

基于考虑碳减排技术和差别定价的 回购合同的电力供应链问题

卢靖蕾, 窦悦文, 党亚峥

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年1月30日; 录用日期: 2024年3月22日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

在传统发电公司对不同地区的用户实行差别定价政策的当下, 碳减排技术(CRT)情况使多数公司陷入两难境地。本文依此构建模型, 情形包括: 一、公司发现投资碳减排技术的利弊, 二、公司保持原有运营流程。同时模型内加入回购合同、收益合同, 在此基础上, 本文提出相关算法, 寻求在相关约束条件下各时段的最优电价、努力程度、储能设备服务面积、预防性维护预算和电力需求。最后, 本文对该模型进行数值分析, 求得弹性系数相关影响。结果显示CRT带来包括更高的利润、更高的电力需求要求以及针对供应链和发电公司更温和的价格波动, 同时电价的降低会为用户开启更少的储能设备。此外, 本文还意识到选择合适系数值的重要性, 测算发觉, 价格弹性系数的增加会导致电价的下降, 反之, 产出弹性系数的增加则会导致电价的上升。

关键词

电力供应链, 生产能力, 减碳技术, 差别定价, 回购合同

Electricity Supply Chain Issues Based on Repurchase Contracts Considering Carbon Emission Reduction Technologies and Differential Pricing

Jinglei Lu, Yuewen Dou, Yazheng Dang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 30th, 2024; accepted: Mar. 22nd, 2024; published: Mar. 29th, 2024

文章引用: 卢靖蕾, 窦悦文, 党亚峥. 基于考虑碳减排技术和差别定价的回购合同的电力供应链问题[J]. 理论数学, 2024, 14(3): 186-200. DOI: 10.12677/pm.2024.143098

Abstract

The carbon reduction technology (CRT) scenario puts most companies in a dilemma when conventional power generation companies have differentiated pricing policies for customers in different regions. This paper constructs a model accordingly, and the scenarios include: i) The company discovers the advantages and disadvantages of investing in carbon reduction technology, and ii) the company maintains the original operation process. At the same time, buyback contracts and revenue contracts are added to the model, based on which the paper proposes algorithms to seek the optimal tariff, effort, service area of energy storage equipment, preventive maintenance budget and power demand in each time period under the relevant constraints. Finally, this paper numerically analyzes the model to find the elasticity coefficient related impacts. The results show that CRT leads to, among other things, higher profits, higher power demand requirements, and milder price fluctuations for both the supply chain and the generating company, while lower electricity prices will turn on fewer energy storage devices for users. In addition, this paper recognizes the importance of choosing the right coefficient value, and finds that an increase in the price elasticity coefficient leads to a decrease in electricity prices, and conversely, an increase in the output elasticity coefficient leads to an increase in electricity prices.

Keywords

Electricity Supply Chain, Production Capacity, Carbon Reduction Technologies, Differential Pricing, Buy-Back Contracts

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自联合国人类环境会议(又称斯德哥尔摩会议)召开以来,环保人士和科学家纷纷致力于可再生能源的开发,以替代传统能源。发电公司和用户都高度重视环境保护,同样也在寻求更加环保的方法,即在电力供应链中引入碳减排技术,碳减排技术中包括可再生能源技术、核能以及碳捕获和储存技术。根据国际能源机构[1]统计,2000年至2020年间,全球可再生能源发电的净增总容量增长了10.675倍,预计2021年至2025年期间,太阳能的平均新增装机容量将达到125千兆瓦。随着太阳能的快速发展和覆盖范围的扩大,过去十年间,光伏发电系统的平均安装价格下降了70% [2]。智能电网通过建立通信平台,将发电公司、能源转换设备和用户连接在一起,用户可以通过智能电表显示的实时电价(RTP)调整用电量,减少电费支出,从而同时降低高峰时段的用电需求和波动率。在以往的电力行业研究中,RTP方案作为一种定价策略广泛存在[3],本文将继续使用RTP,以继承其在定价真实性和有效性方面的优势。

2. 理论基础

2.1. 分布式发电

根据Liu [4]相关研究,分布式发电是指在使用地点或附近发电的各种技术,包括太阳能光伏板(以下简称“太阳能板”)和储能装置。为了寻找分布式发电的最佳位置,Samper和Vargas [5]研究了分布式发电不确定性条件下的投资方案,其中考虑了相关位置、规模、类型、运行和时间。Tsao等人[6],通过使

用基于非线性优化的连续逼近方法,提高了集中式和分散式模型中分布式发电选址问题的效率。基于以上结论,本文减少讨论循环论证集中决策带来的益处,将重点放于两种方案的差异中,同时探究 CRT 给合作供电链成员的所带来的优势及好处。同时根据 Dong 等人[7]的研究,本文将分布式发电和储能设备之间的相互作用与连续近似方法相结合,进行讨论。

2.2. 碳交易计划

2018年发表的麦肯锡可持续发展报告[8]表明通过提高能效、碳捕集和其他相关技术,水泥、钢铁、合成氨和乙烯企业可以将二氧化碳排放量降至几乎为零。Wang 等人[9]通过元前沿 DEA 方法评估了 CRT 在电力行业项目层面的效率,证明碳捕集与封存技术的碳减排效率最高。根据上述研究成果,本文将构造相关模型,其中用户将被预设为环保倡导者,同时,本文将考虑碳交易计划是否能为传统发电企业投资 CRT 提供足够的激励这一相关问题。

2.3. 价格歧视

价格歧视是一种以不同价格向客户提供相同产品或服务的销售技巧。Simshauser [10]认为,当电力零售市场的大众市场出现竞争性时,电价自然会从两部制电价转向基于居民类型的歧视性价格。Chen 等人的研究[11]填补了排放交易计划中价格歧视对环境产生积极影响的理论空白。然而,现有研究还未考虑价格歧视政策中的生产率投入和地区综合技术水平,本文将研究了解相关生产率与用电量之间的联系。其中,本文所提出的相应产出弹性系数是受阿尔弗雷德·马歇尔(Alfred Marshall)的《经济学原理》(Principles of Economics [12])中的经济学规模收益(returns to scale)启发的简单版本,其评估的是用户从单位投入中获得的边际产出。规模由生产率投入和综合技术水平表示。

