

基于CVaR的智能电网供应链价格补贴及返利契约协调研究

赵峰*, 党亚峥

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2022年8月2日; 录用日期: 2022年9月14日; 发布日期: 2022年9月26日

摘要

以由供电商与电网运营商之间构成的二级智能电网供应链为研究对象, 且二者相互独立。本文从风险中性、风险规避型电网运营商与风险中性供电商之间的利益关系去研究电网供应链的协调问题, 并建立价格补贴及返利契约模型, 以此分析智能电网供应链中各成员是否能够通过契约达到利益相对平衡关系, 同时实现整体电网供应链协调。采用条件风险价值(CVaR)研究风险规避型电网运营商与供电商之间的契约关系, 及实现供应链协调。数值分析中, 验证了价格补贴及返利契约可以通过协调补贴与返利参数实现收益的合理分配, 并体现了该契约下电网供应链实现协调的可行性。

关键词

智能电网, 供应链, 条件风险价值(CVaR), 价格补贴及返利契约

CVaR-Based Smart Grid Supply Chain Price Subsidy and Rebate Contract Coordination Research

Feng Zhao*, Yazheng Dang

School of Management, Shanghai Institute of Technology, Shanghai

Received: Aug. 2nd, 2022; accepted: Sep. 14th, 2022; published: Sep. 26th, 2022

Abstract

The secondary smart grid supply chain composed of power suppliers and grid operators is studied

*通讯作者。

as the research object, and the two are independent of each other. In this paper, the coordination problem of the power grid supply chain is studied from the perspective of the interest relationship between the risk-neutral and risk-averse power grid operators and the risk-neutral power supply provider, and the price subsidy and rebate contract model are established to analyze whether the members of the smart grid supply chain can achieve a relatively balanced relationship of interests through the contract, and at the same time realize the coordination of the overall power grid supply chain. Conditional Value at Risk (CVaR) is used to study the contractual relationship between risk-averse grid operators and power suppliers, and to achieve supply chain coordination. In the numerical analysis, it is verified that the price subsidy and rebate contract can achieve a reasonable distribution of benefits by coordinating subsidies and rebate parameters, and the feasibility of coordinating the power grid supply chain under the contract is reflected.

Keywords

Smart Grid, Supply Chain, Conditional Value at Risk (CVaR), Price Subsidies and Rebate Contracts

Copyright © 2022 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

地球资源是人类赖以生存的保障, 其中能源是人类生活中不可或缺的一部分, 同时它也扮演着支撑世界经济社会发展的重要角色。另外, 随着人们生活水准的不断提高, 能源需求也随之与日俱增, 而能源管理和运营却一直是一个棘手的问题。在能源生产和运营中, 合理且高效率地分配和运用能源一直是世界各国孜孜不倦探究的课题。提及能源管理与运营问题, 必定绕不开电力资源。在2009年特高压输电技术国际会议后, 我国将逐步将传统电网放眼到智能电网领域中, 这是因为完善的智能电网具备传统电网无法比拟的特点, 诸如灵活性、安全性、节约性、可靠性等。同时, 智能电网中电力商品的流动要实现供需平衡并以此达到不浪费资源的目的, 这必然需要形成合理的供需关系。于是从供应链的角度对智能电网进行研究, 去实现合理的供需关系是十分重要的。

关于智能电网供应链的研究, 学术界和业界也给出了很大程度上的关注, Maharjan S, Zhu Q, Zhang Y等从需求响应的角度设计一项实现供给与需求匹配的电力市场模型, 以需求响应的角度去构建电力市场模型不仅可以实现供需匹配, 同时也能提高电力系统的稳定性和可靠性[1]。王从善发表的论文中运用了工程经济方法中的博弈论, 并考虑电力市场中存在负荷预测误差, 建立电力公司收益模型, 旨在协调由一个供电商, 多个电力公司和用户组成的电力供应链运行, 使得社会福利最大化[2]。黎翡娟、李存斌等人结合信任机制、协同机制和供应链, 提出了基于信任的智能电网供应链全面协同模型, 并从经济学和博弈论的角度验证了智能电网供应链在信任机制下实现经济收益以及该模型的可行性和有效性[3]。王田和梁洋洋合作的文章中提出了考虑可再生能源产出的不确定性, 探究了智能电网供应链最优买电策略[4]。Borenstein等通过用户侧实行补贴和定价的两种分散控制方式, 对多种定价控制方式进行比较和研究[5]。代业明与高岩从供应链的角度提出了电力公司和大用户之间的电力博弈问题, 并实现两者间短期实时定价协议[6]。黄海伦和严正等人在他们的文章中提出了考虑用户反应的供电公司最优购售电与风险管理策略, 以实现售电收益最大和购电所面临的风险降至最小, 同时采用了条件风险价值(CVaR)来评估风险[7]。谌春香的文章中结合电力市场的特点, 研究了三级电力供应链在收益共享合约下的利益分配[8]。

