

考虑发电商差异与奖惩的增强型可再生能源配额制设计与仿真

赵文会¹, 王上佳¹, 侯健生², 王辉¹

(1. 上海电力大学 经济与管理学院, 上海 200090; 2. 国网金华供电公司 经济技术研究所, 金华 321016)

摘要: 我国可再生能源配额制经历了从发电侧向售配电侧的转变, 这种转变是否有利于构建新型电力系统, 如何进一步优化该模式? 为解决这些问题, 分别建立了不同责任主体的配额制模型, 分析了多种情景下市场价格和收益的变化情况, 并设计了一种计及发电商差异、考虑奖惩的增强型配额制。构建了用于反映不同发电商绿色证书获取数量的综合评价指标, 并通过衡量当期配额目标的完成情况对售电商给予惩罚与奖励。建立了博弈模型并采用逆向归纳法进行仿真, 结果表明: 售配电侧配额制优于发电侧配额制, 增强型配额制的奖惩政策存在壁垒, 但合理设置可以促进可再生能源消纳, 实现良性发展。

关键词: 可再生能源配额制; 可再生能源消纳; 电力市场; 绿色证书; 新型电力系统

中图分类号: TM 744 **文献标志码:** A

Design and simulation of an enhanced renewable portfolio standard considering generator differences and incentives or penalties

ZHAO Wenhui¹, WANG Shangjia¹, HOU Jiansheng², WANG Hui¹

(1. School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Economic and Technical Research Institute, State Grid Jinhua Power Supply Company, Jinhua 321016, China)

Abstract: China's renewable portfolio standards (RPS) has experienced a shift from the generation side to the sales and distribution side. Is this shift conducive to build novel power system and how to further optimize this model? To address these issues, a RPS model for different responsible entities was developed. The changes of market prices and revenues under various scenarios were analyzed. An enhanced RPS system that accounts for generator differences and considers incentives and penalties was designed. The evaluation index was constructed to reflect the number of tradable green certificate (TGC) acquired by different generators. The completion of the RPS target was measured to penalize or reward the electricity sellers. A game model was developed and simulated by using the inverse induction method. The results show that the RPS system on the sales and distribution side is better than the system on the generation side. Although there are barriers to the incentive and penalty policies of the enhanced quota system, reasonable settings can promote renewable energy consumption and achieve benign

development.

Keywords: *renewable portfolio standards; renewable energy consumption; electricity market; tradable green certificate; novel power system*

随着气候变化的日益加剧和化石燃料的短缺, 构建以可再生能源 (renewable energy, RE) 为基础的新型电力系统, 已成为世界范围内的普遍目标^[1]。作为世界最大的能源消费国, 中国已承诺在 2030 年前实现碳排放达峰, 并争取 2060 年前实现碳中和^[2]。发电行业作为全国碳排放量中占比最高的行业, 在“30·60”目标下尤为值得关注^[3]。2019 年 5 月, 国家发改委发布了《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》, 其标志着中国可再生能源配额制 (renewable portfolio standards, RPS) 的正式实施^[4]。但与欧美国家相对成熟的可再生能源政策相比, 我国政策仍处于初级阶段, 无法满足可再生能源发展的需求。因此亟需细化现行配额制, 从售配电侧提高可再生能源消纳意愿, 为顺利实现发电行业碳达峰奠定基础^[5]。

在此背景下, 实现发电行业由传统化石能源电力向可再生能源电力转变, 是目前实现发电行业碳中和的主要研究方向之一。为了解决于此带来的可再生能源消纳问题, 配额制与绿色证书交易机制 (tradable green certificate, TGC) 作为发电行业的主要政策工具, 成为国内外学者的研究焦点。王强等^[5]从绿证价格形成机理入手, 设计并完善了我国的绿证交易机制; Bao 等^[3]认为, 绿色证书机制存在固有弊端, 会使资金和技术向低成本的可再生能源类型倾斜, 导致高成本的可再生能源如光伏将陷入发展停滞的状态; Zhao 等^[6]强调, 绿证市场会对绿证需求侧产生影响, 进而增加化石能源发电商的利润。Zhang 等^[7]认为, 更高的配额比率可以增加可再生能源的份额, 减少碳排放, 进而增加社会福利。

通过回顾现有文献, 发现其鲜有对不同配额主体下的 RPS 政策做出对比, 大多数文章只是分析了单一配额主体下 RPS 与其他政策的配合问题, 并没有分析不同配额主体的选用对我国电力系统发展的影响。本文在先前研究的基础上有如下创新:

a. 分别构建了发电侧与售配电侧配额制模型, 分析了两者的我国可再生能源消纳以及电力价格的影响;

b. 设计了可再生能源发电商 (renewable energy sources, RES) 评价体系, 该体系反映了发电技术带来的度电成本差异, 将发电商的综合评分与绿证核发数量挂钩, 提高了绿证核发的科学性;

c. 在计及发电商差异的基础上, 设计了一种考虑奖惩的增强型可再生能源配额制, 并就奖惩参数对配额责任主体收益的影响进行了分析。

1 可再生能源配额制模型设计

1.1 模型假设

a. 假设市场中存在 m 个化石能源发电商、 n 个可再生能源发电商以及 l 个售电商。其中, 可再生能源发电商包括风力发电与集中式光伏发电, 售电商主要指电网公司。

