

# 出力不确定下基于 CVaR 的风电 供应链优化决策

王 辉, 王军杰, 王腾飞, 赵文会

(上海电力大学经济与管理学院, 上海 200090)

**摘 要:** 风电出力受风速等不确定环境影响, 出力具有较强的波动性, 导致风电供应链中风电商与售电公司均面临不确定性收益风险。鉴于此, 首先在分散决策下引入收益共享合约, 优化风电商与售电公司决策; 然后引入条件风险价值(CVaR)度量售电公司收益水平, 构建基于 CVaR 的收益共享合约下的风电供应链模型; 最后在 CVaR 准则下, 分析风电商与售电公司最优合约电量对风电商的不确定性以及对售电公司风险规避系数的敏感性。算例分析结果表明, 收益共享合约与风险规避机制的引入能够提高风电商与售电公司的最优合约电量, 使得出力不确定环境下的风电供应链绩效达到最优。

**关 键 词:** 风电商; 不确定性风险; CVaR; 风险规避; 收益共享合约

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.014 中图分类号: TM-9 文章编号: 1673-9140(2023)04-0134-09

## Optimal decision of wind power supply chain based on CVaR under uncertainty output

WANG Hui, WANG Junjie, WANG Tengfei, ZHAO Wenhui

(School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** As wind power output is highly unstable due to the uncertain environmental disturbance such as wind speed, both the wind power supplier and the power retailer in the wind power supply chain face the risks of uncertain profits. In light of this, firstly, profit-sharing contracts are introduced under decentralized decision-making to optimize the decision-makings of wind power suppliers and electricity retailers. Subsequently, conditional value at risk (CVaR) is introduced as a measure of revenue level for the electricity retailer. A wind power supply chain model is built under revenue-sharing contracts based on CVaR. Finally, under the CVaR criterion, the uncertainty of the optimal contract quantity between wind power suppliers and electricity retailers towards wind power suppliers as well as the sensitivity of the optimal towards risk aversion coefficient of electricity retailers are analyzed. The case study analysis results demonstrate that the introduction of revenue-sharing contracts and risk aversion mechanisms can enhance the optimal contract quantity for both the wind power suppliers and electricity retailers, achieving optimal performance for the wind power supply chain under uncertain generation conditions.

**Key words:** wind power suppliers; uncertainty risk; conditional value at risk(CVaR); risk aversion; revenue sharing contracts

收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2021-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(71601109, 71403163); 教育部人文社会科学研究一般项目(18YJAZH138)

通信作者: 王 辉(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力市场、综合能源服务以及系统分析与优化的研究; E-mail: whhelen\_1980@163.com

近年来,全球环境与能源问题的凸显,使得以风电和光伏为主的间歇性可再生能源在世界范围内受到广泛关注并迅速发展<sup>[1-4]</sup>。据世界风能协会统计,截至2018年底,全球累计风电装机容量达到597 GW,其中,中国风电装机容量为217 GW,居全球首位。2019年5月15日,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》,加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系,促进可再生能源的开发利用<sup>[5]</sup>,激励全社会加大开发利用可再生能源力度,未来可再生能源消费比重还将持续高速增长。风电作为一种重要的可再生能源电力,由于其出力存在随机性和不确定性,参与电力市场竞争后增加了各市场主体利益风险,在一定程度上影响了电力供应链的稳定性。鉴于此,研究如何降低和转移风电出力不确定性风险,保证电力供应链各主体收益的稳定性,具有重要现实意义。本文从供应链角度入手,引入收益共享合约机制,合理转移风电商与售电公司的风险与收益,研究出力不确定下风电供应链各市场主体最优决策,以增强风电商参与电力市场的竞争力,促进风电等可再生能源消纳。

目前,国内外针对风电参与电力市场的研究主要集中在技术与市场2个方面,对比各国可在再生能源发展模式与交易策略,提出可再生能源参与电力市场所面临的问题<sup>[6]</sup>。技术方面主要有风光储联合运行优化<sup>[7]</sup>、计及碳税下风储经济调度<sup>[8-10]</sup>、风火虚拟电厂联合优化<sup>[11]</sup>以及含可再生能源的跨省区优化调度<sup>[12]</sup>等;而市场手段方面有学者利用平衡市场的方法解决风电商投标出力偏差<sup>[13]</sup>、考虑需求响应市场平抑风电波动<sup>[14-16]</sup>、可再生能源配额制下竞价博弈<sup>[17]</sup>以及可再生能源价格驱动下多市场主体博弈<sup>[18]</sup>。上述大部分研究成果是通过技术或市场手段调控价格等因素的不确定性,但忽略了用市场手段来转移风电等清洁能源出力不确定性风险。根据目前电力市场发展的趋势,风电商将越来越多地与售电公司进行交易,因此,将风电商、售电公司与用户组成的风电供应链整体进行研究,是本文基于以上文献的一种思考。文献[19-20]从供应链角度出发,针对产出不确定风险,设计基于条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)准则的风险补偿