2.4. 努力程度

“努力程度”指供应链中为增加客户需求和超越营销目标而提高雇佣率或增加广告预算等行为。提高供应链效率的关键在于强调团队精神和合作。El-Khattam 等人[13]基于成本效益分析提出了一种新的分布式发电能力投资规划启发式方法,并得出了在竞争性电力市场拍卖与固定双边合同情况下的最优可行方案。然而以往的研究没有充分考虑现实中的电力供应链问题合同的多样性和参与者的努力程度等特征。本文研究将填补电力供应链中回购合同和收益分享合同组合中努力程度混合的空缺,同时也探究当部分发电过程由用户决定时,用户所做的用电决策。

3. 电力供应链问题

本文提出电力供应链问题包含两类:一类是完全有能力以传统方式提供电力的发电公司,另一类是拥有分布式发电技术的用户,本文以太阳能电池板为例(其中用户拥有储能设备的运营权(图 1))。由于用户不希望耗尽储能设备,也不希望由于最高极限工作或其他与保护相关的原因而缩短储能设备的使用寿命,因此用户有理由参与确定储能设备的容量和服务区域,以实现自身利益的最大化。在本文的模型中 T 表示时间段($t=1,2,3,\dots,T$)表示一天被划分成的时间段,而 $N(i=1,2,3,\dots,N)$ 表示一组储能服务区。

本文将在每个特定时隙开始时,计算一次服务区的大小,表示为 A_i^t ,并因为其随时间变化而变化,本文将会在每个特定时隙开始时计算一次,然后出于简单起见,默认将其置于服务区的中心,从而解决储能设备位置问题。同时为了解决需要服务的储能设备的数量,本文效仿 Tsao [14]的做法,假设发电公司服务于一个大的服务区域,然后按功能划分为若干子区域。这些子区域命名为 d_i ,区域总和为 N ,同时,其内部用户的决策完全相同,例如是否应加大力度生产更多的可再生能源等相关决策。每个区

都共享相同的需求函数。 D_i^t 在每个区域内共享，同时 $\frac{d_i}{A_i^t}$ 储能装置。

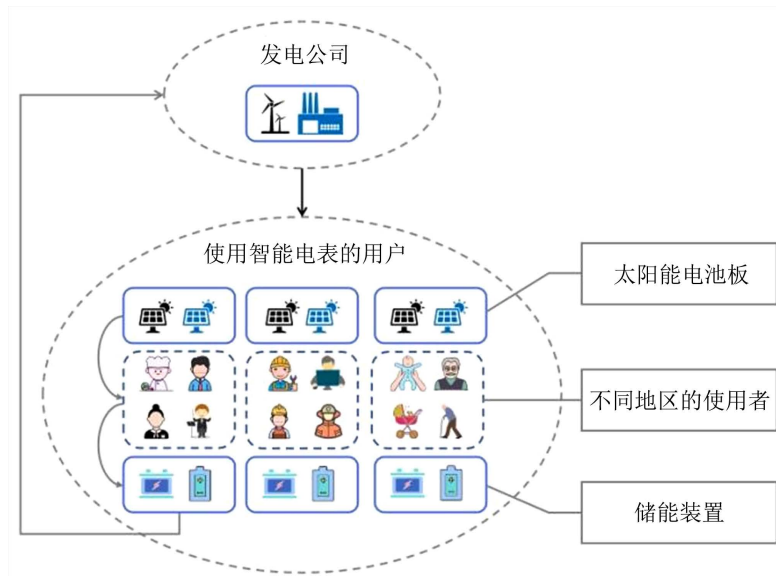


Figure 1. Conceptual diagram of the power supply chain problem
图 1. 电力供应链问题概念图

用户和发电公司签订了两份合约。第一份合约允许用户将太阳能转化成的未使用电力卖回给发电公司，但在每个时段中，先储存在储能设备中；第二份合同规定了双方从碳交易收益中获得的比例。每个用户都有一个智能电表，该电表控制着用电量和回售给发电公司的环保电力。用户对电力的需求函数定义为一个与时间、地区、价格和生产率相关的函数，如下所示： $D_i^t = M_i - \beta_i^t (P_i^t)^{-\alpha_i} + \theta_i (F_i^t)^{\varepsilon_i}$ 随着 $t=1,2,3,\dots,T$ 和 $i=1,2,3,\dots,N$ ， M_i 是用户电力需求的上限、 P_i^t 是单位实时电价， F_i^t 是地区的生产力投入，如 i 地区的人力资源。 β_i^t 是需求转移参数， θ_i 代表给定的 i 地区综合技术水平。 α_i ($\alpha_i < 0$) 和 ε_i 分别表示价格和产出弹性系数。

供应链中追求互利的成员一直为合约的典型范例，因此本文希望将这一概念应用至模型中。发电公司和用户共同确定最优电价 (P_i^t)、发电公司所需的预防性维护预算 (PM_i)、储能设备的服务区域 (A_i^t)，以及用户升级或扩大自装太阳能电池板的努力程度 (e_i^t) 同步进行，以达到双赢的效果。本文的模型创建了两种情景，即碳减排情景和原始情景。本文将假定的参数和变量集合在表 1 中。

Table 1. Related nomenclature
表 1. 相关命名表

缩略语		术语	
		参数和常数	
SC	原始场景的供应链	M_i	i 区用户用电需求的上限
SC^{CR}	碳减排情景下的供应链	β_i^t	时间 t 区域 i 的需求转移参数
CP	公司视角	θ_i	i 区综合技术水平
UP	用户视角	F_i^t	i 区生产力投入
		x	照明随机性的模拟变量