b. 假设售电商在售配电市场上供给给用户的电价值为统一值 p' 。

c. 绿证在市场中发放、回收、价格都将受到政府管制, 价格假设为低于政府补贴的固定值 p_g 。

d. 假设可再生能源发电商与化石能源发电商发电成本为

$$C_{g,i} = a_{g,i}Q_{g,i}^2 + b_{g,i}Q_{g,i} + c_{g,i} \quad (1)$$

$$C_{c,j} = a_{c,j}Q_{c,j}^2 + b_{c,j}Q_{c,j} + c_{c,j} \quad (2)$$

式中: $C_{g,i}$, $C_{c,j}$ 分别为可再生能源发电商与化石能源发电商的发电成本函数; $a_{g,i}$, $b_{g,i}$ 为可再生能源发电商二次项与一次项的成本系数; $a_{c,j}$, $b_{c,j}$ 分别为化石能源发电商二次项与一次项的成本系数; $c_{g,i}$, $c_{c,j}$ 分别为可再生能源发电商与化石能源发电商的固定成本; $Q_{g,i}$, $Q_{c,j}$ 分别为可再生能源发电商与化石能源发电商的发电量。

e. 假设全国有统一的电力交易市场, 市场参与主体为可再生能源发电商 i 、化石能源发电商 j 以及售电商 k 。市场通过供需关系决定交易的电价 p 与交易电量 Q 。在一个交易周期内, 市场电价将由反需求函数唯一确定^[8], 表达式为

$$p = U - vQ = U - v \left(\sum_{i=1}^m Q_{g,i} + \sum_{j=1}^n Q_{c,j} \right) \quad (3)$$

式中， U, v 为反需求函数参数，且均大于0。

1.2 区分发电商个体的绿证核发与评价模型

绿色证书是对可再生能源发电商发出电量进行确认的一种指标，现阶段国内外RPS对于绿证核发的标准基本为1 MWh可再生能源电力兑换1张绿证，事实上这种标准并不能反应RPS之间的差异性以及不同发电技术带来的度电成本差异。本节以陆上风电与集中光伏为基础，制定了衡量发电商经济与技术水平的综合评价指标，并使用熵权法确定不同指标的评价权重，最终得到系统中每个发电商的综合得分，该得分可以衡量发电商在发电环节中应得的绿证数量。

1.2.1 可再生能源发电商评价指标

RES评价指标定义如表1所示。其中，经济指标用于衡量可再生能源发电商的生产效益与成本，技术指标用于衡量发电商的发电电能质量。

表1 可再生能源发电商综合评价指标

Tab.1 Comprehensive evaluation metrics of RES

一级指标	二级指标	陆上风电	集中光伏
经济指标	营收指标 S_1	$S_1^w = \frac{Q_w}{A_w}$	$S_1^u = \frac{Q_u}{A_u}$
	成本指标 S_2	$S_2^w = \frac{R_w}{A_w}$	$S_2^u = \frac{R_u}{A_u}$
	利润率 S_3	$S_3^w = \frac{I_w}{C_w}$	$S_3^u = \frac{I_u}{C_u}$
技术指标	日出力率 S_4	$S_4^w = \frac{P_{w,av}}{P_{w,max}}$	$S_4^u = \frac{P_{u,av}}{P_{u,max}}$
	日峰谷率 S_5	$S_5^w = \frac{P_{w,max} - P_{w,min}}{P_{w,max}}$	$S_5^u = \frac{P_{u,max} - P_{u,min}}{P_{u,max}}$
	机组故障率 S_6	$S_6^w = \frac{t_w}{T_w}$	$S_6^u = \frac{t_u}{T_u}$

表1中， Q_w 和 Q_u 分别为风电厂与光伏电厂在一个发电周期内的发电量； A_w 是风电厂过风面积； A_u 是光伏电厂的面板设计面积； R_w 和 R_u 分别为风电厂与光伏电厂设计造价； I_w 和 I_u 是对应电厂在一个发电周期内的收入； C_w 和 C_u 是对应电厂的在一个发电周期内的厂用电支出； $P_{w,max}$ ， $P_{w,av}$ ， $P_{w,min}$ 分别代表风电厂的设计功率最大、平均和最小值； $P_{u,max}$ ， $P_{u,av}$ ， $P_{u,min}$ 分别代表光伏电厂的设计功率最大、平均和最小值； t_w 和 t_u 是对应电厂机组年故障停机时间； T_w 和 T_u 是对应电厂的年机组运行时间。

1.2.2 绿证核发体系

上述评价指标可以综合反映发电商的经济与技术情况，但尚不明确指标重要程度之间的差异，现使用熵权法为每一项指标分配对应的权重系数，最后将其标准化为一个综合评价指标得分 $\Gamma_i(0 < \Gamma_i \leq 1)$ 。使用熵权法计算发电商不同指标权

重的步骤如下：^[9]

a. 将发电商 i 的上述6项评价指标所得数据 $S_{i1}, \dots, S_{ij}$ 进行标准化，标准化后记为 $V_{i1}, \dots, V_{ik}$ ，使用式(4)进行标准化， $S_{i1}, \dots, S_{ij}$ 与 $V_{i1}, \dots, V_{ik}$ 均大于0。

$$V_{ij} = \frac{S_{ij} - \min\{S_{1j}, \dots, S_{nj}\}}{\max\{S_{1j}, \dots, S_{nj}\} - \min\{S_{1j}, \dots, S_{nj}\}} \tag{4}$$

b. 求发电商 i 各项指标值的比重 β_{ij}

$$\beta_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sum_{i=1}^n V_{ij}} \tag{5}$$

c. 计算各指标的信息熵 E_j

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n \beta_{ij} \ln \beta_{ij} \tag{6}$$

d. 计算各指标的权重值 ω_j

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{k - \sum_{j=1}^k E_j} \tag{7}$$