机制实现供应链共赢协调;文献[21]解决供需双侧不确定风险下供应链契约设计与决策问题。

本文借鉴上述学者的成功经验,结合当下电力市场发展特点,针对风电商、售电公司以及用户组成的风电供应链进行分析,在风电出力不确定下的风电供应链中引入收益共享合约,运用CVaR准则度量风电出力不确定性所带来的风险,提出风险规避的售电公司与风电商组成的风电供应链最优交易决策,最后算例分析验证所提模型的有效性。

## 1 出力不确定下风电供应链市场架构

在不确定气候影响风电出力情况下,本文研究由风险中性的风电商与风险厌恶的售电公司组成的风电供应链的优化决策问题,整个风电供应链如图1所示。



图1 出力不确定下风电供应链

Figure 1 Wind power supply chain under uncertain output circumstances

不同于传统的加工制造业供应链系统,风电场发出的电能受天气等因素的影响要严重得多。风电的生产由于受天气等不确定因素的影响,在风电场建成投入使用后,风电的产出呈随机分布,风电商与售电公司组成的供应链优化决策中必须考虑该不确定性问题。鉴于此,售电公司与风电商交易可再生能源电力将面临更大的风险。本文考虑售电公司与风电商在购电协议(power purchase agreements, PPA)<sup>[22]</sup>模式下,签订中长期双边合同,即售电公司在合约时间内以某一固定价格购买风电机组所发电量。基于PPA协议,风电商将其出力不确定性带来的风险转移到售电公司,而售电公司以较低的合约价格购买风电量从而降低购电风险。在此模式下,风电商与售电公司实现了风险合理转移与分配<sup>[23]</sup>。

## 2 基于CVaR的收益共享合约利润模型

在文1中的购电模式下,进一步考虑风电商与售电公司的风险收益问题。通过PPA模式,风电商转移其出力不确定性风险给售电公司,售电公司通过较低的批发价来降低风险,但是仅仅在PPA模式下无法确定售电公司与风电商交易风电的最优批发价格,为此,参考文献[23]引入收益共享合约模式,更加合理地分配风电商与售电公司的风险收益。本文建立有、无收益共享合约的各市场主体利润模型,基于对比分析结果,建立在CVaR准则度量风险下的售电公司期望利润模型。

### 2.1 无收益共享合约各市场主体利润模型

当无收益共享合约时,风电商首先根据气候、风速等自然条件预估自己的发电出力能力,然后在中长期合约市场与售电公司确定合约电量 $q$ ,但风电出力的不稳定性导致只有 $q_n$ 电量可以实现,售电公司按照批发市场签订的合同价格 $\omega$ 购买风电商最终实现的所有电量 $q_n$ ,然后以确定销售价格 $p$ 进行销售,即若风电商计划出售给售电公司电量 $q$ ,则只有 $q_n$ 的实际交付电量。

#### 1) 风电商利润函数。

风电商与售电公司的合约电量为 $q$ ,而实际出售给售电公司电量为 $q_n$ ,因为风力发电的燃料成本为0,即不存在边际成本,将风电厂建造过程的投资成本和运营期间的运营成本折合到参数 $c$ 中,定义为风电机组线性均化后的单位发电成本系数<sup>[24]</sup>,目前该系数一般取值为0.5~0.6元/(MW·h),从而得到风电商在出力不确定风险情况下的利润函数:

$$\pi_w = \omega q - c\eta q \quad (1)$$

式中, $\omega$ 为风电批发价; $q$ 为合约电量; $\eta$ 为电力实现因子, $0 \leq \eta \leq 1$ ,假设 $\eta$ 为非负连续随机变量,其概率密度函数为 $g(\cdot)$ ,累积分布函数为 $G(\cdot)$ ,均值为 $u$ ,方差为 $\sigma^2$ 。

#### 2) 售电公司利润函数。

售电公司与风电商签订中长期合约,合约确定售电公司以批发电价 $\omega$ 购买风电商发出的所有实际

电量 $q_n$ ,而售电公司面临的可再生能源电力需求为 $x$ ,售电公司根据市场确定出售可再生能源电力的价格为 $p$ 。如果 $q_n \geq x$ ,则售电公司可以将多余的电量以价格 $s$ 在现货市场上出售,额外获得利润 $s(q_n - x)$ 。由于在现货市场销售的电能会产生额外的销售成本(额外的调度成本等),所以必有 $s < p$ ,则售电公司的利润函数为

$$\pi_M = \begin{cases} px + s(\eta q - x) - \omega\eta q, & \eta q > x \\ p\eta q - \omega\eta q, & \eta q < x \end{cases} \quad (2)$$

式中, $x$ 为可再生能源电力需求量,假设其服从分布函数 $D$ ,概率密度为 $f(x)$ ,累积分布函数为 $F(x)$ 。

#### 3) 风电供应链利润函数。

$$\pi_S = \begin{cases} px + s(\eta q - x) - c\eta q, & \eta q > x \\ p\eta q - c\eta q, & \eta q < x \end{cases} \quad (3)$$

在风险中性下,风电商、售电公司以及供应链期望利润函数分别表示为

$$E(\pi_w) = \omega q - cE(\eta q) \quad (4)$$

$$E(\pi_M) = (p - c)E_\eta(\eta q) - (p - s) \cdot E_{\eta,x}(\eta q - x)^+ \quad (5)$$

$$E(\pi_S) = (p - \omega)E_\eta(\eta q) - (p - s) \cdot E_{\eta,x}(\eta q - x)^+ \quad (6)$$

