

计及绿色证书交易机制的大用户直购电市场均衡分析

钟宇峰,黄民翔,文福拴,龚剑波,王 焱

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 在将电力市场中的发电公司分为价格领导者、跟随者和接受者的前提下,考虑双边合同并引入绿色证书交易机制,建立了大用户直购电市场寡头垄断模型并进行了均衡分析。用有5家发电公司参与的电力市场为例,分析了合约电量、绿色证书价格、绿色能源波动等关键因素对市场均衡的影响。分析结果表明:随着合约电量的增大,发电公司在电力市场上总的发电出力增加,而市场电价和发电公司的总利润下降;应保持证书价格稳定,防止市场波动过大,有效促进可再生能源发电的发展。

关键词: 电力市场; 交易; 绿色证书; 可再生能源; 直购电; 寡头垄断模型; 均衡分析

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.025

0 引言

大用户直购电,也即双边交易,是电力市场环境的一种主要的交易模式,在我国未来的电力市场中也不会例外。在大用户直购电交易模式下,符合资格要求的大用户可以直接从独立发电公司购电并通过电网公司所属的输电系统和配电系统进行输送;同时,买卖双方需向电网公司交纳相关的费用。

在大用户直购电方面,已经有不少研究报道。目前,这方面的研究主要集中在宏观政策设计,以及博弈论等方法确定电价和电量^[1-4]。大用户直购电交易模式主要包括协商式双边交易模式和集中撮合交易模式2种。在协商式双边交易模式中,大用户与发电公司双方通过自主协商进行直购电交易,操作简便易行,但从长期来看由于信息获取渠道的限制,双方的交易成本较高。采用集中撮合交易模式时需要预先建立技术支持系统,初期投入较大,但从长期来看交易成本较低,不过这种交易模式要求发电公司和大用户公开披露的信息较多。在一个成熟的电力市场中,这2种交易模式应该共同存在,由发电公司和大用户根据自身的具体情况来自主选择。

由于接收直供的多为工业大用户,随着“风火打捆”等输电形式的出现,大用户直购电中的清洁能源问题越来越受到关注。作为解决能源安全问题、环境污染和全球气候变暖的一种途径,排污权交易(或采用碳排放权和碳税等不同形式)已经在欧洲等国家和地区实施。另一方面,类似排污权交易,配额制及与其配套的绿色证书构成了新型市场工具——绿色证书交易机制,在荷兰等发达国家取得了很大成功,极大地推动了可再生能源产业的发展。可以预期,在作为排污大国的中国,实施排污权交易或配额制等政策只是时间问题。电力工业作为主要的污染释放行业,排污权交易或配额制等政策的实施对电力工业和电力市场会产生很大的影响,国内外近年

来在这方面做了不少研究工作^[5-15]。

目前,分析电力市场运行状态主要采用3类模型^[16],即优化模型、市场均衡模型和市场模拟模型。优化模型主要用于解决单个市场主体利益最大化问题;市场均衡模型则考虑多个参与者的市场行为,即博弈均衡状态;模拟模型主要用于解决较为复杂且难以用数学模型描述的问题,是对均衡模型很好的补充。本文研究多个市场主体参与市场的博弈均衡状态,采用市场均衡模型。

电力市场所固有的特征表明,实际运行的电力市场更接近于寡头垄断市场。在对寡头垄断市场进行均衡分析方面,通常采用 Cournot 模型、Stackelberg 模型和 Forchheimer 模型^[17-22],电力市场也不例外。目前国内外对绿色证书交易机制引入电力市场的理论和实例研究较为有限,不少学者对类似能源政策引入后电力市场的均衡问题进行了研究。文献[23-24]研究了计及 NO_x 排污权交易机制下的寡头垄断电力市场均衡模型,分别采用 Cournot 模型和 Stackelberg 模型对电力市场进行均衡分析;文献[25]建立了计及可再生能源配额制、绿色证书机制及温室气体排污权交易等政策的电力市场均衡模型。

在上述背景下,本文基于 Stackelberg 模型和 Forchheimer 模型,构造了能够计入绿色证书交易机制的用于分析大用户直购电市场均衡状态的寡头垄断市场模型,分析了其纳什均衡状态。然后,利用算例对所构造的模型和得到的纳什均衡状态进行了说明,并分析了大用户直购电量和绿色证书交易对大用户直购电市场均衡状态的影响。通过与模拟法的优化结果相比较,验证了该模型及其求解方法的有效性和正确性。