e. 计算发电商的最终评价指标得分真值

$$\Gamma'_i = \sum_{j=1}^k V_{ij} \omega_j \tag{8}$$

f. 并进行归一化得到最终评价指标得分

$$\Gamma_i = \frac{\Gamma'_i}{\max\{\Gamma'_i\}} \tag{9}$$

该得分表示了发电商 i 所发绿电换算为绿证时单个绿证的价值，得分越高说明该电厂当期所发单位绿电应核发更多的绿证。定义当 $\Gamma_i = 1$ 时为标准可再生能源发电商，其所发1 MWh的绿电相当于1个绿证。发电商当期的绿证拥有量 $q_{gh,i}$ 如式(10)所示，方括号为取整函数，即不超过 $\Gamma_i Q_{g,i}$ 的整数部分记作 $\lceil \Gamma_i Q_{g,i} \rceil$ 。

$$q_{gh,i} = \lceil \Gamma_i Q_{g,i} \rceil \tag{10}$$

1.3 可再生能源配额分配模型

1.3.1 配额目标

配额目标 λ 用于指导配额主体承担可再生电力消纳责任，在构建新型电力系统的背景下，合理设置配额目标是有效促进可再生能源发展的关键。根据现阶段我国政策^[4]，本文采用的最低配额目标为15%，激励配额目标为16.5%。

1.3.2 配额完成度

配额完成度 ξ_k 用于考量配额主体本期的配额完

成情况,本期售电商购入的绿电与绿证之和将记为本期已完成的配额电量,售电商配额完成度的计算公式为

$$\xi_k = \frac{Q_{sg,k} + q_{sg,k}}{Q_{rg,k}} \quad (11)$$

式中: $Q_{sg,k}$ 是售电商 k 本期购入的绿电电量; $q_{sg,k}$ 是售电商 k 本期购买的绿证所代表的绿电电量; $Q_{rg,k}$ 为售电商 k 的本期的配额电量。

1.3.3 配额分配

当配额责任主体没有按要求完成配额目标时会受到惩罚,超额完成配额目标时会受到激励。考虑到不同售电商在区域内的市场份额以及上期配额完成程度的不同,本期售电商配额将由上期的售电量在区域内占比 η'_k 、上期配额比例完成度系数 ε'_k 、以及本期本区域应完成的配额电量决定,计算式为

$$Q_{rg,k} = \begin{cases} (\theta\varepsilon'_k + (1-\theta)\eta'_k)\lambda Q_{pn}, & 0 \leq \xi'_k < 1 \\ \eta'_k\lambda Q_{pn}, & \xi'_k \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\varepsilon'_k = \frac{\xi'_k}{\sum_k \xi'_k} \quad (13)$$

$$\eta'_k = \frac{Q'_{s,k}}{Q'_{pn}} \quad (14)$$

式中: Q_{pn} 为本期该区域全社会用电量; Q'_{pn} , $Q'_{s,k}$, ξ'_k 是上期区域全社会用电量、上期售电商售电量、上期配额完成度; θ 为分配系数。

1.3.4 激励与罚金

罚金在可再生能源消纳过程中起到了督促作用,因此合理设置罚金的大小关系到电力市场与绿证市场的正常运行^[10]。罚金与奖励 FB_k 的定义方式为

$$FB_k = \begin{cases} -\gamma p_g (Q_{rg,k} - q_{sg,k} - Q_{sg,k}), & 0 \leq \xi_k < 1 \\ 0, & 1 \leq \xi_k < 1.015 \\ (\xi_k - 1.015) Q_{s,k} p' \beta, & \xi_k \geq 1.015 \end{cases} \quad (15)$$

当本期配额未完成时 ($0 \leq \xi_k < 1$), 售电商需要向地方监管部门支付罚金。罚金等于本期未完成的配额电量与单位罚金 γp_g 的乘积,单位罚金设置为绿证价格的 γ 倍。由《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》可知,当配额主体当期完成配额比例比 λ 多1.5%时将会得到激励, β 为激励系数。当 $1 \leq \xi_k < 1.015$ 时,售电商不需要缴纳罚金,也不会收到激励。

1.4 博弈模型

在电力市场与绿证市场上,市场参与者包括可再生能源发电商、化石能源发电商与售电商,这三者均以自身利润最大化为目标,因此构成博弈模型^[11-12]。

1.4.1 可再生能源发电商

可再生能源发电商 i 的利润 $\Pi_{g,i}$ 为

$$\Pi_{g,i} = Q_{g,i}p - C_{g,i} + q_{g,i}p_g \quad (16)$$

其中 $q_{g,i}$ 为绿证出售量。

发电商发电出力受到机组安全工作区间约束,即

$$Q_{gmin,i} \leq Q_{g,i} \leq Q_{gmax,i} \quad (17)$$

式中, Q_{gmin} , Q_{gmax} 分别为当期可再生能源发电商 i 可以发出的最小和最大电量。

可再生能源发电商 i 当期的绿证交易量应小于等于其当期的绿证拥有量,即

$$0 \leq q_{g,i} \leq q_{gh,i} \quad (18)$$

绿证市场上进行交易的售电商买入绿证个数应等于可再生能源发电商卖出的绿证个数,即

$$\sum_{k=1}^l q_{sg,k} = \sum_{i=1}^n q_{g,i} \quad (19)$$

1.4.2 化石能源发电商

化石能源发电商的利润函数 $\Pi_{c,j}$ 为

$$\Pi_{c,j} = Q_{c,j}p - C_{c,j} \quad (20)$$

化石能源发电商发电出力受到机组安全工作区间约束,即

$$Q_{cmin,j} \leq Q_{c,j} \leq Q_{cmax,j} \quad (21)$$

式中, Q_{cmin} , Q_{cmax} 分别为当期化石能源发电商 j 可以发出的最小与最大电量。

1.4.3 售电商

根据中国国内目前的结构可知,市场上的可再生能源发电量远小于政策所规定的全社会需要消纳的配额电量,因此售电商必须购买一定的绿证来补充其应尽的消纳责任^[13]。因此售电商的收益 $\Pi_{s,k}$ 为

$$\Pi_{s,k} = Q_{s,k}p' - (Q_{sg,k} + Q_{sc,k})p - q_{sg,k}p_g + FB_k \quad (22)$$