续表

索引		b	合同回购价格
t	时隙索引($t=1,2,3,\dots,t$)	φ	用户在碳交易中获得的合约收益分享比例
i	地区索引($i=1,2,3,\dots,N$)	C_{ce}	每碳单位的碳成本
变数		σ	单位发电量的碳排放系数
e_i^t	时间 t 区域 i 的努力水平	C_E	升级或消费太阳能电池板的平均成本
A_i^t	时间 t 区 i 储能装置服务区	C_{sp}	单位太阳能电池板的维护成本
PM_i	i 区预防性维护预算	IC_i	i 区单个储能装置的安装成本
P_i^t	时间 t 地区 i 的电价	C_{OM}	整个服务区域内每个储能装置的运维统一费率
D_i^t	时间 t 区 i 用户用电需求函数	C_L	单位电力损失成本
PG_i^t	太阳能电池板转化的能量	r	电阻率
弹性系数		S	横截面积
ε_i	i 区价格弹性系数	C_G	发电公司的发电成本
a_i	i 区产出弹性系数	IC_{CR}	发电公司碳减排技术的单位投资成本
		C_M	发电公司单位检修费用
		$a_i \cdot b_i \cdot Y$	失效率函数的加权系数

4. 模型组件

在开始构建模型之前,本文首先罗列出用户太阳能电池板转化的电能(PG_i^t)的表达式,并假定其与用户的努力程度有关。由此得出

$$PG_i^t = (1 + e_i^t) g \int_0^{t+1} f(x) dx \quad (1)$$

其中 e_i^t 是在 t 时间内 i 区的努力程度, g 是单位太阳能电池板产生的正常能量、 x 模仿照明的随机性、 $f(x)$ 是 x 为, $\int_0^{t+1} f(x) dx$ 是时间 t 和 $t+1$, e_i^t 前的 1 是为了保证模型中太阳能电池板的存在。以下各小节将按供应链成员介绍本文的模型。

4.1. 用户

4.1.1. 收入构成

在传统发电的时代,作为一种毫无争议的单向交易,用户不参与发电过程。然而,随着绿色电力的引入,情况发生改变。通过安装太阳能电池板或应用其他新型技术将可再生能源转化为电力,用户可以获得相关收益。相关详情如下。

根据回购合同,销售收入的计算公式为

$$BR = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} b (PG_i^t - D_i^t) \quad (2)$$

其中 b 是合同回购价格。

(1) 根据《京都议定书》,通过减少碳排放,用户可以获得收益。由于将未使用的绿色电力出售给发电公司的情况时有发生,且数量极难预测,因此在用户和发电公司之间分配收益的最公平方式是签订另一份合同,并预设参数 φ , φ 为用户在碳交易中获得的合同收益分配比例、 C_{ce} 是每个碳单位的碳成本, σ 是单位发电量的碳排放系数。从而增加本模块的收益。因此,用户的碳交易收入列式为公式(3):

$$CT^{User} = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \varphi C_{ce} \sigma PG_i^t \quad (3)$$

4.1.2. 成本构成

(1) 考虑到每个用户的参与努力程度，太阳能电池板消耗费用可表示为

$$SP = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 + e_i^t) C_E \quad (4)$$

其中 C_E 是更新或消耗太阳能电池板的平均成本，如清洗电池板以提高照明接收效率、扩大电池板面积以产生更多能量。

(2) 太阳能电池板在长期的日常使用中，出现漏电、破裂、鼓包、变形等情况是不可避免的。每个用户的太阳能电池板维护费可表示为

$$SM = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 + e_i^t) C_{SP} \quad (5)$$

其中 C_{SP} 是每块太阳能电池板的平均维护成本。

(3) 在小区安装储能设备的安装费可表示为 i 可表示为

$$IF = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} IC_i \quad (6)$$

其中 IC_i 是 i 地区单个储能设备的安装成本。

(4) i 地区储能设备的运行和维护成本可表示为

$$OM = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} C_{OM} PG_i^t \quad (7)$$

其中 C_{OM} 是整个服务区域内每个储能设备的运营和维护统一费率。

(5) 电能从储能装置传输到发电公司时的损耗成本可表示为

$$PL = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} C_L \frac{r \sqrt{A_i^t}}{S} \cdot \frac{(PG_i^t - D_i^t)^2}{(V_i)^2} \quad (8)$$

其中 r 是电阻率、 C_L 是每度电的功率损耗成本、 $\sqrt{A_i^t}$ 是线路截面长度， S 是横截面积。

(6) 使用发电公司电力的成本可以表示为

$$EC = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} P_i^t (D_i^t - PG_i^t) \quad (9)$$

4.2. 发电公司

4.2.1. 收入构成

(1) 向用户销售传统电力的销售收入可表示为

$$SR = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} P_i^t (D_i^t - PG_i^t) \quad (10)$$

(2) 发电公司的碳交易销售收入可表示为

$$CT^{Com} = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 - \varphi) C_{ce} \sigma PG_i^t \quad (11)$$

4.2.2. 成本构成

(1) 公司在 t 时间为 i 地区生产的电力成本可表示为

$$EG = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} C_G (1 + l) (D_i^t - PG_i^t) \quad (12)$$

其中 C_G 是单位发电成本，而 l 是线路段输电过程中的电能损耗率 ($0 \leq l \leq 1$)。

(2) 在 t 时间内 i 地区碳减排情景下的碳减排技术投资成本可表示为

$$CR = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} IC_{CR} (1+l)(D_i^t - PG_i^t) \quad (13)$$

(3) 根据 Firouz 和 Ghadimi [15] 研究发现, 维护成本是不可或缺的, 因此公司需要维修设备、支付人力资源以及在所供应的能源不能满足用户需求时支付罚金:

$$MF = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} [(a_i + b_i e^{-\gamma PM_i}) C_M + PM_i] \quad (14)$$

其中 $a_i + b_i e^{-\gamma PM_i}$ 是故障率, 而 C_M 是单位维护成本。

(4) 碳排放成本可表示为

$$CCE = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} C_{ce} \sigma (1+l)(D_i^t - PG_i^t) \quad (15)$$

(5) 执行回购合同向用户支付的费用可以表示为

$$BF = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} b(PG_i^t - D_i^t) \quad (16)$$

