

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180818

# 促进新能源消纳的自备电厂参与替代交易风险管理研究

李东波<sup>1</sup>, 李凤婷<sup>1</sup>, 宋学强<sup>2</sup>, 张新伟<sup>2</sup>, 陈伟伟<sup>3</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆电力交易中心有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002;  
3. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 由于市场价格等因素的不确定性, 自备电厂企业在参与替代交易中需要综合考虑利润和风险的均衡问题。考虑电价风险、电量风险、燃煤成本等主要风险, 利用金融管理当中的效用函数和 CVaR 方法, 建立自备电厂企业的风险评估决策模型。通过二次规划求解参与替代交易的电量在不同市场环境的最优分配系数和 CVaR 值。分析了决策者的不同风险厌恶度、违约行为、燃煤成本变化对交易的电量分配系数、期望利润、CVaR 值的影响。研究表明, 该模型能够准确反映自备电厂企业不同交易策略所带来的收益和自备电厂企业参与替代交易面临的风险大小, 使交易收益最大化、风险最小化。

**关键词:** 自备电厂; 替代交易; CVaR; 风险管理; 电量分配

## Research on risk management of participatory alternative power plants to promote new energy consumption

LI Dongbo<sup>1</sup>, LI Fengting<sup>1</sup>, SONG Xueqiang<sup>2</sup>, ZHANG Xinwei<sup>2</sup>, CHEN Weiwei<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Xinjiang Electric Power Trading Center Co., Ltd., Urumqi 830002, China; 3. Economics and Technology Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** Due to the uncertainty of factors such as market price, self-provided power plant enterprises need to consider the balance of profit and risk in participating in alternative transactions. This paper considers the main risks such as electricity price risk, electricity risk and coal burning cost, and uses the utility function and CVaR method in financial management to establish a risk assessment decision model for self-sufficient power plant enterprises. Through the quadratic programming, the optimal partition coefficient and CVaR value of the electricity participating in the alternative transaction in different market environments are solved. The influences of different risk aversion, default behavior, coal cost changes on the electricity distribution coefficient, expected profit and CVaR value of the decision makers are analyzed. The research shows that the model can accurately reflect the benefits brought by different trading strategies of captive power plant enterprises and the risk of self-sufficient power plant enterprises participating in alternative transactions, so as to maximize the return of transactions and minimize risks.

This work is supported by Xinjiang Science and Technology Support Project (No. 2017E0277).

**Key words:** self-supplied power plant; alternative transaction; CVaR; risk management; electricity distribution

## 0 引言

近年来, 为促进节能减排, 改善环境条件, 充分利用可再生能源, 新能源发电的比例越来越高, 但由于风光发电自身特性以及输送能力的限制导致了严重的弃风弃光现象。同时, 近些年自备电厂的迅猛发展导致公用电源装机规模与消纳负荷倒挂,

供需矛盾突出, 使得电网的调峰能力缺额大<sup>[1]</sup>, 严重威胁电网的运行安全。

基于以上情况, 已经有部分地区出台了替代交易。替代交易是在保证电网正常运行、全额消纳新能源、满足本区域用电需求和外送电的基础上, 通过新能源企业替代自备电厂企业的发电权, 实质性提高新能源的发电量。文献[2-4]分析了开展自备电厂发电权转让交易的必要性, 制定了替代交易组织流程, 分别建立了考虑网损、交易成本、社会效用

的交易模型。文献[5-6]提出了新能源企业与自备电厂间的发电权转让交易模式, 通过论述交易现状、政策调研分析了替代交易的可行性, 建立了新能源企业与自备电厂企业的替代交易模型, 证明双方在发电权替代交易下可达到利益平衡, 实现共赢。