售电商卖出电量一定小于购入电量,即

$$0 \leq Q_{s,k} \leq Q_{sg,k} + Q_{sc,k} \quad (23)$$

售电商的买入电量之和一定小于各发电商总发出电量,即

$$0 \leq \sum_{k=1}^l Q_{sg,k} \leq \sum_{i=1}^n Q_{g,i} \tag{24}$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^l Q_{sc,k} \leq \sum_{j=1}^m Q_{c,j} \tag{25}$$

1.4.4 基于利润最大化的最优决策模型

各市场参与主体均以其各自利润最大化为目标，则最优决策模型为

$$\max \{ \Pi_{g,i} \} = \max \{ Q_{g,i} p - (a_{g,i} Q_{g,i}^2 + b_{g,i} Q_{g,i} + c_{g,i}) + q_{g,i} p_g \} \tag{26}$$

$$\max \{ \Pi_{c,j} \} = \max \{ Q_{c,j} p - (a_{c,j} Q_{c,j}^2 + b_{c,j} Q_{c,j} + c_{c,j}) \} \tag{27}$$

$$\max \{ \Pi_{s,k} \} = \max \{ Q_{s,k} p' - (Q_{sg,k} + Q_{sc,k}) p - q_{sg,k} p_g + FB_k \} \tag{28}$$

此模型的求解可以通过多个角度进行，其中可再生能源发电商与化石能源发电商的最优发电出力 $Q_{g,i}^*$ 与 $Q_{c,j}^*$ 可以通过求解其收益函数的 KKT (Karush-Kuhn-Tucker conditions) 条件得出，这里以发电商刚好完成上期配额 ($\xi_k^* = 1$) 为例进行求解。

化石能源发电商利润最大化下的 KKT 条件如下所示

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi_{c,j}}{\partial Q_{c,j}} + \sum_{x=1}^3 \mu_x \frac{\partial g_x(Q_{c,j})}{\partial Q_{c,j}} = 0 \\ \mu_x g_x(Q_{c,j}) = 0, (x = 1, 2, 3) \\ \mu_x \geq 0, (x = 1, 2, 3) \end{cases} \tag{29}$$

式中， $g_x(Q_{c,j})$ 为化石能源发电商利润函数 $\Pi_{c,j}(Q_{c,j})$ 的不等式约束，如下所示：

$$s.t. \begin{cases} Q_{cmin,j} - Q_{c,j} \leq 0 \\ Q_{c,j} - Q_{cmax,j} \leq 0 \\ \sum_{k=1}^l Q_{sc,k} - \sum_{j=1}^m Q_{c,j} \leq 0 \end{cases} \tag{30}$$

求解上述条件可以得到化石能源发电商的最优发电出力和最优利润分别为

$$Q_{c,i}^* = \frac{p - b_{c,j}}{2a_{c,j}} \tag{31}$$

$$\Pi_{c,j}^* = \frac{(p - b_{c,j})^2}{4a_{c,j}} - c_{c,j} \tag{32}$$

同理，可以得到可再生能源发电商的最优发电出力和最优利润分别为

$$Q_{g,i}^* = \frac{p - b_{g,i}}{2a_{g,i}} \tag{33}$$

$$\Pi_{g,i}^* = \frac{(p - b_{g,i})^2}{4a_{g,i}} - c_{g,i} + q_{g,i} p_g \tag{34}$$

而售电商的交易行为本质上分为了两阶段：购入电力和售出电力，因此可以使用逆向归纳法进行求解。售电商的最优化化石能源电力 $Q_{sc,k}^*$ 与可再生能源电力 $Q_{sg,k}^*$ 购入量如下所示

$$Q_{sg,k}^* = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^n \frac{p - b_{g,i}}{2a_{g,i}} \tag{35}$$

$$Q_{sc,k}^* = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^m \frac{p - b_{c,j}}{2a_{c,j}} \tag{36}$$

求解可得售电商最优售电量为

$$Q_{s,k}^* = \frac{1}{p'} \left(\sum_{j=1}^m \frac{p - b_{c,j}}{2a_{c,j}} - \sum_{i=1}^n \frac{p - b_{g,i}}{2a_{g,i}} \right) \tag{37}$$