1 绿色证书交易机制

1.1 概述

绿色证书交易机制是在可再生能源配额制的基

基础上提出的。发电公司生产绿色电能,能获得一定数量的绿色证书;同样,电力用户消费绿色电能,也能获得一定数量的绿色证书。根据发电公司和用户的具体情况,政府相关部门或监管机构给定它们一定的配额来生产或消费绿色电能,要求它们定期上交一定的证书来完成相关的配额,否则将被罚款。因此,在绿色证书交易市场中,绿色证书的持有者(多指可再生能源发电公司)可以与承担指定配额要求的绿色证书需求者(通常为火电公司和一些高耗能用户)交易绿色证书,即未完成可再生能源配额指标的发电公司和用户通过购买绿色证书来完成配额指标。

采用绿色证书交易机制可以有效激励可再生能源发电的发展,使可再生能源发电高于非可再生能源发电的部分成本由整个发电行业 and (部分)用户分摊。采用这种方法可以在一定程度上限制化石燃料发电对环境的污染。

1.2 绿色证书价格

绿色证书交易机制符合市场运行机制,其价格由绿色证书的供需决定。理想情况下,绿色证书的价格等于可再生能源发电与常规电力的边际成本之差。除市场竞争之外,证书价格还受到诸多因素影响。

就可再生能源发电本身而言,可再生能源的类型、发电成本以及出力的不稳定性均会对绿色证书的供需造成影响,进而造成其价格波动。

政府政策对绿色证书的价格也有很大影响。绿色电能配额、可再生能源激励政策等均会影响绿色证书的供需;另外,市场的罚金决定了证书的价格上限,当证书价格高于罚金时,发电公司或用户会选择支付罚金以完成配额。因此,政策的制定应充分考虑可再生能源成本、出力波动等因素,在确保市场稳定的前提下促进可再生能源的发展。

2 大用户直购电市场模型

2.1 市场背景

电力市场中,常用 Stackelberg 模型(即领导者-价格跟随者模型)和 Forchheimer 模型(即领导者-价格接受者模型)^[18]描述电力市场中发电公司的角色。根据市场势力的不同,电力市场中的发电公司可以分为价格领导者、跟随者和接受者。价格领导者企业规模最大,调价时间上领先其他企业,市场势力也最大;跟随者根据价格领导者的策略选择自身发电量,具有一定市场势力;接受者规模较小,不具有市场势力,按边际成本等于市场电价组织生产。

本文所构造的模型中,假设发电公司由价格领导者、跟随者和接受者组成。价格领导者首先选择发电量;同时,跟随者通过估计价格领导者的发电量来

选择自身的发电量,其策略行为会影响市场电价;价格接受者的市场行为不会影响市场电价。

2.2 计及绿色证书交易的寡头垄断模型

下面构造计及绿色证书交易机制时的大用户直购电市场的寡头垄断模型。

设电力市场的逆需求函数为线性函数,即:

$$R=f-g\sum_{i=1}^N p_i \quad (1)$$

其中, R 为市场出清电价; f 和 g 分别为需求函数的截距和斜率; p_i 为第 i 个发电公司在给定时间段内的发电出力; N 为发电公司数量。

以风能、太阳能为主的绿色能源具有较大随机性和间歇性,其成本形式难以固定,本文中采用减排措施后的电能等效视为绿色电能,且假定减排成本为二次形式^[26],则单位时间内第 i 个发电公司的生产成本函数为:

$$C_i(p_i)=b_i p_i+\frac{c_i}{2} p_i^2+\frac{d_i}{2}(\alpha_i p_i)^2 \quad (2)$$

其中, b_i 和 c_i 为发电公司的生产成本系数; d_i 为第 i 个发电公司的减排成本系数; α_i 为在给定时间段内第 i 个发电公司采用减排措施的发电出力比例,将其等效为绿色电能出力。

假设在某个电力市场中,第 1~ L 个发电公司为价格领导者,第 $L+1$ ~ M 个发电公司为价格跟随者,第 $M+1$ ~ N 个发电公司为价格接受者。

市场交易分为 2 个方面:一方面,发电公司与大用户采用协商式双边交易模式进行合约交易,合约电量采取总量控制并按照发电公司机组总出力进行分摊;另一方面,进行电量现货交易,发电公司在已知合约交易的基础上制定发电策略,使自身利润最大化。