本文结合上述文献的经验和方法,并在罗治洪等人研究的供应链返利与惩罚契约协调基础上[9],提出价格补贴及返利的契约下探究智能电网供应链运行方式。考虑在供电商为主导地位下,以双向激励的方式刺激电力公司参与到该契约中,并实现电力供应链协调。而本文主要研究对象是智能电网环境下由供电商与电网运营商之间构成的二级供应链,且二者相互独立。从风险中性、风险厌恶型电网运营商与风险中性供电商之间的利益关系去研究电网供应链的协调问题,并建立价格补贴及返利契约模型,以此分析智能电网供应链中各成员在该契约下是否能达到利益相对平衡关系,并实现电网供应链协调。

2. 智能电网供应链模型建立与分析

2.1. 模型描述

在智能电网中,电力市场需求信息具有不确定性,对此在本文中认为电力需求为连续随机变量 D ,其概率密度函数和累积分布函数分别为 $f(\cdot)$ 和 $F(\cdot)$,且累积分布函数 $F(\cdot)$ 是可微并可逆的。电运营商在售电前需向供电商购买 Q 单位的电量,然后以单位电价 p 销售给用户,对于未售出的电量以单位价格 z 进行处理。而供电商需在提供给电网运营商购买前制定批发电价 w ,同时其生产成本为 c 。假设 $z < c < w < p$ 。

在集中式决策下,如果电网运营商和供电商均为风险中性,那么需分析智能电网供应链整体收益最大化情况,具体如下。

电网供应链期望收益函数为:

$$\Pi_e(Q) = \int_0^Q (px + z(Q-x))dF(x) + \int_Q^\infty pQdF(x) - cQ \quad (1)$$

于是,其最优购电量为:

$$Q_e^* = F^{-1}\left(\frac{p-c}{p-z}\right) \quad (2)$$

在分散式决策下,分析电网运营商和供电商各自的收益最大化情况,具体如下。

供电商期望收益函数为:

$$\Pi_{sd}(Q) = (w-c)Q \quad (3)$$

而电网运营商期望收益函数为:

$$\Pi_{rd}(Q) = (p-w)Q - (p-z)\int_0^Q F(x)dx \quad (4)$$

由于 $\Pi_{rd}(Q)$ 关于 Q 的凹函数,则其一阶条件可得出电网运营商的最优购电量为:

$$Q_d^* = F^{-1}\left(\frac{p-w}{p-z}\right) \quad (5)$$

由在集中式和分散式两种决策下供应链的最优购电量 Q_e^* 和电网运营商的最优购电量 Q_d^* ,又因 $z < c < w < p$,则 $Q_e^* > Q_d^*$,即分散式决策下电网运营商的最优购电量小于集中式决策下电网供应链的最优购电量,这说明分散式决策无法使得电网供应链期望收益实现最大化。

2.2. 价格补贴及返利契约模型建立

进一步地研究在价格补贴与返利契约下,智能电网供应链系统各个成员的决策次序:1)以供电商为供应链主导,供电商在售电前期与电网运营商之间签订价格补贴及返利契约,其中契约参数表示 (w,v,u,T) ,即:供电商与电网运营商之间协定契约的目标值为 T 单位电量,在售电期结束后,当电网运营商的售电量低于该目标值且需求电量小于供电量时,供电商对电网运营商不给予奖励,但对未售出的电量给予单位

价格补贴 v , 当电网运营商的售电量高于该目标值时, 供电商对电网运营商给予超出的部分电量单位价格 u 的返利; 2) 电网运营商根据电力市场需求信息及自身成本构成, 决定最优购电量 Q_i^* ; 3) 供电商的发电提前期忽略不计, 并在售电期前输送给电网运营商 Q_i^* 单位的电量; 4) 在售电期结束后, 电网运营商对未售出的电量以单位价格 z 进行处理, 即残值。设 s, r, d, e, t 分别代表供电商, 电网运营商, 分散式电网供应链, 集中式电网供应链和价格补贴及返利契约下分散式电网供应链。

基于Stackelberg博弈逆序求解思路, 在构建的价格补贴及返利下风险中性电网运营商及供电商的期望利润模型分别为:

$$\Pi_r(Q) = (p-w)E(Q) - (p-z)E(Q-x)^+ + vE(Q-x)^+ \cdot I + uE(T - \min\{Q, x\})^+ \quad (6)$$

$$\Pi_{st}(Q) = (w-c)E(Q) - vE(Q-x)^+ \cdot I - uE(T - \min\{Q, x\})^+ \quad (7)$$

其中, $x^+ = \min\{x, 0\}$, $I = \begin{cases} 1, & Q < T \\ 0, & Q \geq T \end{cases}$ 。上式经整理得:

$$\Pi_r(Q) = \begin{cases} (p-w)Q - (p-v-z) \int_0^Q F(x) dx & Q < T \\ (p+u-w)Q - (p+u-z) \int_0^Q F(x) dx & Q \geq T \end{cases} \quad (8)$$

$$\Pi_{st}(Q) = \begin{cases} (w-c)Q - v \int_0^Q F(x) dx & Q < T \\ (w-u-c)Q + u \int_0^Q F(x) dx + uT - u \int_0^T F(x) dx & Q \geq T \end{cases} \quad (9)$$

