测精度越低,估计参与调峰权交易容量越不准确,产生惩罚的概率越高,社会效益越小,所以 Pareto 前沿下移,并且范围增大。

c. 在风电场再次接纳容量达到一定数值时, $\sigma$  增大对 Pareto 前沿影响很小。由 1.2.2 节可知, $C_p$  的概率分布与  $\Delta P_w$  相同。图 6 为  $\sigma$  改变对  $\Delta P_w$  的概率分布的影响。可以看出  $\Delta P_w > 18$  MW 以后,不管  $\sigma$  取图中何值, $\Delta P_w$  概率和大小基本一样,此时惩罚成本的数值也基本一致,所以不同  $\sigma$  对惩罚成本的影响很小。因此,当风电再次接纳容量大于 18 MW 时, $\sigma$  增大对 Pareto 前沿的影响很小。

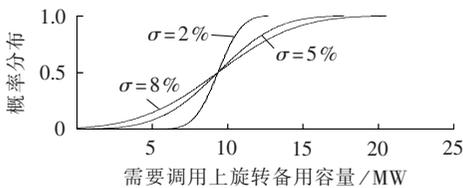


图 6  $\sigma$  对上旋转备用容量调用概率分布的影响  
Fig.6 Impact of  $\sigma$  on probability distribution of spinning reserve dispatch

上旋转备用价格对 Pareto 前沿的影响如图 7 所示,从图中可以看出,随着上旋转备用价格的增加,Pareto 前沿整体向左下方移动,并且降低的斜率逐渐变大。因为上旋转备用价格是惩罚成本的系数,改变

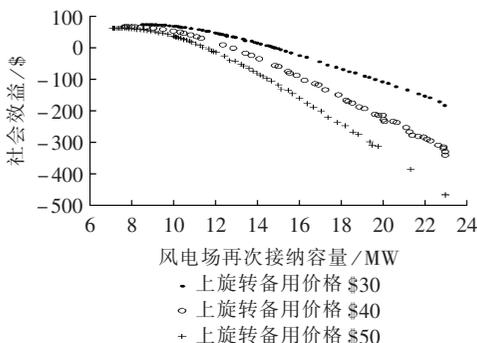


图 7 上旋转备用价格对 Pareto 前沿的影响  
Fig.7 Impact of spinning reserve price on Pareto front

上旋转备用价格,会同时改变惩罚成本的均值和方差,所以上旋转备用价格的增加使惩罚费用的增长速率增加,斜率增加,并且达到社会效益最大时的风电再次接纳容量也逐渐降低。

图 8 为计划风电接纳容量对 Pareto 前沿的影响,从图中可以看出,随着电网对风电场计划接纳容量增加,Pareto 前沿整体向左下方移动,达到社会效益最大的风电场再次接纳容量也减少了。因为随着电网对风电场计划接纳容量的增加,需要参与调峰权交易的风电容量减少,风电场与火电机组效益之差减小,社会效益降低。

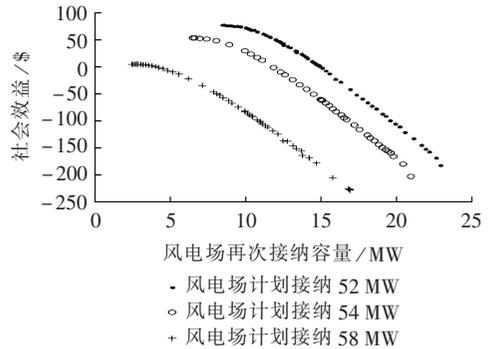


图 8 计划接纳风电容量对 Pareto 前沿影响  
Fig.8 Impact of planned wind power accommodation capacity on Pareto front

风电场和火电机组标杆电价对 Pareto 前沿的影响如图 9 所示,从图中可以看出,随着风电场与火电机组标杆电价差增大,Pareto 前沿整体向右上方移动,当风电场与火电机组的标杆电价改变的差值相同时,Pareto 前沿不变。因为在惩罚成本不变的情况下,社会效益中风电场效益与火电机组成本之差等于每个交易对的风电场效益与火电机组  $i$  的成本之差的总和。在每个交易对的社会效益中,如果火电机组的边际发电成本和风电场的单位发电成本不变,风电场效益与火电机组成本之差的增长速率将取决于风电场和火电机组的标杆电价差,差值越大,增长速率越快,差值一样时,增长速率相同。