每个发电公司的利润函数可描述为:

$$B_i(p_i)=p_i R+q_{ci}(R_{ci}-R)-C_i(p_i)-\rho e_i \quad (3)$$

其中, R_{ci} 和 q_{ci} 分别为第 i 个发电公司与大用户所签订的双边合同电价和电量; e_i 为第 i 个发电公司绿色证书的交易量,其值大于 0 表示是净需求量或买入量,小于 0 则表示是净剩余量或出售量; ρ 为绿色证书的价格。

第 i 个发电公司通过最大化式(3)获得其最优出力,优化时应满足以下约束。

绿色证书配额约束:

$$t\alpha_i p_i+e_i=tk_i p_i \quad (4)$$

其中, k_i 为第 i 个发电公司的绿色能源配额系数; t 为生产单位绿色电能所获得的绿色证书数量。

发电公司出力约束:

$$p_{imin}\leq p_i\leq p_{imax} \quad (5)$$

其中, p_{imax} 和 p_{imin} 为第 i 个发电公司出力的上、下限。

2.3 市场均衡求解流程

根据不同发电公司在电力市场中的行为特点,

求解上述均衡问题,具体步骤如下。

步骤 1 结合式(3)、(4),获得第 i 个发电公司 ($i=1,2,\dots,N$) 的利润函数为:

$$B_i(p_i) = p_i R + q_{\alpha}(R_{\alpha} - R) - C_i(p_i) - \rho(k_i - \alpha_i)tp_i \quad (6)$$

步骤 2 作为价格接受者的发电公司,其产量不影响市场电价,因此其利润只是产量的函数而与电价无关,对其进行利润最大化:

$$\frac{\partial B_i(p_i)}{\partial p_i} = R - c_i p_i - b_i - d_i \alpha_i^2 p_i + \rho t(\alpha_i - k_i) = 0 \quad (7)$$

求得价格接受者的最优出力为:

$$p_i = \frac{R - b_i + \rho t(\alpha_i - k_i)}{c_i + d_i \alpha_i^2} = \frac{R - \delta_i}{\Delta_i} \quad (8)$$

$$\delta_i = b_i - \rho t(\alpha_i - k_i), \Delta_i = c_i + d_i \alpha_i^2$$

$$i = M+1, M+2, \dots, N$$

步骤 3 根据价格接受者的出力总和,修改剩余 M 个发电公司的需求函数,即:

$$R = f_1 - g_1 \sum_{i=1}^M p_i \quad (9)$$

$$f_1 = \frac{f + g \sum_{i=M+1}^N \frac{\delta_i}{\Delta_i}}{1 + \sum_{i=M+1}^N \frac{g}{\Delta_i}}, g_1 = \frac{g}{1 + \sum_{i=M+1}^N \frac{g}{\Delta_i}}$$

步骤 4 作为价格跟随者的发电公司,其利润最大化的一阶条件为:

$$\frac{\partial B_i(p_i)}{\partial p_i} = R + p_i(-g_1) - q_{\alpha}(-g_1) - c_i p_i - b_i - d_i \alpha_i^2 p_i + \rho t(\alpha_i - k_i) = 0 \quad (10)$$

代入式(9)可得价格跟随者的最优出力为:

$$p_i = \frac{f_1 + q_{\alpha} g_1 - \delta_i - g_1 \sum_{j=1, j \neq i}^M p_j}{2g_1 + \Delta_i} \quad i = L+1, L+2, \dots, M \quad (11)$$

步骤 5 修改剩余 L 个领导者的需求函数,即:

$$R = f_2 - g_2 \sum_{i=1}^L p_i \quad (12)$$

$$f_2 = \frac{f_1 + \sum_{i=L+1}^M \frac{\delta_i g_1 - q_{\alpha} g_1^2}{g_1 + \Delta_i}}{1 + \sum_{i=L+1}^M \frac{g_1}{g_1 + \Delta_i}}, g_2 = \frac{g_1}{1 + \sum_{i=L+1}^M \frac{g_1}{g_1 + \Delta_i}}$$

步骤 6 类似步骤 4 求解价格领导者的最优出力为:

$$p_i = \frac{f_2 + q_{\alpha} g_2 - \delta_i - g_2 \sum_{j=1, j \neq i}^L p_j}{2g_2 + \Delta_i} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (13)$$

步骤 7 根据发电公司出力总和求取市场电价 R 。

步骤 8 校验各发电机组出力是否满足约束式(5),若存在越限机组,将越上限(下限)的发电机组的出力修正为 $p_{\max}(p_{\min})$,修改需求曲线后对剩余机组返回步骤 2 进行求解。