自备电厂企业是替代交易的关键, 其收益的大小直接决定了是否参与替代交易。因此, 为提高自备电厂企业市场竞争性, 保证自身交易收益最大和风险最小的目标, 有必要分析在替代交易中面临的风险因素, 并进行风险的评估和控制, 从而制定有效的交易策略。文献[7-8]利用组合理论和多阶段竞价建立了多市场组合策略模型, 使社会效益和环境效益最优; 文献[9]利用风险投资中的马科维茨理论建立了供电公司综合收益和风险双目标的决策模型, 通过计算得到了供电公司在不同市场环境下的最优购电分配方案; 文献[10-11]分别用方差和 VaR 风险度量工具描述了不同交易购电组合对收益和风险的影响; 文献[12-13]对不同风险度量工具进行了归纳总结, 指出了 VaR 存在难以量化潜在风险损失和可能存在多个局部最优解的局限性。文献[14-15]提出了采用条件风险价值 CVaR(Conditional Value at Risk)度量电力企业的交易风险, 建立了以 CVaR 最小化为目标函数的最优购电分配模型。

基于此, 本文分析了自备电厂企业在替代交易中的主要风险因素, 利用效用函数和 CVaR 建立了自备电厂参与替代交易的均值-CVaR 风险评估决策模型, 最后求解得到了自备电厂在不同市场环境的交易分配方案、收益、风险值, 使自备电厂企业交易利润最大化、风险最小化, 从而验证了该模型的有效性, 为自备电厂企业参与交易决策和风险评估提供一条新途径。

## 1 自备电厂企业参与替代交易风险分析

自备电厂企业是替代交易的重要参与方, 在替代交易中, 自备电厂企业与新能源企业签订交易合同, 将发电权部分或全部转让给新能源企业, 并提供一定的调峰辅助服务, 按时完成交易用电量, 及时支付用电费用。在交易过程中由于各类风险因素可能导致交易收益发生较大的变化, 本文主要考虑价格风险、履约风险、燃煤成本风险等主要风险因素。

在替代交易中, 电价的波动是各参与方最为关注的问题, 也是风险分析中的核心因素。通常自备电厂和新能源企业签订中长期合约, 在合同执行的过程中, 由于市场价格波动直接使参与方利润发生变化, 此类风险为价格风险。

履约风险是指各参与方未能按照交易合同的要求完成发电或用电量。自备电厂企业尽管会有长期的用电量规划及预测, 但也无法排除管理不当和发生异常情况而导致无法完成与新能源企业约定的用电量, 此外由于人的趋利本性而使自备电厂企业故意产生违约行为, 转投利润更高的市场, 此类风险为履约风险。

在一段时期内由于煤价的波动会导致自备电厂企业的燃煤成本发生变化, 从而间接地影响自备电厂企业参与替代交易的收益, 当煤电价格下降时, 自备电厂的燃煤成本就会降低, 自备电厂的发电成本和交易价格差就会降低, 因此自备电厂企业的相对利润就会减小, 此类风险为燃煤成本风险。

## 2 参与能源替代的自备电厂企业风险评估方法

本文借助金融风险管理当中的效用函数、VaR、CVaR 对替代交易中的自备电厂企业的收益和风险进行评估。VaR 和 CVaR 能够定量表示交易风险的大小, 效用函数是综合收益和风险的综合性指标。

### 2.1 效用函数

电价风险作为交易风险当中最主要的风险因素, 本文利用金融风险管理中的投资组合理论来减小替代交易中自备电厂的价格风险, 从而达到交易后利润最大, 而风险最小的目的。根据现代投资组合理论, 通过最大化自备电厂企业的效用可以找到最优的交易组合。所谓效用, 是指在计及风险因素的情况下自备电厂企业对潜在利润的认可程度, 效用可用计及风险偏好的效用方程来描述, 如式(1)所示<sup>[16-17]</sup>。

$$U = E(B) - K \cdot V^2(B) \quad (1)$$

式中:  $U$  表示效用值, 是自备电厂企业考虑利润和风险的综合性指标;  $E(B)$  表示自备电厂的期望利润;  $V(B)$  表示自备电厂的条件风险价值 CVaR;  $K$  为风险惩罚系数, 反映交易决策者对风险的厌恶程度, 其值越高表示决策者对风险越厌恶,  $K = A/2C$ ,  $C$  为自备电厂交易前的燃煤和备用成本,  $A$  的取值可以根据金融管理中对风险的厌恶等级划分得到<sup>[18]</sup>。