其中, $(\eta q - x)^+$ 表示 $\max(x, 0)$ 。

在无收益共享合约下,当风电商与售电公司均为风险中性时,会存在一个最优合约电量 $q^*$ ,使得售电公司期望利润 $E(\pi_M)$ 最大或供应链的期望利润 $E(\pi_S)$ 最大。分别将式(5)、(6)对 $q$ 求一、二阶偏导数,判断凹凸性,然后令一阶偏导等于零便可求得 $q_1^*$ 、 $q_S^*$ (推导过程略)。

当售电公司、整体供应链期望利润最大时,分别求得:

$$q_1^* = F^{-1}\left(\frac{p - \omega}{p - s}\right) \frac{u}{u^2 + \sigma^2} \quad (7)$$

$$q_S^* = F^{-1}\left(\frac{p - c}{p - s}\right) \frac{u}{u^2 + \sigma^2} \quad (8)$$

此时,考虑到风电商盈利情况下必有 $\omega > c$ ,于是 $q_1^* < q_S^*$ ,即分散决策与集中决策的最优解不相等,电力供应链达不到最优决策,则考虑收益共享合约下电力供应链决策模型。

2.2 收益共享合约下各市场主体利润模型

采用收益共享合约的风电供应链协调模式,风电商制定较低批发价,同时为了提高风电商的生产积极性,促进可再生能源电力消纳,又确保售电公司有足够的低价电力供给,供应链将协调售电公司与风电商利益,将售电公司的部分销售利润按双方商定的一定比例协调给风电商,即售电公司获得部分销售利润 $\lambda$ ,将销售利润的 $1-\lambda$ 部分协调给风电商。在该风电供应链中,售电公司需要同时考虑到风电商的供应和市场电量需求的不确定性进行电量购买决策,因而风电商与售电公司的合约电量 $q$ 成为影响供应链协调的重要因素。在收益共享合约下,最终确保双方的收益均高于分散决策状态,达到风电供应链最优绩效。

收益共享合约下风电商、售电公司的利润函数分别为

$$\pi_w = \begin{cases} (1-\lambda)px + \omega\eta q - c\eta q, & \eta q > x \\ (1-\lambda)p\eta q + \omega\eta q - c\eta q, & \eta q < x \end{cases} \quad (9)$$

$$\pi_M = \begin{cases} \lambda px + s(\eta q - x) - \omega\eta q, & \eta q > x \\ \lambda p\eta q - \omega\eta q, & \eta q < x \end{cases} \quad (10)$$

则售电公司期望利润函数为

$$E(\pi_M) = (\lambda p - \omega)E_\eta(\eta q) - (\lambda p - s) \cdot E_{\eta,x}(\eta q - x)^+ \quad (11)$$

类似于无收益共享合约,当风电商与售电公司均是风险中性时,也会存在一个最优合约电量 $q_M^*$ ,使得售电公司期望利润 $E(\pi_M)$ 最大,同理可求得 $q_M^*, q_S^*$ 。

当售电公司、整体供应链期望利润最大时,分别求得:

$$q_M^* = F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right) \frac{u}{u^2 + \sigma^2} \quad (12)$$

$$q_S^* = F^{-1}\left(\frac{p - c}{p - s}\right) \frac{u}{u^2 + \sigma^2} \quad (13)$$

此时,令 $q_M^* = q_S^*$ ,可得 $\lambda = (\omega p + sc - s\omega - sp) / p(c - s)$ ,已知 $\lambda < 1, s < p$ ,则有 $\omega < c$ ,说明选择适当的比例参数 $\lambda$ ,分散决策也可达到最优绩效。

由于售电公司要面对风电商的出力不确定性,考虑售电公司在风险规避下进行市场决策是必要的,因此,考虑条件风险价值准则来度量售电公司收益水平,分析电力供应链模型。

2.3 收益共享合约下 CVaR 模型

风电商受风速等天气因素影响,导致风电出力在电力供应链中存在严重波动性,售电公司在面对供应不确定的风电商可能会采取风险规避的态度。风险价值(value at risk, VaR)与 CVaR 是度量风险的 2 种准则,最早应用于金融领域。本文采用文献[25]提出的 CVaR 准则,它能够克服 VaR 度量风险的一些缺陷,可以度量 VaR 准则所忽略的低于分位数水平的平均收益,这也是风电出力不确定风险下风电商与售电公司所关注的。根据文献[26]及 CVaR 定义,得到售电公司在收益共享合约下的条件期望利润函数为

$$C_\beta(\pi_M) = \max\left\{\alpha + \frac{1}{\beta} \int \min[E(\pi_M) - \alpha, 0]g(\eta)d\eta\right\} \quad (14)$$

式中, $\beta$ 为售电公司的风险规避系数( $\beta$ 越小,表明售电公司越规避风险); $\alpha$ 为 VaR 准则下售电公司的保留利润的临界值。

假设:

$$h(q, \alpha) = \alpha + \frac{1}{\beta} \int \min[E(\pi_M) - \alpha, 0]g(\eta)d\eta \quad (15)$$