此时, 我们需要考虑智能电网供应链的协调问题, 那么协调条件如下三点:

- 在价格补贴及返利的契约下, 电网运营商的最优购电量与集中决策下最优购电量相等。
- 智能电网供应链中的各个单位的期望利润不低于各自保守利润。
- 整体电网供应链实现系统协调, 并使得利润最大化。

命题 1 若价格补贴及返利契约 (w, v, u, T) 使得电网供应链协调时, 契约返利参数满足 $u = \frac{(w-c)(p-z)}{c-z}$,

目标值 $T \leq Q_c^*$, 且供电商和电网运营商需要满足参与约束条件为:

$$\begin{cases} \Pi_r(Q_c^*) \geq \Pi_{rd}(Q_c^*) \\ \Pi_{st}(Q_c^*) \geq \Pi_{sd}(Q_c^*) \end{cases} \quad (10)$$

证明:

风险中性的电网运营商期望利润如式(3), 对 Q 求一阶导数, 有:

$$\frac{\partial \Pi_r(Q)}{\partial Q} = \begin{cases} (p-w) - (p-v-z)F(Q) & Q < T \\ (p+u-w) - (p+u-z)F(Q) & Q \geq T \end{cases} \quad (11)$$

由上式知 $\Pi_r(Q)$ 在 $[0, T)$ 和 $[T, \infty)$ 上是关于 Q 的凹函数, 即 $\frac{\partial^2 \Pi_r(Q)}{\partial^2 Q} < 0$ 恒成立。故令式(10)等于零,

得电网运营商最优购电量:

$$Q_i^* = \begin{cases} F^{-1}\left(\frac{p-w}{p-v-z}\right) & Q < T \\ F^{-1}\left(\frac{p+u-w}{p+u-z}\right) & Q < T \end{cases} \quad (12)$$

这里, 若想使得智能电网供应链的整体利润最大, 则需要电网运营商的最优购电量与集中决策下的最优购电量相等, 即 $Q_t^* = Q_e^*$, 根据式(11)和式(12)可得:

$$\begin{cases} v = \frac{(w-c)(p-z)}{p-c} & Q < T \\ u = \frac{(w-c)(p-z)}{c-z} & Q \geq T \end{cases} \quad (13)$$

再者, 当智能电网供应链实现整体协调时, 风险中性的电网运营商与供电商应需要满足参与约束条件, 即: 电网运营商与供电商在参与契约并达到整体协调时, 二者期望利润不低于分散条件下的最大期望利润, 即保守利润, 那么有:

$$\begin{cases} \Pi_{rt}(Q_e^*) \geq \Pi_{rd}(Q_d^*) \\ \Pi_{st}(Q_e^*) \geq \Pi_{sd}(Q_d^*) \end{cases}$$

然后, 本文考虑购电量 Q 与目标值 T 的大小关系, 研究风险中性的电网运营商与供电商是否满足参与约束条件。

1、当 $Q < T$ 时, 在区间 $[0, T]$ 上智能电网供应链的最优购电量 Q_e^* 小于契约目标值 T , 且 $Q_e^* > Q_d^*$, 则价格补贴及返利契约下供电商的最优利润为:

$$\Pi_{st}(Q_e^*) = (w-c)Q_e^* - v \int_0^{Q_e^*} F(x) dx \quad (14)$$

而其分散决策下的最优利润为:

$$\Pi_{sd}(Q_d^*) = (w-c)Q_d^* \quad (15)$$

又因 $Q_e^* > Q_d^*$, 则 $\Pi_{st}(Q_e^*) > \Pi_{st}(Q_d^*) = (w-c)Q_d^* - v \int_0^{Q_d^*} F(x) dx$, 再由式(14)和式(15)可得:

$$\Pi_{st}(Q_e^*) - \Pi_{sd}(Q_d^*) < \Pi_{st}(Q_d^*) - \Pi_{sd}(Q_d^*) = -v \int_0^{Q_d^*} F(x) dx < 0$$

故 $\Pi_{st}(Q_e^*) < \Pi_{sd}(Q_d^*)$, 即供电商的期望利润小于其保守利润, 换句话说, 供电商的参与约束条件得不到满足, 那么供电商将不与电网运营商达成契约协定。

然后, 对电网运营商的参与约束条件满足的情况做分析, 具体如下:

电网运营商在分散决策下的最优利润, 即其保守利润:

$$\Pi_{rd}(Q_d^*) = (p-w)Q_d^* - (p-z) \int_0^{Q_d^*} F(x) dx \quad (16)$$

而在价格补贴及返利契约下电网运营商的最优利润为:

$$\Pi_{rt}(Q_e^*) = (p-w)Q_e^* - (p-v-z) \int_0^{Q_e^*} F(x) dx \quad (17)$$

显然, $\Pi_{rt}(Q_e^*) > \Pi_{rd}(Q_d^*)$, 即电网运营商在价格补贴及返利契约下的最大利润大于其分散决策下的最大利润, 则电网运营商的参与约束条件得以满足。