3 算例分析

以有 5 家发电公司参与的电力市场为例对所提

出的模型进行验证。

3.1 市场条件和发电机组系数

5 家发电公司的生产成本系数、绿色能源成本参数、绿色能源生产比例与装机容量见表 1。取 $f=15$, $g=0.03$ 。不失一般性,设发电公司出力下限为 0,上限为装机容量。假定发电公司的绿色能源配额系数与双边交易价格都相同,即 $k_i=0.2$, $R_{\alpha}=4.5$ $\$/(\text{MW} \cdot \text{h})$ ($i=1,2,\dots,5$)。此外,假定 1 号、2 号发电机组为价格领导者,3 号、4 号发电机组为价格跟随者,5 号发电机组为价格接受者。

表 1 发电机组系数

Tab.1 Parameters of power generation units

发电公司	b_i	c_i	d_i	α_i	装机容量/MW
1	2.00	0.00750	0.24	0.1	200
2	1.75	0.03500	0.20	0.1	120
3	1.00	0.12500	0.16	0.2	60
4	3.25	0.01668	0.12	0.2	80
5	3.00	0.05000	0.08	0.4	40

绿色证书方面,取 $t=1$,即生产 1 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 绿色电能发 1 本证书。各发电公司所拥有绿色证书的理想价格为 $d_i \alpha_i p_i$ ($i=1,2,\dots,5$),假设证书价格为外生变量,取 1 $\$/\text{本}$ (接近第 5 个发电公司的理想价格)。

3.2 绿色证书交易和合约电量对市场均衡的影响

在给定时间段内,分析合约电量和绿色证书交易对市场均衡状态的影响,市场均衡解如表 2 所示。其中,情形 1—4 为不考虑绿色证书交易的前提下($\rho=0$, $d_i=0$),合约电量分别为 0 $\text{MW} \cdot \text{h}$ (即不考虑双边合同)、25 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 、100 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 与 250 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 的情况;情形 5—7 则为绿色证书交易引入后,合约电量分别为 25 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 、100 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 与 250 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 的情况。

图 1 对不同合约电量下的电价、总发电出力和总利润进行对比。由图 1 可知,随着合约电量的增大,发电公司在现货市场上总发电出力有所增加,而市场电价有所下降。这主要是因为现货市场的电价越高,发电公司需要补偿给用户的金额就越高,因此发电公司合约电量越多,在现货市场上追求高电价的动机就越小,同时增加其售电量的动力就越大。另外,随着合约电量的增大,发电公司的总利润也有所下降,证明了合约电量对市场势力的抑制作用。

图 1 从另一个方面表征了绿色证书交易机制对市场均衡的影响:当合约电量总量不变时,引入绿色证书交易后发电公司的总发电出力有所下降,因此现货市场电价有所升高;对比引入绿色证书交易前后的电价可知,如果在实施绿色证书交易的同时,增大双边合同交易电量总额,仍可以将电价控制在较低的水平。

3.3 绿色证书价格对市场均衡的影响

分析绿色证书价格波动对市场均衡的影响,以

表 2 考虑合约电量及绿色证书交易的市场均衡结果
Tab.2 Results of equilibrium considering bilateral contract amount and green certificate mechanism

发电公司	情形 1		情形 2		情形 3		情形 4		情形 5		情形 6		情形 7	
	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)
1	155.1	362.2	157.9	353.8	166.2	333.6	182.7	315.5	143.4	334.7	151.4	305.2	167.5	270.1
2	68.4	134.7	68.5	128.5	69.0	114.1	69.8	104.8	69.0	138.3	69.6	117.4	70.8	96.0
3	27.2	60.3	27.2	57.6	27.1	51.5	26.9	49.5	28.0	63.8	27.9	54.4	27.8	46.3
4	47.0	59.9	47.4	55.9	48.6	46.6	50.9	39.9	48.4	66.1	49.6	52.2	51.8	37.2
5	38.3	36.7	37.1	33.7	33.4	26.6	26.1	20.9	38.1	44.2	35.0	34.4	28.7	23.8
电价/ [\$·(MW·h) ⁻¹]	4.92		4.86		4.67		4.32		5.19		5.00		4.60	
总发电 出力/MW	336		338.1		344.3		356.4		326.9		333.5		346.6	
总利润/\$	653.8		629.5		572.4		530.6		647.1		563.6		473.4	