根据文献[25], $h(q, \alpha)$ 是关于 $\alpha$ 的凹函数,令

$$E(\pi_M) - \alpha = (\lambda p - \omega) \cdot$$

$$E_\eta(\eta q) - (\lambda p - s)E_{\eta,x}(\eta q - x)^+ - \alpha < 0 \quad (16)$$

则有

$$(\lambda p - \omega)\eta q - (\lambda p - s) \int_0^{\eta q} F(x)dx - \alpha < 0 \quad (17)$$

假设 $x$ 服从 $[a, b]$ 上均匀分布,则

$$\eta^2 q^2 - 2F^{-1}\left(\frac{\lambda p - s}{\lambda p - \omega}\right)\eta q + \frac{2(b-a)\alpha}{\lambda p - s} > 0 \quad (18)$$

当 $(F^{-1}(\frac{\lambda p - s}{\lambda p - \omega}))^2 > \frac{2(b-a)\alpha}{\lambda p - s}$ 时,有

$$\eta = \frac{F^{-1}\left(\frac{\lambda p - s}{\lambda p - \omega}\right)}{q} \pm$$

$$\frac{\sqrt{(F^{-1}\left(\frac{\lambda p - s}{\lambda p - \omega}\right))^2 - \frac{2(b-a)\alpha}{\lambda p - s}}}{q} \quad (19)$$

数学意义上 $\eta$ 有 2 个解,考虑实际情况,本文是

售电公司对风电商不确定性出力风险的规避,实际上是希望风电商的出力不确定程度较低,给自己带来的利润顺势越少,则有

$$\eta = \frac{F^{-1}\left(\frac{\lambda p - s}{\lambda p - \omega}\right)}{q} - \frac{\sqrt{\left(F^{-1}\left(\frac{\lambda p - s}{\lambda p - \omega}\right)\right)^2 - \frac{2(b-a)\alpha}{\lambda p - s}}}{q} \quad (20)$$

因此,

$$h(q, \alpha) = \alpha + \frac{1}{\beta} \cdot \int_0^{F^{-1}\left(\frac{\lambda p - s}{\lambda p - \omega}\right) - \sqrt{\left(F^{-1}\left(\frac{\lambda p - s}{\lambda p - \omega}\right)\right)^2 - \frac{2(b-a)\alpha}{\lambda p - s}}} [E(\pi_M) - \alpha]^+ g(\eta) d\eta \quad (21)$$

求解  $h(q, \alpha)$  关于  $\alpha$  的一阶导数  $\partial h(q, \alpha) / \partial \alpha$ , 令其等于零, 在已知风险规避系数  $\beta$  和合约电量  $q$  的情况下, 则存在一个最优的保留利润值  $\alpha^* = \{(\lambda p - s) \cdot [2F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right)G^{-1}(\beta)q - (G^{-1}(\beta)q)^2]\} / 2(b-a)$ 。

### 3 基于 CVaR 的收益共享合约最优决策

#### 3.1 CVaR 准则下售电公司的最优决策

在 CVaR 准则度量风险下, 售电公司的目标函数就是确定最优合同电量  $q_C^M$ , 从而得到其条件期望的最大值, 等价于求解  $\max_{q \in R^+} C_\beta(\pi_M)$  得到  $q_C^M$ 。

1) 当  $\beta = 0$  时, 表示售电公司在 CVaR 准则度量下低于  $\beta$  分位数的平均收益为 0, 此时  $q_C^M = 0$ 。

2) 当  $0 < \beta \leq 1$  时, 由文 2.3 中分析可知, 要使  $E(\pi_M) - \alpha < 0$  成立, 则有 2 种情况:

① 当  $\alpha > \frac{(\lambda p - s)}{2(b-a)} [F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right)q]^2$  时, 有

$$\max_{q \in R^+} C_\beta(\pi_M) = \max_{q \in R^+} \left\{ \frac{1}{\beta} \cdot \int_0^1 E(\pi_M) g(\eta) d\eta \right\} = \max_{q \in R^+} \left\{ \frac{1}{\beta} E(\pi_M) \right\} \quad (22)$$

此时,  $q_C^M = q_M^*$ 。

② 当  $\alpha < \frac{(\lambda p - s)}{2(b-a)} [F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right)q]^2$  时, 有

$$h(q, \alpha^*) = \alpha^* + \frac{1}{\beta} \cdot$$

$$\int_0^{G^{-1}(\beta)} [E(\pi_M) - \alpha^*]^+ g(\eta) d\eta = \frac{1}{\beta} \cdot \int_0^{G^{-1}(\beta)} (\lambda p - s) \left[ \left( \frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s} \right) \eta q - \int_0^{\eta q} F(x) \right] dx \quad (23)$$