2、当 $Q \geq T$ 时, 在区间 $[T, \infty)$ 上智能电网供应链最优购电量大于 T , 即 $Q_e^* \geq T$, 则价格补贴及返利契约下的电网运营商与供电商的参与约束条件分别为:

$$\Pi_{rt}(Q_e^*) = (p+u-w)Q_e^* - (p+u-z) \int_0^{Q_e^*} F(x) dx - uT + u \int_0^T F(x) dx \geq \Pi_{rd}(Q_d^*) \quad (18)$$

$$\Pi_{sr}(Q_c^*) = (w - u - c)Q_c^* + u \int_0^{Q_c^*} F(x) dx + uT - u \int_0^T F(x) dx \geq \Pi_{sd}(Q_d^*) \quad (19)$$

在这里, 我们可以通过调节 T 和 u 选择适当的值使得式(18)和式(19)成立, 进而使得电网运营商和供电商的参与约束条件都得到满足。

3. 风险规避型电网运营商的 CVaR 风险度量模型

对于风险厌恶型电网运营商, 考虑在价格补贴及返利契约下其厌恶程度 η 对其决策的影响。于是建立风险度量模型:

其中电网运营商的利润函数可表示为:

$$\pi_{rr}(Q) = (p - w)Q - (p - z)(Q - x)^+ + v(Q - x)^+ \cdot I + u(T - \min\{Q, x\})^+ \quad (20)$$

则, 风险度量模型为:

$$CVaR_{\eta}(\pi_{rr}(Q)) = \max_{V \in R} \left\{ V + \frac{1}{\eta} E[\min(\pi_{rr}(Q) - V, 0)] \right\} \quad (21)$$

式中 E 为决策函数的期望算子; V 为设定置信水平 η 下的风险价值, 即收益上限; $\pi_{rr}(Q)$ 为电网运营商的利润函数, 如式(21)所示; $\eta \in (0, 1]$ 为置信水平表示电网运营商对风险的厌恶程度。

那么, 电网运营商的最优购电量为:

$$Q_i^* = \arg \max_{Q \geq 0} CVaR_{\eta}(\pi_{rr}(Q)) \quad (22)$$

为了方便计算, 定义一个凹函数:

$$g(Q, V) = V + \frac{1}{\eta} E[\min(\pi_{rr}(Q) - V, 0)] \quad (23)$$

即 $CVaR_{\eta}(\pi_{rr}(Q)) = \max_{V \in R} g(Q, V)$ 。

命题 2 在风险度量 η -CVaR 准则下, 当参数条件满足 a) $Q < T$; b)

$V = (p - z - v)F^{-1}\left(\frac{\eta}{p - z - v}\right) - (w - z - v)Q$ 时, 风险规避型电网运营商的风险条件价值最大, 供电商的期望利润也达到最大, 那么智能电网供应链在价格补贴及返利契约下能够实现协调。

证明:

当 $Q < T$ 时, 有:

$$g(Q, V) = V - \frac{1}{\eta} \int_0^Q [V + (w - z - v)Q - (p - z - v)x]^+ dF(x) - \frac{1}{\eta} \int_Q^{\infty} [V - (p - w)Q]^+ dF(x) \quad (24)$$

对任意定值 Q , 求解 $\max_{V \in R} g(Q, V)$, 考虑以下三种情形:

情形 1 当 $V \leq (z + v - w)Q$ 时, $[V + (w - z - v)Q - (p - z - v)x]^+ = 0$ 和 $[V - (p - w)Q]^+ = 0$, 则:

$$g(Q, V) = V \quad (25)$$

$$\frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} = 1 > 0 \quad (26)$$

根据一阶偏导数条件可知, 当 $V \leq (z + v - w)Q$ 时, 使 $g(Q, V)$ 取得最大值的 V 为 V 的边界值 $\bar{V} = (z + v - w)Q$, 从而 $\max_{V \in R} g(Q, V) = (z + v - w)Q < 0$ 。

情形 2 当 $(z + v - w)Q < V \leq (p - w)Q$ 时, 显然 $[V - (p - w)Q]^+ = 0$, 则:

$$g(Q, V) = V - \frac{p-z-v}{\eta} \int_0^{\frac{V-(z+v-w)Q}{p-z-v}} F(x) dx \quad (27)$$

那么, 对 V 的一阶偏导数为:

$$\frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} = 1 - \frac{p-z-v}{\eta} F\left(\frac{V-(z+v-w)Q}{p-z-v}\right) \quad (28)$$

由此, 可以观察到:

$$\left. \frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} \right|_{V=(z+v-w)Q} = 1 > 0 \quad (29)$$

$$\left. \frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} \right|_{V=(p-w)Q} = 1 - \frac{p-z-v}{\eta} F(Q) \quad (30)$$