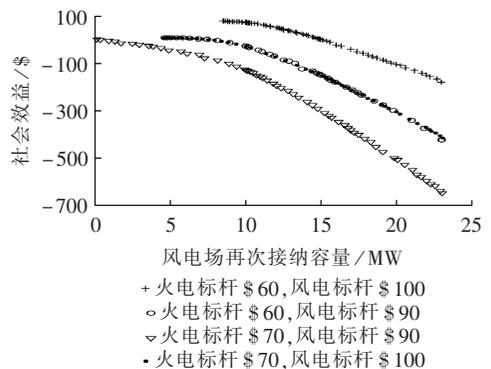


图 9 风电和火电标杆电价对 Pareto 前沿的影响  
Fig.9 Impact of benchmark prices of wind power and thermal units on Pareto front

## 5 结论

随着我国电力市场化改革的稳步前进,进行调峰方面的市场化研究对促进风电接纳有重大的意义。为了促进风电的接纳,本文将风电引入调峰权交易模型中,主要的研究工作和结论如下。

**a.** 提出风电参与调峰权交易的市场模式。并对调峰权交易中火电机组的调峰成本与风电场的调峰效益进行分析,考虑风电不确定性,推导了风电场惩罚成本。

**b.** 考虑社会效益和风电场再次接纳容量,建立了火电机组与风电场的多目标调峰权交易模型。使用多目标粒子群优化算法进行求解,算例证明调峰权交易有利于风电再次接纳容量和社会效益增加。

**c.** 对调峰权交易模型影响因素进行分析。得出风电预测误差、上旋转备用价格、电网计划接纳风电场容量和风电场与火电机组标杆电价都会对风火调峰权交易的 Pareto 前沿产生不同的影响,从而对风电再次接纳的容量产生影响。交易中心可以根据需要对调峰市场进行设计,促进风电接纳的同时兼顾风电场和火电机组双方的效益。

### 参考文献:

- [1] 国家发展改革委员会,国家能源局. 关于改善电力运行、调节促进清洁能源多发满发的指导意见[Z]. 2015-03-23.
- [2] 国家发展改革委员会,国家能源局. 关于有序放开发用电计划的实施意见[Z]. 2015-11-30.
- [3] 江岳文,温步瀛. 从调度模式经济性角度评估电网风电出力接纳能力[J]. 电工电能新技术,2014,33(4):54-60.  
JIANG Yuewen,WEN Buyang. Evaluation of acceptance of wind power capacity in grid from economy of dispatching model[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014,33(4):54-60.
- [4] 朱凌志,陈宁,韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):29-34.  
ZHU Lingzhi,CHEN Ning,HAN Hualing. Key problems and solutions of wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(22):29-34.
- [5] MOHSENI M,ISLAM S M. Review of international grid codes for wind power integration:diversity,technology and a case for global standard[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012,16(6):3876-3890.
- [6] 刘德伟,黄越辉,王伟胜,等. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):77-81.  
LIU Dewei,HUANG Yuehui,WANG Weisheng,et al. Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(25):77-81.
- [7] 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.
- [8] 吕泉,李玲,王海霞,等. 配置储热的热电厂与风电场的调峰定价机制[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):118-124.  
LÜ Quan,LI Ling,WANG Haixia,et al. Peak regulation pricing mechanism between CHP-plant with heat accumulator and wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(9):118-124.
- [9] 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 Wenyong. Peak regulation right and the corresponding transaction mechanism in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):88-92.
- [10] 姜欣,陈红坤,向铁元,等. 考虑调峰特性的电网风电接入能力分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):13-18,25.  
JIANG Xin,CHEN Hongkun,XIANG Tiejuan,et al. Wind power penetration capacity considering peak regulation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):13-18,25.
- [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] 徐辰婧,黄民翔,柯人观. 考虑节能减排效益的调峰权交易研究[J]. 华东电力,2014,42(2):236-239.  
XU Chenjing,HUANG Minxiang,KE Renguan. Peak regulation right transaction considering energy saving and emission reduction[J]. East China Electric Power,2014,42(2):236-239.
- [13] 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.
- [14] 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):134-138,175.  
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):134-138,175.
- [15] 程秋琳. 基于价值链的风力发电企业成本分析研究[D]. 保定:华北电力大学,2014.  
CHENG Qiulin. Research on cost analysis of wind power generation enterprises based on value chain[D]. Baoding:North China Electric Power University,2014.
- [16] WU J,ZHANG B,DENG W,et al. Application of cost-CVaR model in determining optimal spinning reserve for wind power penetrated system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2015,66:110-115.
- [17] 黎灿兵,康重庆,夏清,等. 发电权交易及其机理分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(6):13-18.  
LI Canbing,KANG Chongqing,XIA Qing,et al. Generation rights trade and its mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(6):13-18.
- [18] LIN Y K,YEH C T. Multi-objective optimization for stochastic computer networks using NSGA-II and TOPSIS[J]. European