5. 模型构建与分析

5.1. 模型构建

供应链是允许独立成员合作并实现互利最大化的巨大贡献之一。在本文的模型中, 发电公司和用户共同决定最佳电价、预防性维护预算、努力程度和储能设备的容量。根据 CRT 使用情况, 本文形成以下两个目标函数:

$$\begin{aligned} & \max SC^{CR} (P_i^t, PM_i, e_i^t, A_i^t) \\ & = BR + CT^{User} + SR + CT^{Com} - SP - SM - IF - OM \\ & \quad - PL - EC - EG - CR - MF - CCE - BF \\ & = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} b(PG_i^t - D_i^t) + \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \varphi C_{ce} \sigma PG_i^t + \sum_{i=1, t=1}^{N, T} P_i^t (D_i^t - PG_i^t) \\ & \quad + \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 - \varphi) C_{ce} \sigma PG_i^t - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 + e_i^t) C_E - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 + e_i^t) C_{SP} \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} IC_i - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} C_{OM} PG_i^t - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} C_L \frac{r\sqrt{A_i^t}}{S} \cdot \frac{(PG_i^t - D_i^t)^2}{(V_i)^2} \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} P_i^t (D_i^t - PG_i^t) - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} C_G (1+l)(D_i^t - PG_i^t) \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} IC_{CR} (1+l)(D_i^t - PG_i^t) - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} [(a_i + b_i e^{-\gamma PM_i}) C_M + PM_i] \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} C_{ce} \sigma (1+l)(D_i^t - PG_i^t) - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} b(PG_i^t - D_i^t) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \max SC (P_i^t, PM_i, e_i^t, A_i^t) \\ & = BR + SR - SP - SM - IF - OM - PL - EC - EG - MF - CCE - BF \\ & = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} b(PG_i^t - D_i^t) + \sum_{i=1, t=1}^{N, T} P_i^t (D_i^t - PG_i^t) - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 + e_i^t) C_E \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 + e_i^t) C_{SP} - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} IC_i - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} C_{OM} PG_i^t \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} C_L \frac{r\sqrt{A_i^t}}{S} \cdot \frac{(PG_i^t - D_i^t)^2}{(V_i)^2} - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} P_i^t (D_i^t - PG_i^t) \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} C_G (1+l)(D_i^t - PG_i^t) - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} [(a_i + b_i e^{-\gamma PM_i}) C_M + PM_i] \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} C_{ce} \sigma (1+l)(D_i^t - PG_i^t) - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} b(PG_i^t - D_i^t) \end{aligned} \quad (18)$$

其中 SC^{CR} 代表碳减排方案, SC 代表原始方案。由于分析相似性, 本文将主要集中于第一种情景。

由于预防性维护预算不是随时间变化的, 因此在求解公式(18)时, 本文首先要通过 PM_i 的最优值来计算其二阶导数来获得其最优值, 并在解析表达式中证明其负值, 并证明其在解析表达式中为负值, 这就证明了 PM_i 具有最大值。然后本文将其一阶导数值设为零, 得到 PM_i^* 。

$$\frac{\partial^2 SC^{CR}}{\partial (PM_i)^2} = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} -\gamma^2 C_M b_i e^{-\gamma PM_i} < 0 \tag{19}$$

$$PM_i^* = -\frac{1}{\gamma} \ln \left[\frac{1}{\gamma C_M b_i} \right] \tag{20}$$

将公式(20)代入公式(18), 并重新执行上述过程, 本文将单变量导数升级为赫西矩阵, 从而确认 SC^{CR} 的全局最大点是否存在, 同时本文将得到关于 A_i^* 和 e_i^* 的解析式。

$$A^{SC^{CR}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 SC^{CR}}{\partial (e_i^t)^2} & \frac{\partial^2 SC^{CR}}{\partial e_i^t \partial A_i^t} \\ \frac{\partial^2 SC^{CR}}{\partial A_i^t \partial e_i^t} & \frac{\partial^2 SC^{CR}}{\partial (A_i^t)^2} \end{bmatrix} \tag{21}$$

其主要最小值主减数 $A^{SC^{CR}}$ 的计算如下

$$D_1 = -\frac{2 \left(\int_t^{t+1} f(x) dx \right)^2 d_i C_L r \sqrt{A_i^t}}{A_i^t S(V_i)^2} < 0 \tag{22}$$

$$D_2 = \left[\int_t^{t+1} f(x) dx \right]^2 (d_i)^2 \left[\frac{4 C_L r \sqrt{A_i^t} I C_i - (C_{OM})^2 S(V_i)^2 + 2 C_L r \sqrt{A_i^t} C_{OM} (P G_i^t + D_i^t)}{(A_i^t)^4 S(V_i)^2} + \frac{(P G_i^t - D_i^t)^2 (C_L r)^2}{2 (A_i^t)^3 S^2(V_i)^4} \right] > 0 \tag{23}$$

通过比较 D_1 和 D_2 的相对值为零, 本文可以说明矩阵 $A^{SC^{CR}}$ 为负定值, 从而表明 SC^{CR} 与 A_i^t 和 e_i^t 的表达式。 A_i^{t*} 和 e_i^{t*} 的表达式如下

$$A_i^{t*} = \frac{4 S^2(V_i)^4 [I C_i + C_{OM} P G_i^t]^2}{r^2 (C_L)^2 (P G_i^t - D_i^t)^4}, \tag{24}$$

$$e_i^{t*} = \frac{S(V_i)^2 \left[A_i^t C_{ce} \sigma g \int_t^{t+1} f(x) dx - A_i^t (C_E + C_{SP}) - d_i C_{OM} g \int_t^{t+1} f(x) dx + A_i^t (C_G + I C_{CR} + C_{ce} \sigma)(1+l) g \int_t^{t+1} f(x) dx \right] + 2 \left[D_i^t - g \int_t^{t+1} f(x) dx \right] d_i C_L r \sqrt{A_i^t} g \int_t^{t+1} f(x) dx}{2 d_i C_L r \sqrt{A_i^t} \left[\int_t^{t+1} f(x) dx \right]^2 g^2}. \tag{25}$$