故, 若 $1 - \frac{p-z-v}{\eta} F(Q) < 0$, 那么存在 \tilde{V} 使式(28)的一阶条件成立, 即 $g(Q, V)$ 在区间 $(z+v-w)Q < V \leq (p-w)Q$ 内取得最大值。从而

$$\tilde{V} = (p-z-v)F^{-1}\left(\frac{\eta}{p-z-v}\right) - (w-z-v)Q \quad (31)$$

情形3 当 $V > (p-w)Q$ 时, 有:

$$g(Q, V) = V - \frac{1}{\eta}(p-z-v) \int_0^Q dF(x) - \frac{1}{\eta}[V - (p-w)Q] \quad (32)$$

进而

$$\frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} = 1 - \frac{1}{\eta} < 0 \quad (33)$$

根据一阶条件可知, 当 $V > (p-w)Q$ 时, 使 $g(Q, V)$ 取得最大值的 V 为 V 的边界值 $\bar{V} = (p-w)Q$, 从而 $\max_{V \in R} g(Q, V) = (p-w)Q - \frac{p-z-v}{\eta} \int_0^Q F(x) dx$ 。

综上所述, 可知 $\max_{V \in R} g(Q, V)$ 的解 $V^* = \tilde{V} = (p-z-v)F^{-1}\left(\frac{\eta}{p-z-v}\right) - (w-z-v)Q$, 若满足

$$1 - \frac{p-z-v}{\eta} F(Q) < 0 \quad (34)$$

那么将 V^* 带入式(24), 并将 $\max_{V \in R} g(Q, V)$ 可以写为:

$$\max_{V \in R} g(Q, V) = V^* - \frac{1}{\eta} \int_0^{\frac{V^*+(w-z-v)Q}{p-z-v}} [V^* + (w-z-v)Q - (p-z-v)x] dF(x) \quad (35)$$

根据上式的一阶条件, 即 $\frac{\partial g(Q, V)}{\partial Q} = 0$, 得:

$$Q_t^* = \arg \max_{Q \geq 0} CVaR_{\eta}(\pi_{\pi}(Q)) = \frac{p-z-v-1}{w-z-v} F^{-1}\left(\frac{\eta}{p-z-v}\right) \quad (36)$$

于是, 在价格补贴及返利契约下要使得智能电网供应链能实现整体协调, 那么需要满足: $Q_t^* = Q_e^*$ 。

命题 3 在价格补贴及返利契约下, 智能电网供应链系统中风险规避型电网运营商的最优购电量 Q_i^* 会随着风险规避程度 η 的增大而降低, 并随着批发电价 w 的降低而增大。

证明: 根据式(34)可知, $Q_i^* = \frac{p-z-v-1}{w-z-v} F^{-1}\left(\frac{\eta}{p-z-v}\right)$ 。令 $\eta_1 < \eta_2$, 那么:

$$\frac{Q_{i2}^*}{Q_{i1}^*} = \frac{\frac{p-z-v-1}{w-z-v} F^{-1}\left(\frac{\eta_1}{p-z-v}\right)}{\frac{p-z-v-1}{w-z-v} F^{-1}\left(\frac{\eta_2}{p-z-v}\right)} = \frac{F^{-1}\left(\frac{\eta_2}{p-z-v}\right)}{F^{-1}\left(\frac{\eta_1}{p-z-v}\right)} \quad (37)$$

又因 $F^{-1}(\cdot)$ 为增函数, 故 $\frac{Q_{i2}^*}{Q_{i1}^*} > 1$ 。

同理, 令 $w_1 < w_2$, 则 $\frac{Q_{i2}^*}{Q_{i1}^*} < 1$, 证毕。

命题 4 在风险度量 η -CVaR 准则下, 当参数条件满足 a) $Q \geq T$; b) $V = (p+u-w)Q - uT$ 时, 风险规避型电网运营商的风险条件价值最大, 供电商的期望利润也达到最大, 那么智能电网供应链在价格补贴及返利契约下能够实现协调。

证明:

当 $Q \geq T$ 时, 有:

$$g(Q, V) = V - \frac{1}{\eta} \int_0^Q [V + (w-z-u)Q - (p+u-z)x + uT]^+ dF(x) - \frac{1}{\eta} \int_Q^\infty [V - (p+u-w)Q + uT]^+ dF(x) \quad (38)$$

当 $V \leq (z+u-w)Q - uT$ 时, $g(Q, V) = V$, 于是 V 的一阶条件为:

$$\frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} = 1 > 0 \quad (39)$$

也就是说, $g(Q, V)$ 在区间 $(-\infty, (z+u-w)Q - uT]$ 上为单增函数, 当 $V = (z+u-w)Q - uT$ 时, $g(Q, V)$ 取得极大值。

当 $(z+u-w)Q - uT < V < (p+u-w)Q - uT$ 时, 对 V 的一阶导数并区间端点值, 有:

$$\left. \frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} \right|_{V=(z+u-w)Q-uT} = 1 - \frac{1}{\eta} F\left(\frac{uQ}{p+u-z}\right) \quad (40)$$

$$\left. \frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} \right|_{V=(p+u-w)Q-uT} = 1 - \frac{1}{\eta} F(Q) \quad (41)$$