通过上述分析，本文给出了最优利润目标下的博弈均衡解，接下来将通过具体的计算仿真，讨论不同情景下的电力价格与市场主体收益变化情况。

2 算例分析

2.1 情境设计

本文设立 3 种情景模式，在此基础上进行算例分析，3 种情景如表 2 所示。

表 2 情景设计
Tab.2 Scenario design

情景简称	描述
RFO (RPS with fossil generator oriented)	化石能源发电商为配额责任主体的可再生能源政策
RRO (RPS with retailer oriented)	可再生能源发电商为配额责任主体的可再生能源政策
ERPS (Enhanced RPS)	考虑可变罚金与激励的增强型可再生能源政策

a. RFO 情景依照文献 [14] 中采用的发电侧配额制，规定化石能源发电商为配额责任主体。在本情景下火电商利润如式 (38) 所示。 $F_{d,j}$ 为定额罚金，设置为绿证价格的 γ 倍，本情景下取固定值 $\gamma = 0.1$ ，如式 (39) 所示。售电商的利润函数如式 (40) 所示。其他参数设计不变。

$$\Pi_{c,j}^{RFO} = Q_{c,j} p - C_{c,j} - q_{cg,j} p_g - F_{d,j} \tag{38}$$

$$F_{d,j} = \gamma p_g \tag{39}$$

$$\Pi_{s,k}^{RFO} = Q_{s,k} p' - (Q_{sg,k} + Q_{sc,k}) p \tag{40}$$

b. RRO 情景依照售配电测配额制，规定售电

商为责任主体。在本情景下，售电商的利润函数为

$$\Pi_{s,k} = Q_{s,k}p' - (Q_{sg,k} + Q_{sc,k})p - q_{sg,k}p_g + F_k \quad (41)$$

式中， F_k 为罚金。

罚金的大小应正比于售电商当期的未完成配额电量，单位罚金规定为绿证价格的 γ 倍，取固定值 $\gamma=0.1$ ，如式 (42) 所示。其他参数设计不变。

$$F_k = \begin{cases} \gamma p_g (Q_{rg,k} - q_{sg,k} - Q_{sg,k}), & \xi_k < 1 \\ 0, & \xi_k \geq 1 \end{cases} \quad (42)$$

c. 情景 3(ERPS)为本文第 1 章中设计的增强型可再生能源配额模型。

2.2 数据准备与评价结果分析

2.2.1 数据准备

采用 Matlab 进行仿真，现使用国内 10 家光伏发电商与 10 家风能发电商作为市场主体中的可再生能源发电商，另外选用 10 家化石能源发电商共 30 家作为市场主体中的发电商主体，选取 3 家售电商作为配额责任主体，所涉及的基本数据^[8, 10, 15-18]见表 3 和表 4。

表 3 基本参数 I
Tab.3 Basic parameters I

发电商	序号	二次项成本系数	一次项成本系数	固定成本	最小发电量/MW	最大发电量/MW
陆上风电	1	0.000 016 7	226	247	0	220
	2	0.000 023 3	235	347	0	100
	3	0.000 023 3	245	248	0	22.5
	4	0.000 033	285	348	0	49.5
	5	0.000 043	285	477	0	100.5
	6	0.000 43	285	307	0	200
	7	0.000 53	385	327	0	100
	8	0.000 83	305	325	0	49.5
	9	0.000 8	353	354	0	220
	10	0.000 84	353	304	0	100.5
集中光伏	11	0.000 982 2	381	366	0	30
	12	0.001 095 89	397	374	0	20
	13	0.001 209 57	412	383	0	12
	14	0.001 323 26	428	391	0	9.9
	15	0.001 436 94	444	400	0	50
	16	0.001 550 63	459	408	0	100
	17	0.001 664 31	475	417	0	10
	18	0.001 778	490	426	0	48
	19	0.001 891 68	506	434	0	50
	20	0.002 005 37	521	443	0	30
火电机组	21	0.000 016 7	135	0	240	600
	22	0.000 023 3	125	0	120	300
	23	0.000 032 1	103	0	120	300
	24	0.000 004 3	114	0	120	300
	25	0.000 005 3	109	0	320	800
	26	0.000 055 1	79	0	200	500
	27	0.000 046 3	114	0	240	600
	28	0.000 023	133	0	360	900
	29	0.000 025	127	0	320	800
	30	0.000 034	103	0	400	1 000

表 4 基本参数 II
Tab.4 Basic parameters II

参数	$p_g/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1})$	$p'/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1})$	U	v	γ	β	θ
数值	145.9	546.9	500	0.000 002 3	$0<\gamma<1$ 初值取0.1	$0\leq\beta<1$ 初值取0	0.33

2.2.2 评价结果分析

使用前述计算方法对不同发电商进行分析与打分，可以得到这些可再生能源发电商的综合指标得分。图 1 可以清楚地反映发电商当期所拥有的绿证数量与发电量之间的比例关系，图中柱上的数字代表该发电商的评价得分。可以看到发电商G_{g,17}的得分为满分，其将成为“标准可再生能源发电商”。

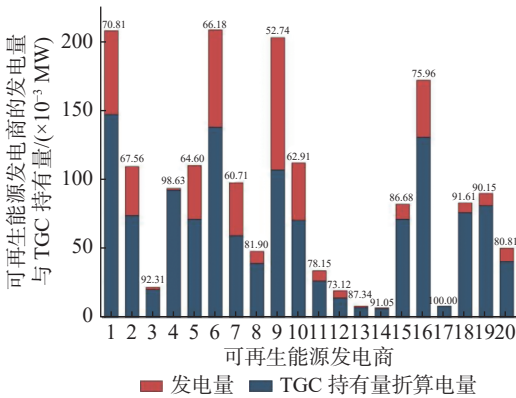


图 1 可再生能源发电商发电量与绿证拥有量
Fig.1 Renewable energy generators generation and green certificate ownership

2.3 发电侧配额制下的的收益分析

RFO 情景下，由于责任主体为化石能源发电商，售电商收益仅由市场电价和购电量决定，因此仅需分析另外两者的利润以及电力市场电价。带入算例可以得到图 2，其反映了市场中全部发电商的利润总和随配额比率的变化情况。由图可知，随着政府逐步提高配额目标，化石能源发电