注:出力为最优出力。

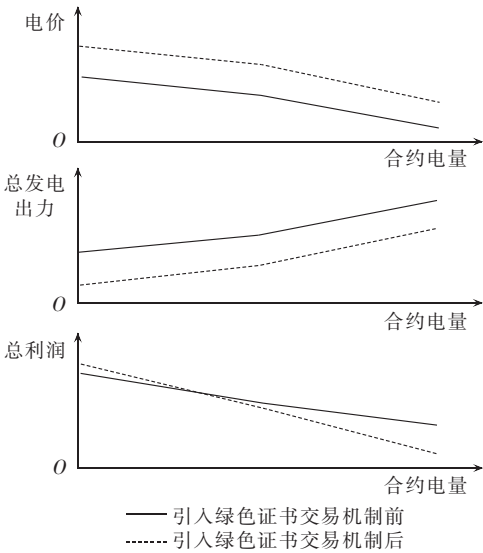


图 1 不同合约电量下均衡结果对比
Fig.1 Results of equilibrium among different bilateral contracts

合约电量为 100 MW·h 的情形为研究对象,绿色证书价格 ρ 取值 0 \$/本(不考虑绿色证书交易)、0.5 \$/本、1 \$/本和 1.5 \$/本时,市场均衡结果如表 3 所示。

对绿色能源生产成本最高和最低的发电公司进行分析,其利润变化见图 2。在引入绿色证书交易后,第 5 个发电公司的利润有所增加,且随着绿色证书价格的提高而增大。可见,绿色证书交易机制引入之后,绿色能源生产成本最低的发电公司受益最大,从而激励发电公司提高绿色电能生产效率,进而促进可再生能源发电的发展。同时这也为小规模发电公司提供了有用信息,当其规模和常规发电成本不占优势时,可通过大力发展可再生能源获得更多利润。

另一方面,绿色证书价格提高带来第 5 个发电公司利润增加的同时,第 1 个发电公司作为价格领导者,其出力和利润却大幅下降,尤其当证书价格为 1.5 \$/本时,市场会出现较大波动。因此,政府政策的制定与执行,应引导并保持证书价格稳定在理

表 3 绿色证书价格对市场均衡的影响
Tab.3 Results of equilibrium among different green certificate prices

发电公司	$\rho=0$		$\rho=0.5$		$\rho=1.0$		$\rho=1.5$	
	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)	出力/ MW	利润/ (\$·h ⁻¹)
1	166.2	333.6	153.1	313.9	151.4	305.2	149.7	296.5
2	69.0	114.1	70.4	120.8	69.6	117.4	68.8	114.0
3	27.1	51.5	27.9	54.2	27.9	54.4	28.0	54.6
4	48.6	46.6	49.3	51.6	49.6	52.2	49.8	52.8
5	33.4	26.6	33.2	30.7	35.0	34.4	36.7	38.3
电价/ [\$·(MW·h) ⁻¹]	4.67		4.98		5.00		5.01	
总发电 出力/MW	344.3		333.9		333.5		333.0	
总利润/\$	572.4		571.2		563.6		556.2	

注:出力为最优出力。

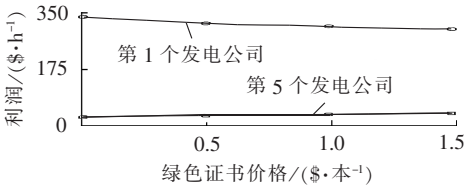


图 2 不同证书价格下第 1 个发电公司和第 5 个发电公司的利润变化

Fig.2 Profits of power generation corporation No.1 and No.5 for different green certificate prices

想价格附近,推动可再生能源发展的同时保持市场稳定。国外的绿色证书交易市场亦证明了此观点:文献[27]对瑞典-挪威联合绿色证书市场进行了分析,预测 2020 年市场平均电价为 276 NOK/(MW·h) (NOK:挪威克朗),包含绿色证书补贴后可再生能源成本为 276 NOK/(MW·h),两者较为接近,且有利于可再生能源的发展。

3.4 绿色能源波动对市场均衡的影响

风能、太阳能等可再生能源具有较大随机性和间歇性,因此绿色能源出力会发生相应波动,在本文模型中可等效为绿色电能比例系数 α 的波动。当 α 增大时,发电公司通过出售绿色证书的收益增加,而减排成本也相应增加(等效为新增的绿色能源投资和运

行维护成本),因此,如何确定并保持 α 以获得最大利润,是发电公司面临的重要问题。

以第 5 个发电公司为例,选取合约电量为 100 MW·h,绿色证书价格为 1 \$/本,图 3 给出了不同比例系数 α 下第 5 个发电公司的利润,结果表明,当 α 取 0.5 时,第 5 个发电公司获得的利润最大。