根据上两式, 易知: $\left. \frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} \right|_{V=(z+u-w)Q-uT} > \left. \frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} \right|_{V=(p+u-w)Q-uT}$, 那么很难判断出 V 的一阶导数

$\frac{\partial g(Q, V)}{\partial V}$ 与 0 的大小关系。于是, 设想在该区间内至少存在一点 V' 使得 $\left. \frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} \right|_{V=V'} = 0$, 由极值条件得:

$$F\left(\frac{V + (w-z)Q + uT}{p+u-z}\right) = \eta \quad (42)$$

$$(s-w)F\left(\frac{V + (w-z)Q + uT}{p+u-z}\right) = 0 \quad (43)$$

但是, 由于 $F\left(\frac{V+(w-z)Q+uT}{p+u-z}\right) > 0$, 显然等式(43)不成立, 故 $g(Q, V)$ 在此区间内取得极值的设想式不成立的。

当 $V \geq (p+u-w)Q-uT$ 时, $\frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} = 1 - \frac{1}{\eta} < 0$, 即函数 $g(Q, V)$ 在此区间内是 V 的减函数, 那么 $V = (p+u-w)Q-uT$ 时, 该函数取得极大值。

综上, 函数 $g(Q, V)$ 在可行域内取得两个极值点, 且该两个极值点为极大值, 即 $V = (z+u-w)Q-uT$ 和 $V = (p+u-w)Q-uT$, 当 $V = (p+u-w)Q-uT$ 时, 函数在该极值点处取得的极大值点, 同时也是最大值。再者, 根据条件风险价值有:

$$g(Q, V) = \frac{p+u-z}{\eta} \int_0^Q F(x) dx + (p+u-w)Q-uT \quad (44)$$

然后, 函数 $g(Q, V)$ 对 Q 求一阶导数, 令 $\frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} = 0$, 可求出 Q_i^* 使得电网运营商的利润最大。同时, 要使得价格补贴及返利的契约下, 实现智能电网供应链的整体协调, 需满足 $Q_i^* = Q_e^*$ 。最优购电量 Q_i^* 与风险规避程度、定价的关系同命题 3 类似, 此处不予证明。

此外, 要使得电网运营商和供电商参与到价格补贴及返利契约中, 必须要使得二者在该契约下的期望收益不低各自的保留利润, 记 $\pi_r(Q) = J(w, v, u, T)$ 和 $\frac{\partial g(Q, V)}{\partial V} = K(w, v, u, T)$, 并以此来求出价格补贴和返利参数。于是, 电网运营商和供电商需满足方程组:

$$\begin{cases} J(w, v, u, T)|_{Q=Q_i^*} = \alpha \\ K(w, v, u, T)|_{Q=Q_i^*} = 0 \end{cases} \quad (45)$$

其中, α 为分配因子, 且 $\alpha \in (0, 1)$ 。通过设定 α 的大小来决定供电商收益的多少, 同时可以调整整个供应链的利润在供电商与电网运营商间进行弹性分配。另外, 通过选取合适的售价 w , 可以提升电网运营商参与供电商之间的价格补贴及返利契约的可能性。

4. 数值分析

本文为了验证以上分析的可行性和有效性, 进行以下假设性数据实验, 并使用 Matlab 数学工具进行计算。设定电力需求 D 服从 $[0, 25]$ 之间的正态分布, 其均值 $\mu = 10$, 标准差 $\sigma = 10$ 。供电商生产成本 $c = 0.5 \text{ \$/kW} \cdot \text{h}$, 销售电价 $p = 5 \text{ \$/kW} \cdot \text{h}$, 残值 $z = 0.2 \text{ \$/kW} \cdot \text{h}$ 。

图 1 反映了, 在供电商设定批发电价后, 风险中性电网运营商所获得的返利比风险规避型电网运营商获得返利低, 这意味着对于风险规避型的电网运营来说, 其会降低购电量来减少自己收益的损失, 而这样做必然引起价格补贴及返利契约下的整体电网供应链的收益达不到集合式下最优收益, 那么需要供电商牺牲自己部分利益而增加返利价格刺激电网运营上购电的欲望, 提高电网运营商的期望利润, 进而可以使得整体电网供应链的绩效达到最优。

图 2 反映了, 随着价格补贴及返利契约中供电商和电网运营间协定的销售目标值的提升, 供电商确保在其收益不低于保留利润(如图中 b 点)下也跟着增加, 而风险中性电网运营商利润却随着减少, 直至减少到图中 c 点, 即其保留利润。这时需要作为主导者的供电商通过合理地调整补贴价格 v 和销售目标值 T , 使得利益得到合理的分配, 并使得电网供应链的协调得以实现。