分别求  $h(q, \alpha^*)$  关于  $q$  的一、二阶偏导, 有

$$\frac{\partial h(q, \alpha^*)}{\partial q} = \frac{1}{\beta} (\lambda p - s) \cdot$$

$$\int_0^{G^{-1}(\beta)} \left[ \left( \frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s} \right) \eta - \eta F(\eta q) \right] g(\eta) d\eta \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 h(q, \alpha^*)}{\partial q^2} = \frac{s - \lambda p}{\beta} \cdot$$

$$\int_0^{G^{-1}(\beta)} \eta^2 f(\eta q) g(\eta) d\eta < 0 \quad (25)$$

则  $h(q, \alpha^*)$  是关于  $q$  的凹函数。令式(24)等于零, 求得  $q_C^M = F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right) \int_0^{G^{-1}(\beta)} \eta g(\eta) d\eta / \int_0^{G^{-1}(\beta)} \eta^2 g(\eta) d\eta$ , 此时, 存在最优  $\alpha^* = \{(\lambda p - s) [2F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right)G^{-1}(\beta)q_C^M - (G^{-1}(\beta)q_C^M)^2]\} / 2(b-a)$ 。

#### 3.2 CVaR 准则下整体风电供应链的最优决策

考虑风险规避的风电供应链在面对风电出力不确定性风险时, 其条件期望利润函数为

$$C_\beta(\pi_S) = \max \{ \alpha_S + \frac{1}{\beta} \int \min [E(\pi_S) - \alpha_S, 0] g(\eta) d\eta \} \quad (26)$$

其中,  $\alpha_S$  为 VaR 准则下风电供应链整体的保留利润临界值。与售电公司最优合约电量的求解同理, 风电供应链集中决策时的最优合约电量如下。

1) 当  $\beta = 0$  时,  $q_C^S = 0$ 。

2) 当  $\alpha_S > \frac{p-s}{2(b-a)} [F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right)q]^2$  且  $0 < \beta \leq 1$  时,  $q_C^S = q_S^*$ 。

3) 当  $\alpha_S < \frac{p-s}{2(b-a)} [F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right)q]^2$  且  $0 < \beta \leq$

1 时,  $q_C^S = F^{-1}\left(\frac{p-\omega}{p-s}\right) \int_0^{G^{-1}(\beta)} \eta g(\eta) d\eta / \int_0^{G^{-1}(\beta)} \eta^2 g(\eta) \cdot$

$d\eta$ , 且此时存在最优  $\alpha^* = \{(\lambda p - s) [2F^{-1}\left(\frac{\lambda p - \omega}{\lambda p - s}\right)G^{-1}(\beta)q_C^M - (G^{-1}(\beta)q_C^M)^2]\} / 2(b-a)$ 。

由售电公司与风电供应链集中决策时的最优合约电量结果可知, 当  $\lambda = (\omega p + sc - s\omega - sp) / p(c -$

$s)$ 、 $\omega < c$ 时,  $q_c^M = q_c^S$ , 只是约束条件有所不同, 集中决策下的电力供应链保留利润为分散决策下风电供应链中售电公司保留利润的  $(p-s)/(\lambda p-s)$  倍。在满足此条件下, 收益共享合约可以协调风电商出力不确定风险下的风电供应链。

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

根据文3中的推导结论, 本文结合参考文献[23]对各参数赋值并进行算例分析, 可以更加直观地得出相应结论。用户市场需求根据文献[23], 假设  $D$  在  $800 \sim 1\,200 \text{ MW} \cdot \text{h}$  时服从均匀分布, 售电公司的售电价格  $p$  为  $712 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ , 其在现货市场的售电价格  $s$  为  $400 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ ; 风电商的发电成本系数  $c$  为  $600 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ , 合同电量单价  $\omega$  为  $500 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ 。此时收益共享系数  $\lambda = (\omega p + sc - s\omega - sp) / p(c - s) = 0.78$ ,  $q_c^M = q_c^S$ , 约束条件: 集中决策下的风电供应链保留利润为分散决策下风电供应链中售电公司保留利润的  $(p-s)/(\lambda p-s) = 2$  倍。此时供应链达到协调, 收益共享性合约能够优化不确定风险的风电供应链。

基于以上数据, 为了更加直观地分析风电商与售电公司的最优合约电量关于售电公司风险规避系数与风电出力不确定性的敏感性, 假设电力实现因子  $\eta$  服从均值为  $\mu$ 、方差为  $\sigma^2$  的正态分布, 随着参数  $\mu$ 、 $\sigma^2$  取值的变化对应风电商出力不确定性的变动, 从而可以分析风电商与售电公司的最优合同电量与风电出力波动性的关系。

### 4.2 最优合约电量对售电公司风险规避系数的敏感性

令  $\mu = 0.80$ ,  $\sigma = 0.10$ ,  $\beta \in [0.1, 1.0]$ , 在 Matlab 中,  $\mu$  和  $\beta$  的步长均取  $0.1$ ,  $\sigma$  的步长取  $0.05$ , 由此得出风险规避系数  $\beta$  对最优合约电量  $q_c^M$  的影响, 如图2所示, 可以看出, 售电公司越是风险规避 ( $\beta$  越小), 最优合约电量  $q_c^M$  (条件风险价值下) 越大且始终大于风险中性下的最优合约电量  $q^*$ , 且当  $\beta = 1.0$  时, 二者相等, 说明风险系数的引入对风电商与售电公司都是有利的。