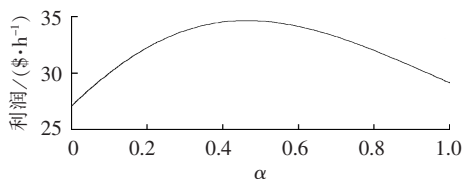


图 3 不同绿色能源比例系数 α 下第 5 个发电公司的利润变化

Fig.3 Profit of power generation corporation No.5 for different proportionality coefficients α

将图 3 所得结论推广到包含不可调度可再生能源发电的电力市场,出于经济性和市场稳定性考虑,可再生能源发电比例也应保持相对稳定。因此,进行准确的可再生能源资源评估和出力预测与测量,是减小可再生能源随机性和间歇性影响、获得最优经济效益、规避附加投资风险、保证绿色证书交易机制稳定的重要技术。另外,利用储能装置的优化调度,平抑可再生能源的出力波动,也是未来市场的发展趋势。

3.5 市场均衡模型和模拟模型的对比分析

为了验证本文所建立的计及绿色证书交易机制的大用户直购电寡头垄断市场均衡模型的合理性,通过模拟法^[27]分析算例中价格领导者、跟随者和接受者的市场行为,具体步骤如下。

步骤 1 设定各发电公司初始出力,并计算相应电价。

步骤 2 各发电公司根据上次迭代结果调整其出力,其中价格领导者先于其他企业进行调整,跟随者根据价格领导者的策略选择自身发电量,而接受者则按边际成本等于市场电价组织生产。各发电公司以利益最大化为原则调整发电出力,若调整后所获利润低于上一次迭代,则保持原有出力不变。

步骤 3 判断迭代是否收敛,本例中以相邻迭代间各发电公司利润变化小于 1 \$/h 作为收敛条件。若不收敛,则返回步骤 2 继续求解;若收敛,所得结果即为模拟模型下各发电公司的最优出力及市场电价。

合约电量取 100 MW·h、绿色证书价格取 1.0 \$/本时,均衡模型和模拟模型下的优化结果对比见表 4。

由表 4 可知,模拟模型优化结果与均衡分析结果基本吻合,这证明了本文所建立均衡模型的合理性。

表 4 均衡模型和模拟模型下优化结果对比
Tab.4 Comparison of optimization results between equilibrium model and simulation model

发电公司	均衡模型		模拟模型	
	最优出力/MW	利润/(\$·h ⁻¹)	最优出力/MW	利润/(\$·h ⁻¹)
1	151.4	305.2	152.3	302.4
2	69.6	117.4	70.0	116.0
3	27.9	54.4	28.1	53.9
4	49.6	52.2	50.0	51.3
5	35.0	34.4	34.4	33.5
电价/[\$·(MW·h) ⁻¹]	5.00		4.96	
总发电出力/MW	333.5		334.8	
总利润/\$	563.6		557.1	

另一方面,均衡分析结果优于模拟模型结果,这也表明待优化问题易于用数学模型描述时,均衡分析法比模拟法更为精确。

4 结论

本文将电力市场中的发电公司分为价格领导者、跟随者和接受者,建立了考虑合约电量及绿色证书交易机制的大用户直购电市场模型,并以有 5 家发电公司参与的电力市场为例对所提出的模型进行验证,分析了合约电量和绿色证书交易市场中证书价格、绿色能源波动等关键因素对均衡的影响。结论表明,合约电量对市场势力有抑制作用;绿色证书交易机制引入时,应结合各方面因素稳定证书价格,有效促进可再生能源发电的发展,防止市场波动过大;合理优化和调度储能装置,准确评估和预测可再生能源,是未来绿色证书交易市场应考虑的重要技术。上述结论对于今后绿色证书交易机制的实施、政府政策对市场的引导都有较高的参考价值。

参考文献:

[1] 张森林,张尧,陈皓勇,等. 双边交易在南方电力市场的成功实践[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):94-100.
ZHANG Senlin,ZHANG Yao,CHEN Haoyong,et al. Successful bilateral transactions in South China electricity market[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):94-100.
[2] 张瑞友,韩水,张近朱,等. 一种点对点阻塞电价计算方法[J]. 电力自动化设备,2007,27(6):13-16.
ZHANG Ruiyou,HAN Shui,ZHANG Jinzhu,et al. Calculation of node-to-node congestion price[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(6):13-16.
[3] 张显,王锡凡,陈皓勇,等. 电力市场中的双边合同[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):77-86.
ZHANG Xian,WANG Xifan,CHEN Haoyong,et al. Survey of bilateral contracts in power market[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(11):77-86.
[4] 陈皓勇,张森林,张尧. 电力市场中大用户直购电交易模式及算法研究[J]. 电网技术,2008,32(21):85-90.