图 3 反映了, 对于不同风险规避程度的电网运营商来说, 当其面临销售目标值提升时相对于风险中

性下的购买意愿会随之降低, 毕竟卖不出电量的可能性也是增加的, 于是电网运营这时整体电网供应链的绩效也随之减少。那么要避免该情况的出现, 供电商对于电网运营商剩余电量的补贴价格以及返利都要有所提高, 双重刺激电网运营商的购买力和销售能力, 以此提高其收益, 同时也能让其参与到价格补贴及返利契约中的意愿更高些, 最终以实现整体供应链绩效达到最优为目的。

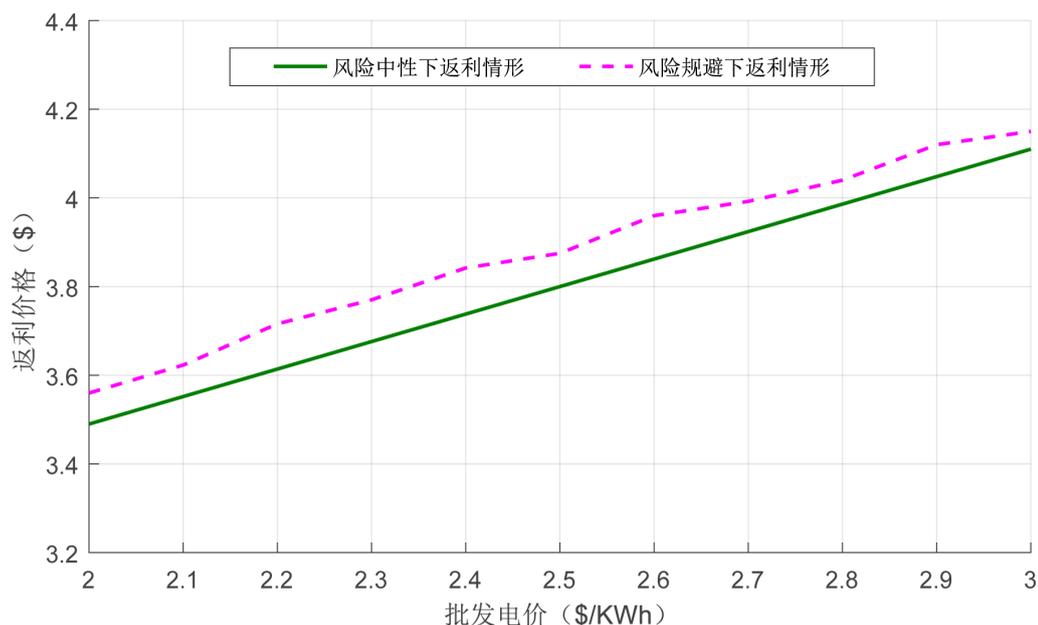


Figure 1. The impact of wholesale electricity price w on rebate u

图 1. 批发电价 w 对返利 u 的影响

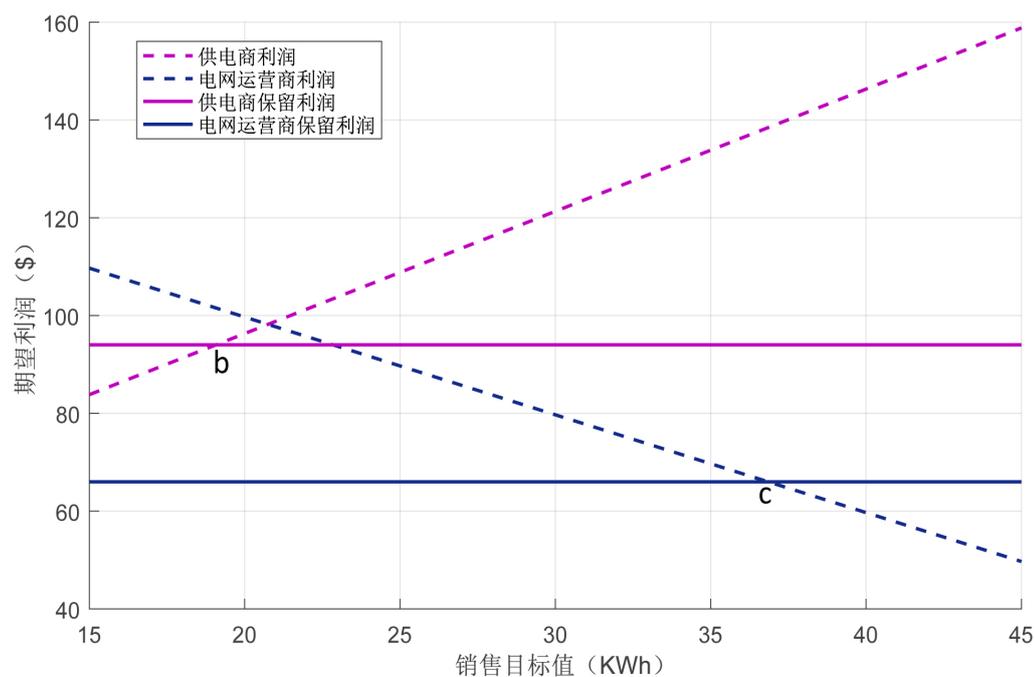


Figure 2. The impact of sales target value T on the profit of the supply of e-commerce and risk neutral grid operator under the contract