商的利润将会逐步下降，而下降的速度随着 RPS 比率的增大逐步减缓。可再生能源发电商的利润则会逐步上升，上升的速度同样随着 RPS 比率的增加逐步减缓，当 RPS 比率大于 30% 后，其利润上升速度明显变缓。

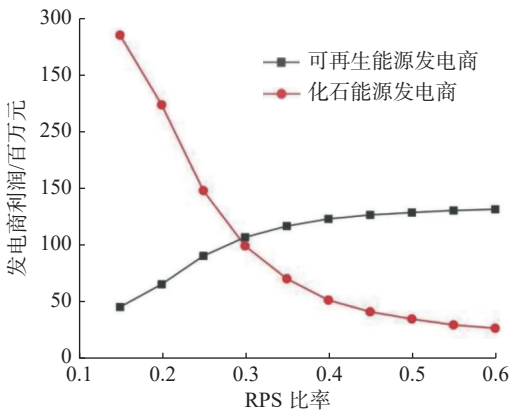


图 2 RFO 情景下发电商利润总和和变化情况
Fig.2 Profits of all generators under the RFO scenario

表 5 则展示了不同规模化石能源发电商在 RPS 比率变化时收益的变化情况，该表按照化石能源发电商的装机容量从左到右降序排列。从中可以看出，当 RPS 从 0.15 上升到 0.25 时，各家发电商的利润下降均在 48% 左右。考虑到不同发电商之间的规模差异，面对同样比率的收益下降，规模更小的发电商退出市场的概率将增大。这种情况说明，发电侧的 RPS 政策可以快速有效地淘汰建造时间较为久远、机组排放较大的小型化石能源发电商。综上所述，发电侧配额制在相同

表 5 化石能源发电商在不同配额下的收益情况

RPS比率	发电商收益/百万元									
	$G_{c,10}$	$G_{c,8}$	$G_{c,9}$	$G_{c,5}$	$G_{c,7}$	$G_{c,1}$	$G_{c,6}$	$G_{c,4}$	$G_{c,3}$	$G_{c,2}$
0.15	78.91	50.82	45.61	38.26	31.89	29.29	27.87	23.61	15.68	14.20
0.20	61.89	39.85	35.78	30.01	25.02	22.91	21.87	18.52	12.32	11.15
0.25	40.93	26.35	23.66	19.85	16.55	15.15	14.47	12.25	8.16	7.37
0.30	27.43	17.66	15.86	13.30	11.09	10.15	9.69	8.20	5.47	4.96
0.35	19.41	12.50	11.22	9.41	7.85	7.19	6.86	5.82	3.88	3.52
0.40	14.48	9.32	6.99	7.02	5.85	5.34	5.12	4.35	2.90	2.60

续表 5

RPS比率	发电商收益/百万元									
	$G_{c,10}$	$G_{c,8}$	$G_{c,9}$	$G_{c,5}$	$G_{c,7}$	$G_{c,1}$	$G_{c,6}$	$G_{c,4}$	$G_{c,3}$	$G_{c,2}$
0.45	11.28	7.26	6.52	5.47	4.56	4.18	3.99	3.61	2.26	2.04
0.50	9.09	5.85	5.26	5.02	3.68	3.37	3.66	3.61	1.83	1.87
0.55	7.53	4.85	4.36	5.02	4.05	2.80	2.79	1.91	1.52	1.86
0.60	6.38	4.11	5.31	5.02	4.19	2.56	2.06	0.21	1.29	1.87

RPS 比率上升区间内，可以通过加速淘汰高排放的小型机组达到快速优化电源结构、促进减排的目的。

图 3 反映了 RFO 情景下的电力市场价格的变化情况，电力市场价格随着 RPS 比率的增大迅速增加，在 RPS 比率上升至 40% 之前，电价上升十分迅速，且最终达到较高水平。快速上升的电价将会挤压售电商的利润空间，虽然本文假设售配电价为固定值，但在实际市场上，电力市场的价格必然会传导至用户，从而导致二级市场电价上升明显，进而导致社会福利损失^[19]。

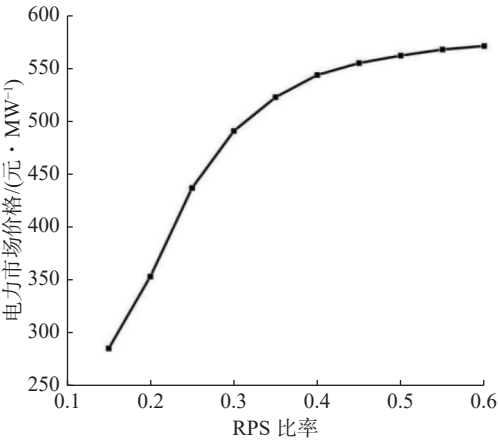


图 3 RFO 情景下的电力市场价格

Fig.3 Electricity market price under RFO scenario

2.4 售配电侧配额制下的收益分析

RRO 情景下的责任主体为售电商，图 4 反映了市场主体各自的利润总和随 RPS 比率的变化情况，图 5 反映了同期的电力市场价格变化情况。从中可看到，在政策施行初期，三者的利润均未产生较大变化。当 RPS 比率从 20% 上升至 30% 时，可再生能源发电商的利润出现了明显上涨，化石能源发电商的利润下降较大，但同期电力市场价格稳定在 344 元/MW。根据化石能源发电商的利润函数，当 p 不变时，其利润函数在研究范围内是发电量 $Q_{c,j}$ 的单调增函数，即化石能源发电商利润的下降是由其发电量减少造成的。当 RPS