以下目标函数旨在分别实现用户和发电公司的利润最大化:

$$\begin{aligned} & \max UP^{CR} (A_i^t, e_i^t) \\ & = BR + CT^{User} - SP - SM - IF - OM - PL - EC \\ & = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} b (P G_i^t - D_i^t) + \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \varphi C_{ce} \sigma P G_i^t - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 + e_i^t) C_E \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 + e_i^t) C_{SP} - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} I C_i - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} C_{OM} P G_i^t \\ & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} \frac{d_i}{A_i^t} C_L \frac{r \sqrt{A_i^t}}{S} \cdot \frac{(P G_i^t - D_i^t)^2}{(V_i)^2} - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} P_i^t (D_i^t - P G_i^t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \max CP^{CR}(P_i^t, PM_i) \\
 & = SR + CT^{Com} - EG - CR - MF - CCE - BF \\
 & = \sum_{i=1, t=1}^{N, T} P_i^t (D_i^t - PG_i^t) + \sum_{i=1, t=1}^{N, T} (1 - \varphi) C_{ce} \sigma PG_i^t - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} C_G (1 + l) (D_i^t - PG_i^t) \\
 & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} IC_{CR} (1 + l) (D_i^t - PG_i^t) - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} [(a_i + b_i e^{-\gamma PM_i}) C_M + PM_i] \\
 & \quad - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} C_{ce} \sigma (1 + l) (D_i^t - PG_i^t) - \sum_{i=1, t=1}^{N, T} b (PG_i^t - D_i^t)
 \end{aligned}$$

为了获得供应链的最大利润，找到最优电价，在以下约束条件的前提下，本文通过算法得出相关结果。相关制约因素。电价的合理性由于是最关键的，最终电价应该对发电公司有利，同时为了保障用户购电意愿，获得用户需求的积极性，电价必须高于单位发电成本 C_G 。

该约束条件可表述如下

$$\psi = \left[C_G, \left[\frac{M_i + \theta_i (F_i^t)^{\alpha_i}}{\beta_i^t} \right]^{\frac{1}{\alpha_i}} \right]$$

在上述约束条件的参与下，本文提出了以下算法来确定最优电价 P_i^{t*} 并进一步获得其余决策变量。最后一步计算目标函数值。虽然该算法是围绕 SC^{CR} ， SC ，但它与原始方案完全一致。

5.2. 算法

5.2.1. 步骤一

验证 $\frac{\partial^2 SC^{CR}(P_i^t)}{\partial (P_i^t)^2}$ 如果答案较小，则求解 $\frac{\partial SC^{CR}(P_i^t)}{\partial P_i^t} = 0$ 得出 P_i^{t*} 。如果 $P_i^{t*} \in \psi$ 则 $P_i^{t**} = P_i^{t*}$ 从而得到 P_i^t

达到最优解。则进入步骤 3；否则进入步骤 2。

步骤 2：在上述限制条件下，搜索 P_i^t 的最优值。

5.2.2. 步骤二

(1) 步骤 2.1

从 $(P_i^t)^k = C_G$ ($k=1$) 开始，每一步 $k = k + 1$ ， P_i^t 增加 1/1000 并计算出相应的 $SC^{CR}(P_i^t)^k$ 计算出相应

的重复此步骤，直到 $k = K$ 其中 $(P_i^t)^k = \left[\frac{M_i + \theta_i (F_i^t)^{\alpha_i}}{\beta_i^t} \right]^{\frac{1}{\alpha_i}}$ 。

(2) 步骤 2.2

让 $SC^{CR*}(P_i^{t**}) = \max_{P_i^t \in \psi} \{SC^{CR}(P_i^t)^k\}$ 进入步骤 3。

5.2.3. 步骤 3

获取 $A_i^{t**}(P_i^{t**})$ 和 $e_i^{t**}(P_i^{t**})$ 和 $P_i^t = P_i^{t**}$ 代入公式(24)和(25)，得到供应链可以达到的最大利润，即 $\max \{SC^{CR}\} = SC^{CR**}(P_i^{t**}, PM_i^*, e_i^{t**}, A_i^{t**})$ ，并停止。

6. 数值分析

6.1. 数值示例

本文的微型发电网络的服务区域被设定为 950 km²，并进一步划分为三个较小的区域“住宅区”、“商

业区”和“工业区”(N=3), 分别为 $d_1 = 200 \text{ km}^2$, $d_2 = 300 \text{ km}^2$ 和 $d_3 = 450 \text{ km}^2$ 。同一地区内各用户的需求函数是共享的, 最大电力需求量预设为 $M_i = (1200, 3500, 6000) \text{ kW} \cdot \text{h}$, 价格和产出这两个弹性系数的初始值分别为 $\alpha = -1.5$ 和 $\varepsilon_i = 0.95$ 。表2和表3分别列出了不同地区功能和时段的需求转移参数输入值和生产力投入系数, 其它部分参数均在研究参考文献[15] [16]后选定。

Table 2. Input values β_i^t for demand shift parameters

表 2. 需求转移参数的输入值 β_i^t

β_i^t	$t=1$ 00:00~03:00	$t=2$ 03:00~06:00	$t=3$ 06:00~09:00	$t=4$ 09:00~12:00	$t=5$ 12:00~15:00	$t=6$ 15:00~18:00	$t=7$ 18:00~21:00	$t=8$ 21:00~24:00
$i=1$	7000	5800	4100	3800	3400	3500	3850	6200
$i=2$	15800	13800	11000	8600	8500	9200	11000	15700
$i=3$	16800	14300	6300	4800	4500	5000	9000	16000

Table 3. Input values F_i^t for productivity input coefficients

表 3. 生产力投入系数的输入值 F_i^t

F_i^t	$t=1$ 00:00~03:00	$t=2$ 03:00~06:00	$t=3$ 06:00~09:00	$t=4$ 09:00~12:00	$t=5$ 12:00~15:00	$t=6$ 15:00~18:00	$t=7$ 18:00~21:00	$t=8$ 21:00~24:00
$i=1$	5	12	22	28	35	37	38	10
$i=2$	20	25	60	100	125	105	30	30
$i=3$	3	12	30	60	65	70	35	10

算法计算出的数值结果显示, 碳减排方案可实现的最大利润为 $SC^{CR} = 1038122.2271$, 其中 $UP^{CR} = -4647531.2911$ 和 $CP^{CR} = 5685653.5462$ 。对比原始方案的最优值 $CP = 2046511.3809$, 得出结论, 投资碳减排技术导致供应链和发电公司的利润增加。对于未来补贴的重新分配, 用户和发电公司可以重新协商合同规定的收益分配比例 φ 。合同中的回购价格 b 可被调整, 当 b 被调整为0.6时, 表4和表5列出了各地区的综合技术水平和预防性维护预算的最佳值。