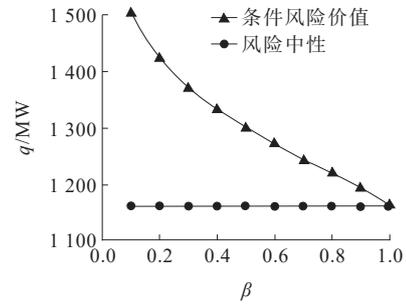


图2 最优合约电量对风险规避系数的敏感性

Figure 2 Sensitivity of optimal contract power to risk aversion coefficient

### 4.3 最优合约电量对不确定性均值敏感性

保持不确定性因子的标准差  $\sigma = 0.10$  不变, 改变均值  $\mu$  和风险规避系数  $\beta$ , 步长取  $0.10$ , 得出风电商的不确定性因子的均值  $\mu$  对最优合约电量  $q_c^M$  的影响, 如图3所示。

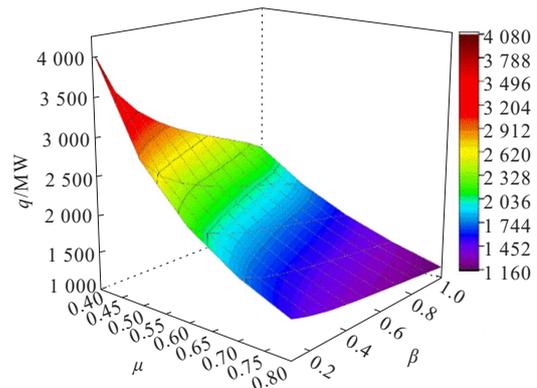


图3 最优合约电量对不确定性均值的敏感性

Figure 3 Sensitivity of optimal contract power to uncertainty mean

由图3可以看出, 售电公司无论是在风险中性 ( $\beta = 1.0$ ) 还是风险规避 ( $0.0 < \beta < 1.0$ ) 条件下, 最优合约电量都是随着  $\mu$  的增大而降低的, 这说明了在不确定性因子的均值较小时, 风电商的出力不确定性误差就会相对较大, 此时售电公司就会采取增加合约电量的方式, 以应对风电出力不确定性带来的市场电量需求的风险。当风险规避系数  $\beta$  越小 (售电公司越是风险规避) 时, 不确定性因子的均值  $\mu$  对风电商与售电公司的合约电量影响越大, 这表明售电公司的风险规避态度越强, 其对风电出力不确定性越敏感, 这与实际情况是相符的。

#### 4.4 最优合约电量对不确定性标准差的敏感性

保持不确定性因子均值 $\mu=0.60$ ,改变 $\sigma$ 、 $\beta$ ,步长分别取0.05和0.10,得出风电商不确定性标准差 $\sigma$ 对最优合约电量 $q_C^M$ 的影响,如表1和图4所示。

表1 最优合约电量对不确定性标准差的敏感性

Table 1 Sensitivity of optimal contract power to uncertainty standard deviation

$\beta$	不同 $\sigma$ 下的 $q_C^M/\text{kW}$				
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.1	2 202.09	2 711.12	3 431.14	4 463.05	6 051.43
0.2	2 030.23	2 343.50	2 720.68	3 160.52	3 674.97
0.3	1 927.44	2 143.96	2 379.23	2 622.55	2 870.27
0.4	1 851.58	2 005.32	2 158.05	2 300.22	2 428.55
0.5	1 789.80	1 897.24	1 993.99	2 073.13	2 133.90
0.6	1 736.21	1 806.66	1 861.51	1 896.86	1 914.10
0.7	1 687.14	1 726.27	1 747.78	1 750.17	1 736.71
0.8	1 640.09	1 651.16	1 644.24	1 620.21	1 583.60
0.9	1 591.90	1 675.80	1 542.71	1 495.65	1 439.79
1.0	1 530.13	1 480.14	1 415.39	1 340.01	1 258.12

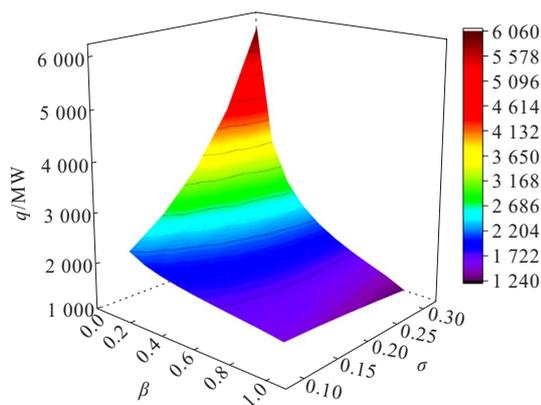


图4 最优合约电量对不确定性标准差的敏感性

Figure 4 Sensitivity of optimal contract power to uncertainty standard deviation

由表1和图4可以看出,当售电公司为风险中性( $\beta=1.0$ )时,风电出力的波动性越大( $\sigma$ 越大),售电公司的最优合约电量越降低,从而减少自己承担的不确定性风险;而当售电公司风险规避程度高( $0.0<\beta<0.6$ )时,其随着风电出力波动性的增大而会增加合约电量,以此规避风电出力不确定性风险来满足市场需求;当风险规避程度不高( $0.6<\beta<1.0$ )时,售电公司与风电商的合约电量随不确定性因子标准差 $\sigma$ 的变化程度要稍微缓和一些,这也是