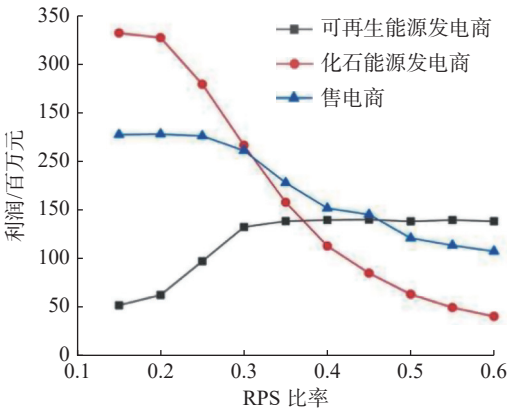


图 4 RRO 情景下市场主体利润变化情况

Fig. 4 Profit changes of market players under the RRO scenario

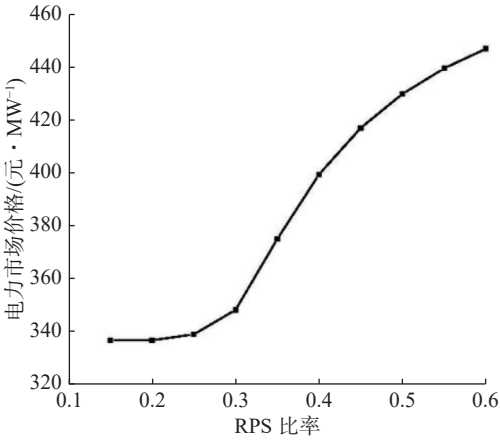


图 5 RRO 情景下电力市场价格变化情况

Fig. 5 Electricity market price changes under the RRO scenario

比率大于 30% 后，可再生能源发电商的收益趋近平稳，其均衡收益与 RFO 情景差别不大。

对比 RRO 与 RFO 情景，两者虽然都可以通过削减化石能源发电商的利润来逐步淘汰高排放的火电机组，但 RRO 情景下的电力市场价格在政策实施初期上升较为平缓，降低了对二级市场电价的冲击，且最终均衡值也较 RFO 情景的低。当 RPS 比率大于 0.3 时，利润的下降将急剧变大，高排放的化石能源发电商将会被立刻淘汰，为可再生能

源发电商留出市场, 进一步提高可再生能源发电商的利润上升空间, 从而实现由化石能源向可再生能源的转变。综上所述, 售配电侧配额制相较于发电侧配额制在政策推行初期更有利于二级电力市场稳定。

2.5 增强型配额制下的收益分析

图6给出了当RPS比率为0.15, 0.40, 0.60时, 售电商收益随激励系数 β 与罚金系数 γ 的变化情况。

可以看出, 随着激励系数的增大, 售电商利润上升十分明显, 售电商收到的激励正比于当期售电商的超额完成配额量。但当 $\beta > 0.6$ 时, 激励对售电商的刺激程度明显减弱, 随着 β 的进一步增

大, 售电量利润变化幅度并不明显。此外, 罚金系数 γ 对售电商利润的影响也较为直观, 随着 γ 的增大, 售电商利润也随之减小, 同样当 $\beta > 0.6$ 时, 罚金对售电商利润的影响程度明显减弱。因此可以发现 β 对售电商利润的刺激存在壁垒, 当管理者对配额责任主体同时施行激励与惩罚政策时, 需要综合考虑 β 与 γ 的取值, 从而避免政策失效。综合对比RRO与ERPS情景下的售电商收益情况可以发现, 由于激励的加入, 当惩罚系数一定时, ERPS下的收益将明显改善, 售电商为了获取超额收益, 将会超额完成当期配额, 从而实现可再生能源消纳从被动向主动的转变。

3 结 语

针对我国发展现状, 分析了不同主体配额制对可再生能源消纳的效果, 并在此基础上构建了考虑配额责任主体差异与奖惩的增强型可再生能源配额制。结果表明:

a. 售配电侧RPS相较于发电侧的RPS而言, 在政策施行初期带来的电价上涨幅度较为平缓, 因此更有助于降低对二级电力市场的冲击, 且在政策推行后期可以有效降低化石能源发电商收益, 从而间接促进可再生能源发展。

b. 增强型配额制主要体现在对配额责任主体的奖惩制度上, 仿真结果发现奖励政策存在壁垒(体现在奖励系数 β 上), 超过该壁垒将导致奖惩政策失灵, 因此监管者在设置奖惩系数时需要综合考虑 β 与 γ 的取值。

c. 增强型配额制的实施可以通过改善售电商的收益情况, 进一步促进可再生能源消纳。

本文提出的增强型配额制适用于我国构建新型电力系统, 有助于通过监管实现促进可再生能源消纳的目的。

参考文献:

[1] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架 [J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.

[2] 樊宇琦, 丁涛, 孙瑜歌, 等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1729-1751.