Table 4. Inputs θ_i for the level of integrated technology

表 4. 综合技术水平的输入值 θ_i

i	1	2	3
θ_i	3	8	20

Table 5. Optimal values for preventive maintenance budgets in power generation companies

表 5. 发电公司预防性维护预算的最佳值

i	1	2	3
PM_i^*	17.1585	28.2462	46.0437

本文将数值结果进行整理, 按各区的每日例行公事绘制图表, 使用线性插值法模拟时间段内的变化趋势。

图2展示了两种方案的用电需求, 当CRT参与时, 用户的用电需求更高。对比发现工业区的需求缺口最大, 而住宅区的需求缺口最小。工业区需求骤减的原因可能是相应时段的电价过高, 从而刺激用户相较于发电公司的传统电力, 选择使用自家的太阳能电池板。总体而言, 住宅区的用电需求最小, 波动较为平缓, 而工业区的用电需求最大(尤其是在工作时间)。

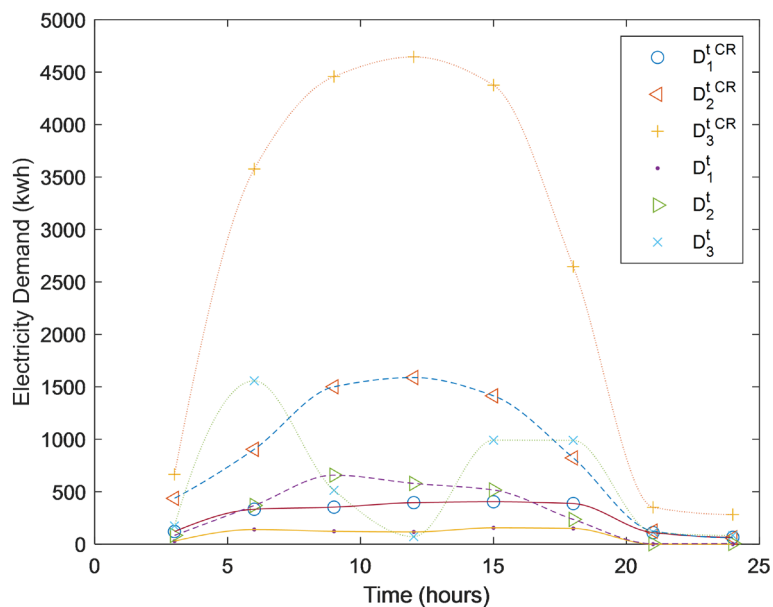


Figure 2. Electricity demand for carbon reduction scenario and original scenario
图 2. 碳减排方案和原始方案的电力需求

图 3 显示了用户在两种场景下选择的最佳努力程度，其中减碳场景下的努力程度较高，反映了用户在 CRT 参与后热衷于使用太阳能电池板。在这一场景中，努力水平也显得更加稳定，商业区最高，住宅区和工业区次之。该现象原因为由于工业区的用电需求远高于其他两个区，太阳能电池板的投资和维护成本都很昂贵，过度依赖自用太阳能电池板会使日常生产成本相当高，因此使用传统电力是一种更节俭的选择，这也再次说明为何工业区电价较高。现实生活中，若更多的人投入到太阳能电池板升级或其他可再生能源转换设备中，使平均使用价格下降，工业区的用户可能会为环境保护做出更大

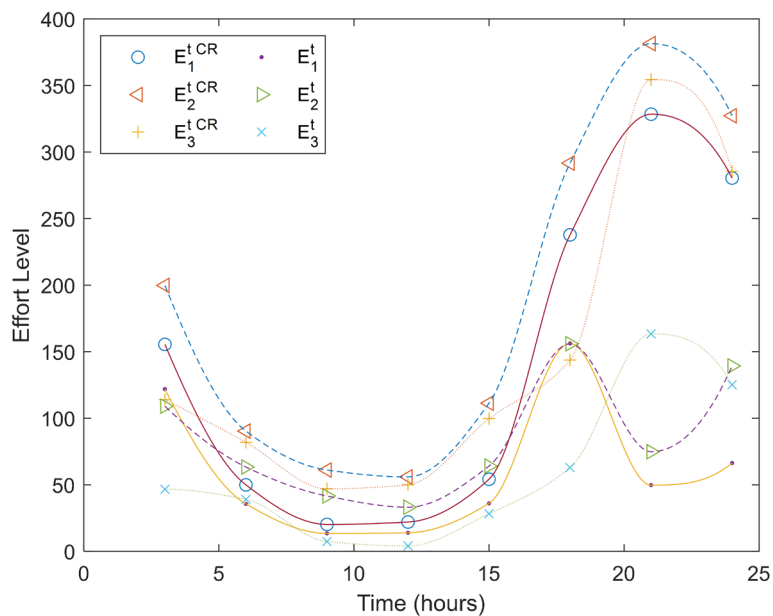


Figure 3. Level of effort for carbon reduction programs and original programs
图 3. 碳减排方案和原始方案的努力程度

的贡献。

图 4 显示了两种情况下储能设备的服务区域，并展示了三种相当平行的线路组合。与其他两个区域相比，住宅区的用电需求较低，因此储能设备的服务面积较大。此外，因为用户在减碳方案中投入了更多的精力，CRT 参与时的服务面积也更大，提高了储能设备的效率，有效减少了设备的开启数量。