### 2.2 风险价值 VaR

VaR 称为风险价值<sup>[19]</sup>, 用来测量交易组合当中的风险度, 帮助决策者定量分析风险水平。VaR 是指市场各类因素的正常变化范围内, 某一投资交易组合的最大可能损失。更为确切的解释为, 决策者在一定的置信水平下, 其投资交易组合价值在未来一定时间内的最大可能损失<sup>[20]</sup>。其数学表达式

可以表示为

$$\text{Prob}(\Delta P > \text{VaR}) = 1 - \beta \quad (2)$$

式中： $\beta$  为置信度； $\Delta P$  为交易投资组合当中在交易期的损失； $\text{Prob}$  表示交易组合损失大于 VaR 的概率是  $1 - \beta$ ；如某一投资企业的交易组合在未来一天内，置信度为 90%，由于市场各种因素的变化，交易的 VaR 值为 50 万元，其表明，某企业的投资交易组合在一天内，由于市场价格等因素的波动而造成的最大损失值超过 50 万元的概率为 10%。

### 2.3 条件风险价值 CVaR

CVaR 称为条件风险价值，是为了弥补 VaR 的多种缺陷而提出的，其表示交易组合的损失超过 VaR 的平均值，体现了交易超额损失平均值的大小<sup>[21]</sup>。

设  $f(x, y)$  表示投资组合的损失函数，其中  $x \in X$ ， $X$  为满足条件的投资组合可行集， $x$  表示每个市场中的投资比例， $y$  表示影响投资收益的随机因素，可以是市场价格等因素。设  $p(y)$  为随机变量  $y$  的概率密度，则  $f(x, y)$  关于  $y$  不超过某一持有水平  $a$  的分布函数为

$$\psi(x, \alpha) = \int_{f(x, y) \leq \alpha} p(y) dy \quad (3)$$

对于任意固定的  $X$ ，作为  $\alpha$  的函数是在投资组合  $X$  下的损失累积分布函数，该函数关于  $\alpha$  是非减且右连续。

因此，在一定的置信水平下的风险价值 VaR 和条件风险价值 CVaR 分别定义为

$$\alpha_\beta = \min \{ \alpha \in R : \psi(x, \alpha) \geq \beta \} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \phi_\beta(x) &= E[f(x, y) | f(x, y) \geq \alpha_\beta(x)] = \\ &= \frac{1}{1 - \beta} \int_{f(x, y) \geq \alpha_\beta(x)} f(x, y) p(y) dy \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可以看出 CVaR 是在 VaR 的基础上定义的，由于 CVaR 中包含了 VaR 函数  $\beta$  的  $\alpha_\beta$  项， $\alpha_\beta$  的求解较为麻烦，根据文献[22]的推导证明，可以用  $F_\beta(x, \alpha)$  代替  $\phi_\beta$ ，且

$$F_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1 - \beta} \int_{y \in R^m} [f(x, y) - \alpha]^+ p(y) dy \quad (6)$$

$[f(x, y) - \alpha]^+$  表示  $\max\{0, f(x, y) - \alpha\}$ 。

通常情况很难得到  $p(y)$  的概率密度表达式，可以利用  $y$  的历史数据或者蒙特卡罗法模拟样本数据进行估计：

$$\tilde{F}_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{m(1 - \beta)} \sum_{k=1}^m [f(x, y^k) - \alpha]^+ \quad (7)$$

### 3 自备电厂考虑利润与风险的决策模型

自备电厂企业与新能源企业替代交易发展尚处于初期阶段，双边交易模式简单灵活，能够充分地使交易双方考虑自身利益达到深度博弈的结果。当采用双边交易模式时，自备电厂企业与新能源企业直接签订合同，确定交易价格，交易结算按照输配电价法执行，电网企业负责将交易的电量输送给自备电厂企业，收取一定的过网服务费。