符合实际情况的。

#### 4.5 收益共享合约下风电商与售电公司最优利润受批发价的影响

保持不确定性因子均值 $\mu=0.6$ 、 $\sigma=0.10$ 、 $\beta$ 步长取0.1,合同电量单价 $\omega$ 分别取450、500、550元/(MW·h)。得出风电商与售电公司利润受合同单价 $\omega$ 的影响,如图5、6所示。

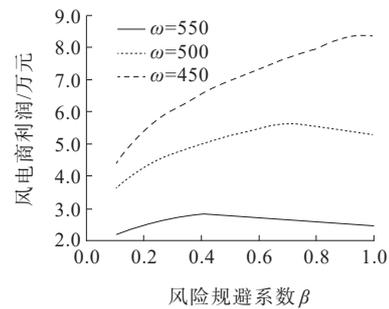


图5 风电商利润受合约电价的影响

Figure 5 Wind power business profits are affected by contract electricity prices

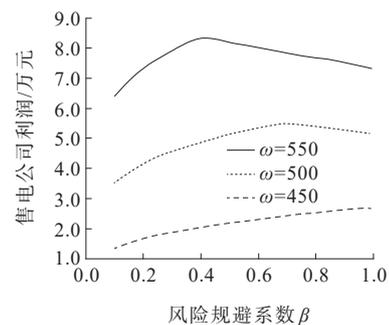


图6 售电公司利润受合约电价的影响

Figure 6 Electricity sales company profits are affected by contract electricity prices

当合同单价 $\omega$ 越大时,风电商的利润越小,售电公司的利润却越大,这与正常情况是相反的。原因就是风电商与售电公司之间引入了收益共享合约机制,最优收益共享系数随合同单价的变化而变化。该机制的引入,合理转移风电商与售电公司的风险与收益,通过双方确定适当的合约电价,使得风电供应链绩效达到最优。

## 5 结语

本文在风电商与售电公司组成的风电供应链中,引入收益共享合约机制,在分散决策的电力供

应链中,风电商降低风电售价,通过风电商与售电公司协商确定适当的收益比例参数 $\lambda$ ,即可使风电供应链达到协调。基于CVaR准则建立了风电商与售电公司利润模型,度量售电公司的风险效益,比较了风险中性与风险规避下售电公司与风电商最优合约电量,可得出售电公司风险规避程度越高,双方最优合约电量越大,且始终高于风险中性下的最优合约电量。分析了最优合约电量对于风电出力不确定性的敏感性,首先,最优合约电量对于不确定性均值的敏感性不依赖于售电公司的风险规避态度;其次,最优合约电量与风电商不确定性标准差对于风险规避程度十分敏感。

在出力不确定环境下的风电供应链中,收益共享合约机制可促进风电商参与电力市场积极性,提高风电商与售电公司市场利润,使得不确定环境下的风电供应链绩效达到最优。

#### 参考文献:

- [1] 康重庆,杜尔顺,张宁,等.可再生能源参与电力市场:综述与展望[J].南方电网技术,2016,10(3):16-23.  
KANG Chongqing, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Renewable energy trading in electricity market: review and prospect[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3):16-23.
- [2] 安麒,王剑晓,武昭原,等.高比例可再生能源渗透下的电力市场价值分配机制设计[J].电力系统自动化,2022,46(7):13-22.  
AN Qi, WANG Jianxiao, WU Zhaoyuan, et al. Benefit allocation mechanism design of electricity markets with penetration of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7):13-22.
- [3] 李军徽,侯涛,穆钢,等.电力市场环境下考虑风电调度和调频极限的储能优化控制[J].电工技术学报,2021,36(9):1791-1804.  
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Optimal control strategy for energy storage considering wind farm scheduling plan and modulation frequency limitation under electricity market environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9):1791-1804.
- [4] 徐博涵,向月,潘力,等.基于深度强化学习的含高比例可再生能源配电网就地分散式电压管控方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):100-110.  
XU Bohan, XIANG Yue, PAN Li, et al. Local decentralized voltage management of a distribution network with a high proportion of renewable energy based on deep reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22):100-110.
- [5] 国家发展改革委,国家能源局.关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知(发改能源〔2019〕807号)[EB/OL].http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201905/t20190515\_936194.html,2019-05-15.  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on establishing and improving the safeguard mechanism for renewable energy power consumption (Development and Reform Energy [2019]No. 807) [EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201905/t20190515\_936194.html, 2019-05-15.
- [6] 李铮,郭小江,申旭辉,等.我国海上风电发展关键技术综述[J].发电技术,2022,43(2):186-197.  
LI Zheng, GUO Xiaojiang, SHEN Xuhui, et al. Summary of technologies for the development of offshore wind power industry in China[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2):186-197.
- [7] 刘佳楠,熊宁,朱文广,等.电力市场环境下风光储联合运行优化策略[J].电力科学与技术学报,2017,32(1):11-15.  
LIU Jianan, XIONG Ning, ZHU Wenguang, et al. Research on optimal strategy of wind-PV-ES hybrid operation in electricity market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1):11-15.
- [8] 高小童,秦志龙,高新宇.含海上风电—光伏—储能的多能源发输电系统可靠性评估[J].发电技术,2022,43(4):626-635.  
GAO Xiaotong, QIN Zhilong, GAO Xinyu. Reliability evaluation of multi-energy generation and transmission system with offshore wind power-photovoltaic-energy storage[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4):626-635.
- [9] 臧鹏,杨德昌.多类型储能平抑风光联合发电系统控制策略研究[J].供用电,2022,39(7):32-39.  
ZANG Peng, YANG Dechang. Research on control strategy of multi-type energy storage flat wind-solar combined power generation system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7):32-39.
- [10] BARBOSE G, BIRD L, HEETER J, et al. Costs and benefits of renewables portfolio standards in the United States[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52:

- 523-533.
- [11] BARINGO L, CONEJO A J. Strategic offering for a wind power producer[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4645-4654.
- [12] DE LA NIETA A A S, CONTRERAS J, MUÑOZ J I, et al. Modeling the impact of a wind power producer as a price-maker[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2723-2732.
- [13] 姚方, 王佳伟, 文福拴, 等. 计及碳税的含风电和储能的电力系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 37-46.  
YAO Fang, WANG Jiawei, WEN Fushuan, et al. Economic dispatch for a power system containing wind power and energy storage with Carbon tax considered[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 37-46.
- [14] 王立平, 邹朋, 周全, 等. 基于水光互补的多个虚拟电厂两阶段优化调度方法[J]. 供用电, 2022, 39(3): 92-98.  
WANG Liping, ZOU Peng, ZHOU Quan, et al. Two-stage optimized scheduling method of multiple virtual power plants based on hydro-solar complementary[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(3): 92-98.
- [15] 王云会, 郑强仁, 郭森, 等. 配电网中广义虚拟电厂的柔性优化规划问题研究[J]. 供用电, 2022, 39(3): 18-24+39.  
WANG Yunhui, ZHENG Qiangren, GUO Miao, et al. Research on flexible optimal planning of generalized virtual power plant in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(3): 18-24+39.
- [16] 鞠立伟, 秦超, 吴鸿亮, 等. 计及多类型需求响应的风电消纳随机优化调度模型[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1839-1846.  
JU Liwei, QIN Chao, WU Hongliang, et al. Wind power accommodation stochastic optimization model with multi-type demand response[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1839-1846.
- [17] 姜曼, 刘定宜, 叶泽, 等. 考虑售电公司的跨省区电力交易的资源配置分析[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 120-127.  
JIANG Man, LIU Dingyi, YE Ze, et al. Resource allocation analysis of cross-provincial power trading with the participation of power selling company[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 120-127.
- [18] XU Q Y, ZHANG N, KANG C Q, et al. A game theoretical pricing mechanism for multi-area spinning reserve trading considering wind power uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1084-1095.
- [19] 但斌, 伏红勇, 徐广业, 等. 风险厌恶下天气影响产出的农产品供应链协调[J]. 系统工程学报, 2014, 29(3): 362-370.  
DAN Bin, FU Hongyong, XU Guangye, et al. Coordination of agri-food supply chain with weather-related yield under risk-averse producer[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(3): 362-370.
- [20] 朱传波, 季建华, 曾顺秋. 供应突发事件下基于CVaR的供应链订货决策及协调[J]. 管理工程学报, 2015, 29(2): 202-209.  
ZHU Chuanbo, JI Jianhua, ZENG Shunqiu. Supply chain ordering decision and coordination mechanism based on CVaR under supply disruption[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2015, 29(2): 202-209.
- [21] 高佳, 王旭. 供需同时不确定关系型供应链契约设计与决策[J]. 中国管理科学, 2016, 24(12): 127-138.  
GAO Jia, WANG Xu. Contract design and decision making of multi-uncertainty relational supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(12): 127-138.
- [22] 罗舒瀚, 蒋传文, 王旭, 等. 新电改背景下售电公司的购售电策略及风险评估[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 944-953.  
LUO Shuhan, JIANG Chuanwen, WANG Xu, et al. Power trading strategy and risk assessment of electricity retailing company under power system reform [J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 944-953.
- [23] 孔令丞, 涂改革, 张英辉. 非对称信息下可再生能源并网机制设计[J]. 管理评论, 2018, 30(5): 249-261.  
KONG Lingcheng, TU Gaige, Zhang Yinghui. Design of grid-connected renewable energy mechanism under asymmetric information[J]. Management Review, 2018, 30(5): 249-261.
- [24] 孔令丞, 李仲, 梁玲, 等. 供需数量不确定下可再生能源发电容量投资决策[J]. 管理工程学报, 2019, 33(2): 166-172.  
KONG Lingcheng, LI Zhong, LIANG Ling, et al. Renewable energy source power capacity investment under uncertain demand and supply[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2019, 33(2): 166-172.
- [25] ROCKAFELLAR R T, URYASEV S. Optimization of conditional value-at-risk[J]. The Journal of Risk, 2000, 2(3): 21-41.
- [26] 周娟, 江辉, 李鹏. 基于WCVaR风险度量的发电商电量分配模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 156-160.  
ZHOU Juan, JIANG Hui, LI Peng. Optimization portfolio allocation for generation companies based on worst-case conditional value-at-risk[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2012, 24(1): 156-160.