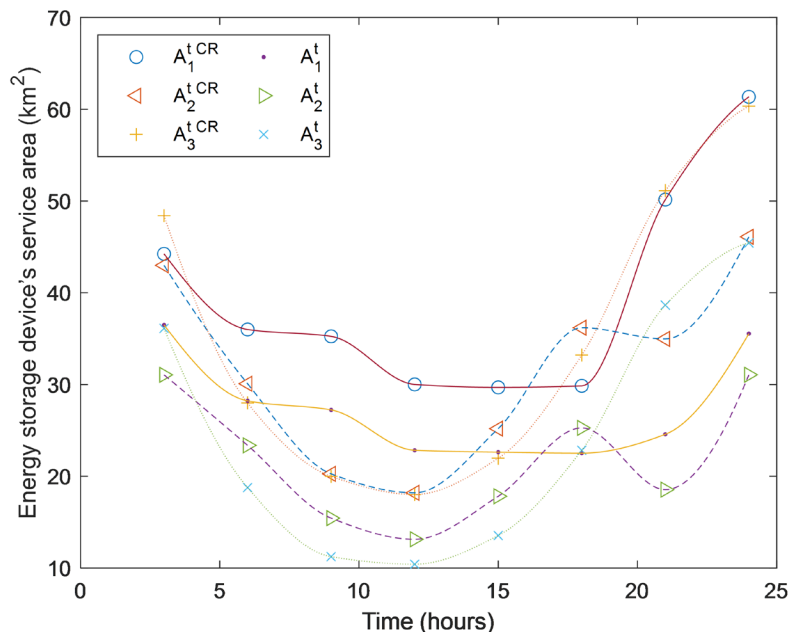


Figure 4. Service areas for energy storage equipment in the carbon reduction scenario and original scenario

图 4. 碳减排方案和原始方案中储能设备的服务区域

表 6 列出了需要开启的储能设备数量，为上述结论提供了支持。每个地区的结果是根据最小储能设备的服务区在该地区本身所占的相对比例计算得出的。一般来说，CRT 可将所需的储能设备数量减少到 43.18%，根据工业区的结果，CRT 在节约总成本方面做出了贡献。

Table 6. Number of energy storage devices to be turned on

表 6. 需要开启的储能设备数量

i	1	2	3
Carbon Reduction Scenario	7	17	25
Original Scenario	9	23	44

6.2. 敏感性分析

在本节中对价格弹性系数 α_i 和产出弹性系数 ε_i 进行了敏感性分析，以了解它们对电价的影响。

本文首先调整 α_i 。在第 6.1 中， α_i 设定为 -1.5，在本节中， α_i 改为 -1.6 和 -1.4。图 5 展示了结果并提供了直观的比较。

在所有三个 α_i 时，工业区的电价保持最高，而其他两区的情况则较为复杂。住宅区的电价与商业区的电价相交，当 $\alpha_i = -1.6$ 时，居民区电价与商业区电价相交。 $\alpha_i = -1.4$ 时，住宅区用户比商业区用户支付更多电费，研究表明价格弹性系数对电价的影响。当弹性系数相同时，两区电价差距明显，每度电几

乎相差 0.05 元。此外，当 $\alpha_i = -1.6$ 时，电价较高，横向比较 $\alpha_i = -1.4$ 时，电价较低。

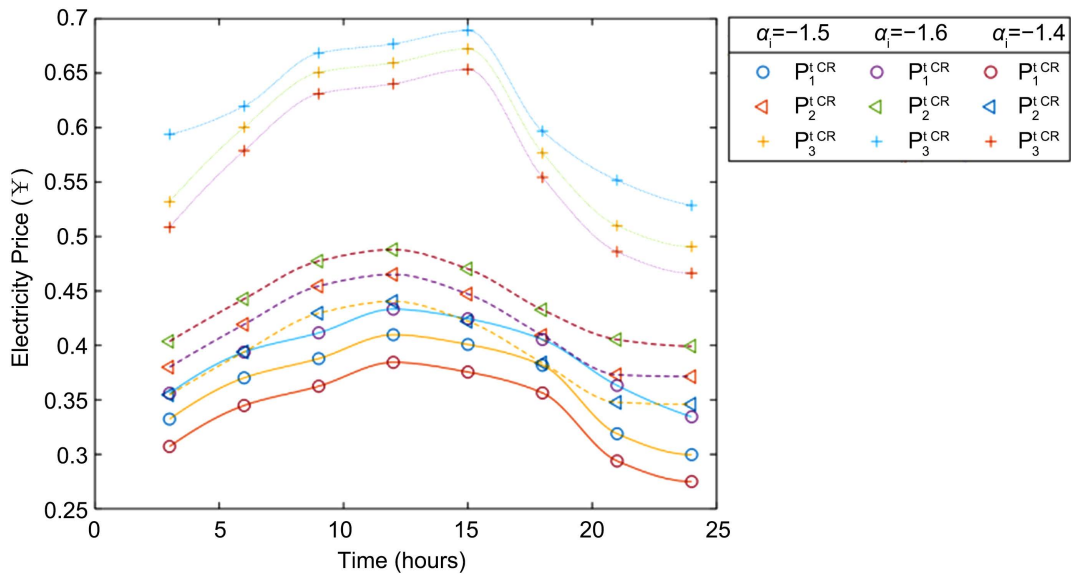


Figure 5. Electricity prices α_i in the three regions for different values of the price elasticity coefficient
图 5. 不同价格弹性系数值下三个地区的电价 α_i

产出弹性系数 ε_i 模仿了规模收益理论。在第 6.1 节中，本文将 ε_i 定为 0.95，代表规模报酬递减，现在在第 6.2 节中，本文想了解当地区生产率设定为规模报酬不变(即 $\varepsilon_i = 1$)和规模收益递增($\varepsilon_i = 1.05$)，图 6 展示了结果。

电价的分布保持了工业区最高、住宅区次之的格局，但在横向比较电价时，出现了一个有趣的现象。在 ε_i 从 0.95 到 1.05 的过程中，工业区受到的影响最大。 $\varepsilon_i = 1$ 至 $\varepsilon_i = 1.05$ ，而住宅区的变化似乎相当温