- CHEN Haoyong,ZHANG Senlin,ZHANG Yao. Research on transaction mode of direct power purchase by large consumers in electricity market[J]. Power System Technology,2008,32(21):85-90.
- [5] 宋旭东,莫娟,向铁元. 电力行业碳排放权的初始分配机制[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):44-49.
- SONG Xudong,MO Juan,XIANG Tiejuan. Initial allocation mechanism of carbon emission permit in electric power industry[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):44-49.
- [6] 李扬,葛乐,林一,等. 电力市场下计及节能环保的实时发电调度策略[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):42-45.
- LI Yang,GE Le,LIN Yi,et al. Real-time power dispatch strategy considering energy saving and environmental protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):42-45.
- [7] 寻斌斌,文福拴,薛禹胜,等. 电力联营体模式下计及排污权交易的跨期多市场均衡[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):21-28.
- XUN Binbin,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. A period-spanning multi-market equilibrium model in a pool-based electricity market and emission trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):21-28.
- [8] 黄守军,任玉珑,俞集辉,等. 寡头电力市场中 CO₂ 排放规制的微分对策模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(21):46-51.
- HUANG Shoujun,REN Yulong,YU Jihui,et al. Differential game models for CO₂ emission regulation in oligopolistic electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(21):46-51.
- [9] 黄杰,薛禹胜,王彦亮,等. 关于电力系统排放权交易及排放阻塞的综述[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):1-6.
- HUANG Jie,XUE Yusheng,WANG Yanliang,et al. A survey of power system emission trading and emission congestion[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):1-6.
- [10] 刘国中,文福拴,薛禹胜. 排放权和可再生能源发展对电力市场的影响[J]. 电力系统自动化,2010,34(7):21-25.
- LIU Guozhong,WEN Fushuan,XUE Yusheng. Impacts of emissions trading and renewable energy sources development schemes on electricity market operation[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(7):21-25.
- [11] 李现忠,蔡兴国,付春梅. 碳交易机制下考虑节能减排的竞价交易模式[J]. 电力系统自动化,2011,35(10):48-52.
- LI Xianzhong,CAI Xingguo,FU Chunmei. An energy saving and emission reduction based bidding transaction mode under carbon trading mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(10):48-52.
- [12] 刘国中,文福拴,薛禹胜. 温室气体排放权交易对发电公司最优报价策略的影响[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):15-20.
- LIU Guozhong,WEN Fushuan,XUE Yusheng. Impacts of emissions trading on optimal bidding strategies of generation companies in day-ahead electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(19):15-20.
- [13] 高慧,魏学好,文福拴. 排污权交易实施后的寡头垄断电力市场的均衡分析[J]. 华北电力大学学报,2009,36(6):8-13.
- GAO Hui,WEI Xuehao,WEN Fushuan. Investigation on the equilibrium states of oligopoly electricity markets after the implementation of emission trading[J]. Journal of North China Electric Power University,2009,36(6):8-13.
- [14] VOOGT M,BOOTS M G,SCHAEFFER G J. Renewable electricity in a liberalised market-the concept of green certificates[J]. Energy & Environment,2000,11(1):65-79.
- [15] 任东明. 中国可再生能源配额制和实施对策探讨[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):25-28.
- REN Dongming. China's renewable portfolio standards and implementing countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(22):25-28.
- [16] MARIANO V,ALVARO B,ANDRES R,et al. Electricity market modeling trends[J]. Energy Policy,2005,33:897-913.
- [17] 王珺珺,谢贤亚,李晓刚,等. 简易当量电价法的解析表达及发电厂商古诺博弈行为初探[J]. 电力自动化设备,2003,23(1):61-64.
- WANG Junjun,XIE Xianya,LI Xiaogang,et al. Analytic expression of simple and easy electricity value equivalent method and primary discussion of Cournot duopoly in generation market[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(1):61-64.
- [18] 张宗益,郭兴磊,汪锋. 基于寡头竞争模型的金融输电权与市场力分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(6):30-33.
- ZHANG Zongyi,GUO Xinglei,WANG Feng. Analysis of financial transmission rights on market power based on oligopoly model[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(6):30-33.
- [19] 杨彦,陈皓勇,张尧,等. 基于协同进化算法求解寡头电力市场均衡[J]. 电力系统自动化,2009,33(18):42-46.
- YANG Yan,CHEN Haoyong,ZHANG Yao,et al. A coevolutionary approach to calculate equilibrium for oligopolistic electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(18):42-46.
- [20] SCHERER F M,ROSS D. Industrial market structure and economic performance[M]. 3rd ed. Boston,Massachusetts,USA:Houghton Mifflin Company,1990:208-213.
- [21] 宋依群,侯志俭,文福拴,等. 电力市场三种寡头竞争模型的市场力分析比较[J]. 电网技术,2003,27(8):10-15.
- SONG Yiqun,HOU Zhijian,WEN Fushuan,et al. Comparison of market power in three oligopoly models of electricity market[J]. Power System Technology,2003,27(8):10-15.
- [22] 袁智强,邓超平,蒋传文,等. 电力寡头垄断市场的均衡分析[J]. 继电器,2004,32(5):7-10.
- YUAN Zhiqiang,DENG Chaoping,JIANG Chuanwen,et al. Analysis of equilibrium in oligopolistic electricity market[J]. Relay,2004,32(5):7-10.
- [23] YIHUSU C,BENJAMIN F H. An oligopolistic power market model with tradable NO_x permits[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(1):119-129.
- [24] YIHUSU C,BENJAMIN F H,SVEN L,et al. Leader-follower equilibria for electric power and NO_x allowances markets[J]. Computational Management Science,2006,3(4):307-330.