Journal of Operational Research,2012,218(3):735-746.

[19] 孙元章,吴俊,李国杰,等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):41-47.

SUN Yuanzhang,WU Jun,LI Guojie,et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):41-47.

作者简介:



江岳文

江岳文(1977—),女,湖南岳阳人,副教授,博士,主要研究方向为风电并网优化运行、电力系统优化运行(E-mail:jiangyuewen2008@163.com);

张艺渊(1991—),男,福建漳浦人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场和电力系统优化运行(E-mail:122766802@qq.com)。

## Peak regulation right trading between wind farm and thermal unit for second accommodation of wind power

JIANG Yuewen,ZHANG Yiyuan

(College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350116,China)

**Abstract:** The lack of system peak regulation capacity causes large-scale wind power curtailment at the load valley,which becomes one of the main reasons for limiting wind acceptance level. The peak regulation right trading can motivate the peak regulation potential of thermal units,which increases the second accommodation of wind power. The wind power is introduced into the peak regulation right trading model and the market mode of wind power participating in peak regulation right trading is proposed. The benefits of wind farms and costs of thermal units in the peak regulation right trading are analyzed,and a peak regulation right trading model is established,which takes maximum social benefit and maximum second acceptance capacity of wind power as its multi-objectives ,and solved by MOPSO (Multi-Objective Particle Swarm Optimization) algorithm. Simulative results of IEEE 14-bus test system verify the effectiveness of the proposed model.

**Key words:** second accommodation of wind power; social benefit; peak regulation right trading between wind farm and thermal unit; MOPSO algorithm; wind power; models

(上接第 13 页 continued from page 13)

## LVRT of DFIG with FCL based on analytical expression of fault current

LI Shenghu,HUANG Jiejie,WU Zhengyang

(School of Electrical Engineering and Automation,Hefei University of Technology,Hefei 230009,China)

**Abstract:** When FCL(Fault Current Limiter) is put in between DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) and PCC(Point of Common Coupling) to achieve the function of LVRT(Low Voltage Ride Through),the stator voltage cannot be set due to the influence of FCL impedance and GSC(Grid Side Converter) current,so a holistic model of DFIG and FCL is needed to analyze the fault current. The currents of RSC(Rotor Side Converter) and GSC are deduced based on constant current control strategy,and the analytical expression of DFIG fault current is proposed. Since the stator phase angle oscillation under voltage orientation will cause the constant currents of  $d-q$  reference frame change under  $x-y$  reference frame,which is unfavorable for the stabilization of stator current,the orientation scheme with coincidence of  $d-q$  reference frame and  $x-y$  reference frame is adopted. The electromagnetic torque oscillation in the process of DFIG LVRT is compared for different current references of RSC and GSC,FCL impedances and tripping time,and the control parameter set with better LVRT performance is selected. Simulative results show that the selection of FCL impedance is influenced by RSC and GSC current reference,and the selected tripping time becomes shorter along with the larger of FCL impedance.

**Key words:** DFIG; FCL; constant current control; analytical expression; selection of control parameter