[3] BAO X J T, ZHAO W H, WANG X M, et al. Impact of policy mix concerning renewable portfolio standards and

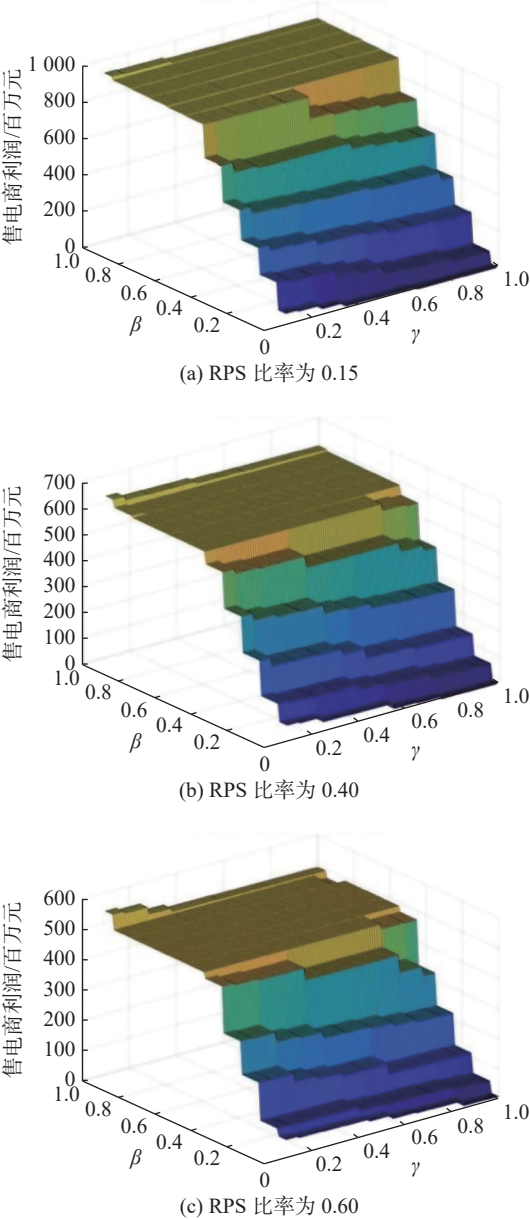


图6 售电商利润的变化情况
Fig. 6 Profit changes of retailers

- emissions trading on electricity market[J]. *Renewable Energy*, 2019, 135: 761–774.
- [4] 国家发展改革委. 国家发展改革委 国家能源局联合印发《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》[EB/OL]. [2022-01-03]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/xwfb/201905/t20190515_954419.html?code=&state=123.
- [5] 王强, 谭忠富, 谭清坤, 等. 我国绿色电力证书定价机制研究[J]. *价格理论与实践*, 2018(1): 74–77.
- [6] ZHAO X G, WU L, ZHOU Y. How to achieve incentive regulation under renewable portfolio standards and carbon tax policy? A China's power market perspective[J]. *Energy Policy*, 2020, 143: 111576.
- [7] ZHANG L B, CHEN C Q, WANG Q W, et al. The impact of feed-in tariff reduction and renewable portfolio standard on the development of distributed photovoltaic generation in China[J]. *Energy*, 2021, 232: 120933.
- [8] 安学娜, 张少华, 李雪. 考虑绿色证书交易的寡头电力市场均衡分析[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(9): 84–89.
- [9] 卢宜玲, 李军祥, 齐缘. 疫情下考虑疲劳度的可变服务率排队模型[J/OL]. *上海理工大学学报*, 2021: 1–11 (2021-09-30). <https://doi.org/10.13255/j.cnki.jusst.20210127001>.
- [10] 董福贵, 时磊. 可再生能源配额制及绿色证书交易机制设计及仿真[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12): 113–121.
- [11] 高岩. 智能电网实时电价社会福利最大化模型的研究[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(10): 201–209.
- [12] 代业明, 高岩. 智能电网下电力零售商合作实时定价博弈[J]. *上海管理科学*, 2016, 38(3): 52–55.
- [13] LIU L, ZHANG Z S, WANG Z. Two-sided matching and game on investing in carbon emission reduction technology under a cap-and-trade system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282: 124436.
- [14] 国家发展改革委. 三部门关于试行可再生能源绿色电力证书核发及自愿认购交易制度的通知[EB/OL]. [2022-01-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-02/03/content_5164836.htm.
- [15] 杨阳, 练冲, 马超. 晴天光伏发电功率的日内变化规律及预测方法研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(6): 565–572.
- [16] 袁桂丽, 陈少梁, 刘颖, 等. 基于分时电价的虚拟电厂经济性优化调度[J]. *电网技术*, 2016, 40(3): 826–832.
- [17] 王辉, 陈波波, 赵文会, 等. 可再生能源配额制下跨省区电力交易主体最优决策[J]. *电网技术*, 2019, 43(6): 1987–1994.
- [18] 绿证认购平台. 中国绿证挂牌交易每日成交平均价格[EB/OL]. [2022-01-03]. <http://www.greenenergy.org.cn/gctrade/history/echarts.jhtml>.
- [19] 郭炜煜, 赵新刚, 冯霞. 固定电价与可再生能源配额制: 基于中国电力市场的比较[J]. *中国科技论坛*, 2016(9): 90–97.

(编辑: 董 伟)

[上接第 111 页]

- [52] YUAN G X, GAO Y, YE B. Optimal dispatching strategy and real-time pricing for multi-regional integrated energy systems based on demand response[J]. *Renewable Energy*, 2021, 179: 1424–1446.
- [53] YUAN G X, GAO Y, YE B, et al. A bilevel programming approach for real-time pricing strategy of smart grid considering multi-microgrids connection[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(7): 10572–10589.
- [54] LI Y, LI K. Incorporating demand response of electric vehicles in scheduling of isolated microgrids with renewables using a Bi-level programming approach[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 116256–116266.
- [55] ALIPOUR M, ZARE K, SEYEDI H. A multi-follower bilevel stochastic programming approach for energy management of combined heat and power micro-grids[J]. *Energy*, 2018, 149: 135–146.
- [56] ZHANG L, GAO Y, ZHU H B, et al. Bi-level stochastic real-time pricing model in multi-energy generation system: a reinforcement learning approach[J]. *Energy*, 2022, 293: 121926.

(编辑: 丁红艺)