- [25] YIHU C, WANG Lizhi. A power market model with renewable portfolio standards, green pricing and GHG emissions trading programs[C]//Proceedings of the Energy 2030 Conference. Atlanta, GA, USA; IEEE, 2008: 1-7.
- [26] EFTICHIOS S S. Tradeable emission permits regulations in the presence of imperfectly competitive product markets; welfare implications [J]. Environmental and Resource Economics, 1997 (9): 65-81.
- [27] LIND A, ROSENBERG E, SELJOM P, et al. Analysis of the EU renewable energy directive by a techno-economic optimisation model[J]. Energy Policy, 2013(60): 364-377.

作者简介:



钟宇峰

钟宇峰(1989-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与电力市场、分布式发电与储能(E-mail:yufengzhongee@gmail.com);

黄民翔(1955-),男,浙江杭州人,教授,主要研究方向为电网规划与电力市场;

文福拴(1965-),男,河南林州人,特聘教授,博士研究生导师,主要从事电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等方面的研究工作(E-mail:fushuan.wen@gmail.com)。

Equilibrium analysis of direct electricity purchase with green certificate mechanism

ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, WEN Fushuan, GONG Jianbo, WANG Yan

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A math model of oligopolistic market with direct electricity purchase is established and analyzed, which classifies the electricity producers as the price-leader, price-follower and price-recipient, considers the bilateral contracts and introduces the green certificate system to it. With an electric power market including five power generation corporations as an example, the influence of the bilateral contract amount, green certificate price and green power fluctuation on the market equilibrium is analyzed. The conclusions of analysis are: along with the increase of bilateral contract amount, the total power generation of power generation corporations increases while their total profit, as well as the electricity price, reduces; the green certificate price should be kept stable to avoid the serious fluctuation of electricity market and promote the development of renewable energy.

Key words: electricity market; transaction; green certificate; renewable energy; direct electricity purchase; oligopoly model; equilibrium analysis

(上接第143页 continued from page 143)

Multi-objective optimization and decision making of extended black-start scheme considering subsequent restoration influence

CHEN Liang¹, GU Xueping¹, JIA Jinghua²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Power Dispatch and Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: With the comprehensive consideration of initial and subsequent restoration stages, a multi-objective optimization model is built for the extended black-start schemes, which, with the constraints of unit startup and system operation, has three optimization objectives: maximize the weighted power generation during the initial stage, establish the system frame as soon as possible and select the black-start units beneficial to the subsequent regulation of system voltage. NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) and Dijkstra algorithm are applied to solve the model and obtain Pareto solutions, from which the best extended black-start scheme is selected by applying the Vague-set multi-attributes decision-making based on fuzzy entropy weight and combining the subjective preference of decision-maker with the objective information of decision matrix. The effectiveness of the proposed method is validated by the case study of New England 10-unit 39-bus power system.

Key words: electric power systems; black-start; system restoration; optimization; constraint; decision making; Vague sets; fuzzy entropy; models