自备电厂企业是能源替代的主动参与方，是替代交易完成的关键。本文考虑整体效益最大化，将部分或所有的自备电厂企业看成一个交易整体。替代交易合约分为日前、月度、年度合约。自备电厂企业和新能源企业通过双边交易确定交易价格。假设能源替代未来一年的交易在日前、月度、年度 3 个交易环境下的交易价格为  $P_{t,i} = (P_{t,1}, P_{t,2}, P_{t,3})$ ，自备电厂企业的购电价格为交易价格加上输配电价和政府性基金附加，即

$$P_i = (P_1, P_2, P_3) = P_{t,i} + P_s + P_z \quad (8)$$

式中： $P_s$  表示输配电价； $P_z$  表示政府性基金及附加； $\lambda_i$  表示 3 个不同交易市场的交易量占比，自备电厂转让发电权交易后的第  $i$  个交易市场的双边交易利润为

$$B_{z,i} = \lambda_i \times Q_0 \times [(1 - \beta_i) \times (C_r - P_i) - \beta_i \times k + 0.1 C_b] \quad (9)$$

$$k = \beta_1 \times P_a \quad (10)$$

式中： $Q_0$  表示替代交易未来一年内的总交易量； $\beta_1$  表示自备电厂企业在一个交易替代合同的违约比例； $P_i$  表示不同市场环境下交易合约的交易价格，可分为日前、月度、年度 3 个不同的交易区间； $k$  是惩罚因子，表示对自备电厂未按合同要求完成用电量的惩罚程度，自备电厂违约比例  $\beta_1$  越高， $k$  值越大，惩罚力度就越大； $P_a$  表示自备电厂在 3 个交易市场的购电价格的平均值； $C_r$  表示自备电厂企业在参与替代交易前的单位燃煤发电成本，即在参与替代交易中的相对成本； $C_b$  表示自备电厂企业参与系统调峰单位补贴，参与系统调峰的容量暂按 10%。

自备电厂企业在第  $i$  个交易市场的期望利润为

$$E(B_{z,i}) = \lambda_i \times Q_0 \times [(1 - \beta_i) \times (C_r - E(P_i)) - \beta_i \times k + 0.1 C_b] \quad (11)$$

自备电厂企业参与能源替代整个市场交易的期望利润为

$$E(B_z) = Q_0 \sum_{i=1}^3 \lambda_i [(1 - \beta_1) \times (C_r - E(P_i)) - \beta_1 \times k + 0.1C_b] \quad (12)$$

同时自备电厂企业参与替代交易的损失函数可以表示为负的收益, 如式(13)。

$$f(x, P) = -B_z = Q_0 \sum_{i=1}^3 \lambda_i [(1 - \beta_1) \times (P_i - C_r) + \beta_1 \times k - 0.1C_b] \quad (13)$$

取自备电厂企业的购电价格  $P_i = (P_1, P_2, P_3)$  的  $m$  个样本值  $P_1, P_2, \dots, P_m$ , 因此表达式(7)可以表示为

$$\tilde{F}_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{m(1 - \beta)} \sum_{k=1}^m \left[ Q_0 \sum_{i=1}^3 \lambda_i [(1 - \beta_1) \times (P_i - C_r) + \beta_1 \times k - 0.1C_b] - \alpha \right]^+ \quad (14)$$

设辅助变量  $z_k = [f(x, P^k) - \alpha]^+$ ,  $z_k \geq 0$  且  $z_k \geq f(x, P^k) - \alpha$ , 这样就可以将表达式(14)线性化, 则通过以上条件, 可以建立使自备电厂企业利润最大化, 风险最小化的决策优化模型。

$$\begin{cases} \text{Max}_{\lambda_i} U = E(B_z) - \frac{A}{2C} \cdot V^2(B_z) \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1 & 0 \leq \lambda_i \leq 1 \\ z_k \geq f(x, P^k) - \alpha \\ z_k \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

该优化组合问题属于二次规划问题, 利用 Matlab 软件可以求解得到不同交易市场的电量分配比例  $\lambda_i$  和 CVaR。

## 4 算例分析

在以上理论分析基础之上, 考虑替代交易不同市场电价波动和交易利润随机变化等特性的差异, 本文假设未来一年内某地区的自备电厂用电量为  $2 \times 10^5$  MWh, 替代交易的输配电价参考某地区的输配电价取 23.08 \$/MWh, 政府性基金及附加取 1.54 \$/MWh。自备电厂企业成本包括燃煤成本和备用成本, 其综合单位成本为 38.46 \$/MWh, 自备电厂企业参与系统调峰单位补贴为 30.76 \$/MWh。不同市场环境的交易电价分布如表 1 所示。