图 2. 契约下销售目标值 T 对供电商和风险中性电网运营商利润的影响

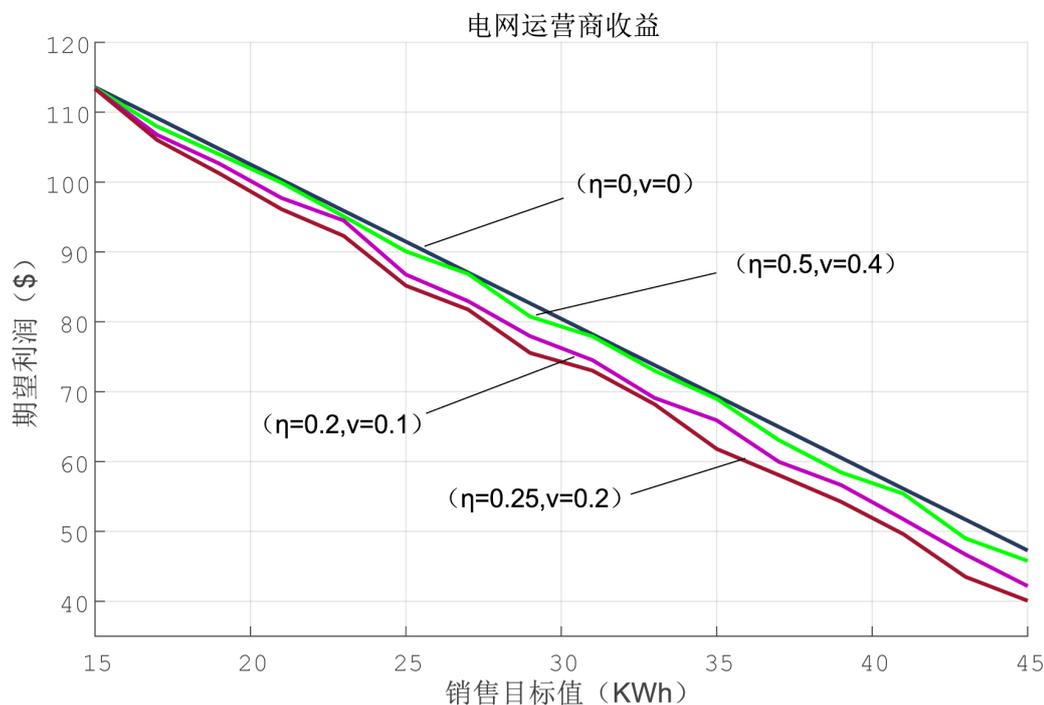


Figure 3. The impact of sales target value T on the profit of power grid operators under the contract
图 3. 契约下销售目标值 T 对电网运营商利润的影响

5. 结论

本文从供应链的角度出发, 考虑智能电网供应链的特性, 提出了一种价格补贴及返利契约模型的智能电网供应链协调研究, 以供电商和电网运营商构成的二级供应链为研究对象, 构建了风险中性电网运营商与供电商在价格补贴及返利契约下实现整体电网供应链协调, 同时也考虑了风险规避型电网运营商参与该契约下能否实现电网供应链协调。研究表明, 在本文提出的契约下电网运营商能够实现自身利益的提升, 同时供电商灵活地制定价格补贴和返利, 以此达到利益合理分配的目的, 并促使整体电网供应链协调, 这也体现了该契约下电网供应链更具普适性和灵活性。另外本文提出的模型相对较为简单, 不具有多样性, 但为研究更为复杂的电网供应链结构提供了一定的参考价值。

参考文献

- [1] Maharjan, S., Zhu, Q., Zhang, Y., et al. (2015) Demand Response Management in the Smart Grid in a Large Population Regime. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7, 189-199.
- [2] 王从善. 面向需求侧响应的智能电网定价策略设计与优化[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [3] 黎翡娟, 李存斌, 黄洵斌. 基于信任的智能电网供应链全面协同模型研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 1-6+16.
- [4] 王田, 梁洋洋. 基于智能电网技术的能源网络供应链买电策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(7): 110-117. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2018.1627>
- [5] Borenstein, S., Jaske, M. and Rosenfeld, A. (2002) Dynamic Pricing, Advanced Metering, and Demand Response in Electricity Markets. *Journal of the American Chemical Society*, 128, 4136-4145.
- [6] 代业明, 高岩. 具有多类资源多类用户智能电网实时定价决策[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(9): 2315-2323.
- [7] 黄海伦, 严正, 杨云益, 文锐, 杨佩娟. 考虑用户反应的供电公司最优购售电与风险管理策略[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(7): 1122-1126. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2012.07.024>
- [8] 谌春香. 基于共享合约电力供应链利益分配研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2014.

- [9] 罗治洪, 吕婷婷. 随机供需下的供应链返利和惩罚契约协调研究[J]. 科技与经济, 2018, 31(2): 86-90.
<https://doi.org/10.14059/j.cnki.cn32-1276n.2018.02.018>