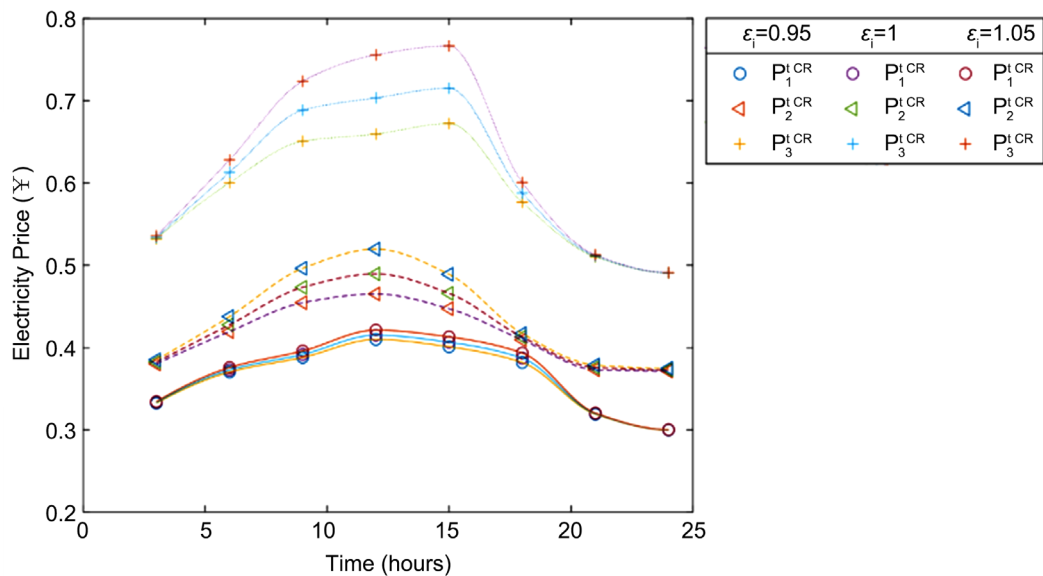


Figure 6. Electricity prices ε_i in all three regions for different values of the output elasticity coefficient
图 6. 不同产出弹性系数值下所有三个地区的电价 ε_i

和。这可以用各区的功能来解释,工业区通常具有较高的生产率(如表 3 所示),因此产出弹性系数的增加会直接导致生产量的增加,从而增加用电需求。

7. 结论

本文的研究重点为智能电网背景下的动态定价电力供应链问题。结果证明碳减排技术相对于传统发电方式拥有优势显著提高了发电公司和整个供应链的利润。碳减排技术带来的其他积极影响如下:电力需求增加直接增加了上述收入;电价降低使用户受益并提高了他们的使用需求、参与和升级可再生能源技术的积极性等。敏感性分析结果表明选择合适的系数值重要性。较低的价格弹性系数值和较高的产出弹性系数值都会导致三个地区的电价上涨。

本文为智能电网、可再生能源技术和碳减排技术的推广描绘了美好的前景。将差别定价政策、回购和收益分享合同与自主选择的努力程度相结合的供应链概念,使发电公司和用户能够合作,从而达成解决这一电力供应链问题的最佳方案。未来,本文希望继续研究在签订其他合同而非回购合同时,根据用户用电量进行差别定价的数量折扣合同,或将需求函数转换为其他形式时发生的情况,从而力求更适合当前电力供应链问题的方案。

参考文献

- [1] IEA (2021) Renewables 2021, Chapter 1, Renewable Electricity. <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>
- [2] SEIA (2021) Solar Market Insight Report 2021 Q4. <https://www.seia.org/research-resources/solar-market-insight-report-2021-q4>
- [3] Zhang, X.L., Yang, X.Y., Lin, J., Xu, G.B. and Yu, W. (2017) On Data Integrity Attacks against Real-Time Pricing in Energy-Based Cyber-Physical Systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, **28**, 170-187. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2016.2546259>
- [4] Liu, Z.Y. (2015) Global Energy Interconnection. Academic Press, London, 239-272. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804405-6.00006-3>
- [5] Samper, M.E. and Vargas, A. (2013) Investment Decisions in Distribution Networks under Uncertainty with Distributed Generation Part I: Model Formulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 2331-2340. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2239666>
- [6] Tsao, Y.C. and Vu, T.L. (2019) Power Supply Chain Network Design Problem for Smart Grid Considering Differential Pricing and Buy-Back Policies. *Energy Economics*, **81**, 493-502. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.04.022>
- [7] Dong, Q.Y., Pan, S.G. and Liu, X. (2018) Real-Time Load Regulation Based on Energy Storage Systems and the Study of Controller. *Electrical & Energy Management Technology*, **2**, 60-63+82.
- [8] Pee, A., Pinner, D., Roelofsen, O., Somers, K., Speelman, E. and Witteveen, M. (2018) Decarbonization of Industrial Sectors: The Next Frontier. McKinsey Sustainability, 2018.
- [9] Wang, N.N., Chen, J., Yao, S.N. and Chang, Y.C. (2018) A Meta-Frontier DEA Approach to Efficiency Comparison of Carbon Reduction Technologies on Project Level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 2606-2612. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.088>
- [10] Simshauser, P. (2018) Price Discrimination and the Modes of Failure in Deregulated Retail Electricity Markets. *Energy Economics*, **75**, 54-70. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.007>
- [11] Chen, Z., Su, Y., Wang, X.Y. and Wu, Y. (2021) The Price Discrimination and Environmental Effectiveness in Carbon Emission Trading Schemes: A Theoretical Approach. *Journal of Cleaner Production*, **283**, Article ID 125196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125196>
- [12] Marshall, A. (1920) Principles of Economics. 8th Edition, Book V, Macmillan and Co., London.
- [13] El-Khattam, W., Bhattacharya, K., Hegazy, Y. and Salama, M.M.A. (2004) Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market. *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, 1674-1684. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.831699>
- [14] Tsao, Y.C., Mangotra, D., Lu, J.C. and Dong, M. (2012) A Continuous Approximation Approach for the Integrated Facility-Inventory Allocation Problem. *European Journal of Operational Research*, **222**, 216-228. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.04.033>

- [15] Firouz, M.H. and Ghadimi, N. (2016) Optimal Preventive Maintenance Policy for Electric Power Distribution Systems Based on the Fuzzy AHP Methods. *Complexity*, **21**, 70-88. <https://doi.org/10.1002/cplx.21668>
- [16] Khosrojerdi, A., Zegordi, S.H., Allen, J.K. and Mistree, F. (2016) A Method for Designing Power Supply Chain Networks Accounting for Failure Scenarios and Preventive Maintenance. *Engineering Optimization*, **48**, 154-172. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2014.998662>