表 1 不同市场环境的交易电价

Table 1 Transaction price of different market environment

	\$/MWh		
	日前市场	月度市场	年度市场
均值	7.69	9.23	10.79
方差	13.6	8.7	3.0

本文按照正态分布随机产生 100 组购电价格样本数据, 作为模拟购电交易市场历史数据, 利用 Matlab 进行优化求解。

### 4.1 不同交易分配策略比较

如表 2 所示, 对不同交易电量分配策略的比较, 按日分配法和按年分配法都是比较极端的电量分配策略, 按日分配法是为了追求更高的利润, 将全部电量分配到月度市场上, 同时也面临着很高的风险。按年分配策略是将全部的电量分配在年度市场, 虽然降低了电价风险, 但是利润期望值也随之减少, 即以牺牲利润为代价来降低电价风险, 该分配策略过于保守。平均分配法是将全部电量平均分配到日前、月度、年度 3 个交易市场, 平均分配法相比于按日、按年分配法既考虑了电价风险又兼顾了利润, 因此其效用值相对较高。对于本文采用的最优分配法, 根据不同市场的价格及风险大小来确定不同交易市场的电量分配, 充分考虑风险和利润的影响, 使交易结果的效用值达到最大, 如表 2 所示, 对比四种分配策略中, 最优分配组合交易相比于常规交易方案能够降低交易风险, 增加收益, 使交易结果的效用值最大。

表 2 不同分配策略交易结果

Table 2 Different allocation strategy trading results

	\$/MWh		
分配策略	效用值 ( $\times 10^6$ )	利润期望 ( $\times 10^6$ )	利润方差 ( $\times 10^{11}$ )
按日分配法	1.027 4	1.568 2	2.448 0
按年分配法	0.985 2	1.238 8	0.894 2
平均分配法	1.093 7	1.386 0	1.382 6
最优分配法	1.192 0	1.500 4	1.443 6

### 4.2 不同风险厌恶度下的决策结果

利用 Matlab 中的二次规划算法求解式(15), 得到了在自备电厂企业不同风险厌恶程度下的不同市场环境的电量分配比例, 如表 3 所示, 根据计算结果可知, 能源替代参与方的期望利润和效用值都为正值, 验证了该交易能够给自备电厂企业带来收益。

当风险厌恶程度  $K=0$  时, 即对风险处于中立时, 决策者不考虑利润风险, 只追求期望利润最大化, 因此将交易电量投放在利润大, 风险高的日前市场。随着决策者对风险厌恶程度的增加, 为避免利润风险, 决策者应在月度市场和年度市场中增加交易电量比例, 此时, 期望利润和效用值随之减少, 利润方差也会逐渐减小, 即以牺牲利润的方式减小风险。因此, 决策者可以根据自身对风险的偏好去确定不同市场的电量分配比例, 从而确定自身利润最大, 风险最小的交易方案。

表 3  $\beta=0.95$  时不同风险厌恶度的组合交易结果  
Table 3 Different risk aversion degree combination trading results when  $\beta=0.95$

K				\$/MWh		
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	期望利润 ( $\times 10^6$ )	效用值 ( $\times 10^6$ )	CVaR ( $\times 10^6$ )
0	1.000 0	0.000 0	0.000 0	1.808 5	1.800 0	0.720 6
3	0.735 3	0.264 7	0.000 0	1.735 1	1.478 1	0.687 9
6	0.424 7	0.305 6	0.269 7	1.574 8	1.227 5	0.643 2
8	0.315 3	0.255 0	0.429 7	1.500 4	1.192 0	0.584 2
12	0.278 2	0.237 8	0.484 0	1.475 1	1.154 7	0.501 8
16	0.204 9	0.203 9	0.591 2	1.425 3	1.056 2	0.448 7
20	0.160 9	0.183 6	0.655 5	1.395 4	0.967 5	0.381 3
60	0.043 7	0.129 4	0.826 9	1.315 7	0.874 5	0.240 6

根据自备电厂企业对交易风险厌恶程度的不同, 分别求解出自备电厂企业的期望利润和 CVaR 值, 从而得到组合交易的有效前沿<sup>[23]</sup>, 如图 1 所示。有效前沿上的点是在一定风险水平下, 满足交易收益最大的交易组合, 或在一定的期望利润下, 满足交易风险最小的交易组合, 满足这些条件的所有集构成了有效前沿, 有效前沿的下方区域为交易组合的有效区域。随着 CVaR 值的不断减小, 期望利润也随之减小, 这符合高收益伴随高风险的客观价值规律。不同置信度对应的有效前沿不同, 如图 1 所示, 随着置信度的增加, 交易的有效前沿向右移动, 表明在相同的期望利润下, 置信度越高其 CVaR 值越大, 即投资决策者面临的风险水平越高。

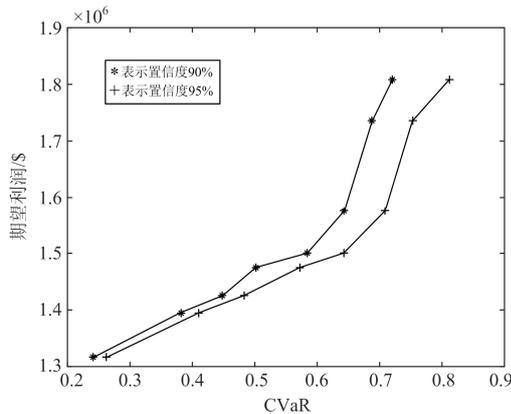


图 1 不同置信度下交易组合的有效前沿  
Fig. 1 Effective frontier of trading portfolios with different confidences

### 4.3 煤电成本和违约电量对交易的影响

自备电厂企业的发电成本变化主要体现在煤电价格的波动。燃煤发电成本的变化将会直接影响市场交易价格和自备电厂企业的收益, 从而改变交易电量最优分配系数。不同燃煤成本下降量对交易结果的影响如表 4 所示。

表 4  $K=8, \beta=0.95$  不同燃煤成本变化量的结果  
Table 4 Trading results for different coal cost changes when  $K=8, \beta=0.95$

R				\$/MWh		
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	期望利润 ( $\times 10^6$ )	效用值 ( $\times 10^6$ )	CvaR ( $\times 10^6$ )
1	0.383 2	0.261 1	0.355 7	1.702 9	1.395 6	0.745 7
2	0.322 9	0.386 4	0.290 7	1.626 6	1.110 8	0.784 2
3	0.291 5	0.435 8	0.272 7	1.534 9	0.996 3	0.839 8
4	0.266 3	0.494 5	0.239 2	1.407 9	0.825 5	0.892 7
5	0.261 0	0.543 6	0.195 4	1.285 5	0.689 7	0.949 6
6	0.212 6	0.610 5	0.176 9	1.114 6	0.604 6	0.987 9
7	0.160 9	0.724 7	0.114 4	1.091 6	0.473 2	1.024 3
8	0.152 3	0.760 8	0.086 9	0.910 7	0.264 4	1.068 8

如表 4 所示,  $R$  表示自备电厂企业燃煤成本的变化量, 为分析煤价带来的风险, 本文只考虑煤电价格下降的影响。当煤电价格下降时, 自备电厂的燃煤成本就会降低, 因此自备电厂企业的相对利润就会减小。随着燃煤成本的不断降低, 不同市场的交易电量比例日前市场和年度市场的分配系数不断降低, 月度市场的分配系数不断增加, 这是由于燃煤成本降低的同时, 自备电厂的期望利润随之减小, 年度市场价格较低, 因此年度市场分配系数逐渐降低。虽然日前交易价格较高, 但由于日前交易价格波动较大, 所面临的交易风险大, 因此日前交易的分配系数也随之减小。月度市场既兼顾了价格又考虑了风险, 因此月度市场分配系数逐渐增加, 才能使交易效用最大化。因此, 自备电厂企业应当根据煤电价格波动的历史数据和先进的煤电预测技术预测交易合同期内的煤电价格从而确定最佳分配系数。

取自备电厂决策者对风险的厌恶程度为 8, 对不同的违约电量, 其期望利润、效用值变化趋势如图 2 所示, 随着自备电厂违约比例的增加, 期望利

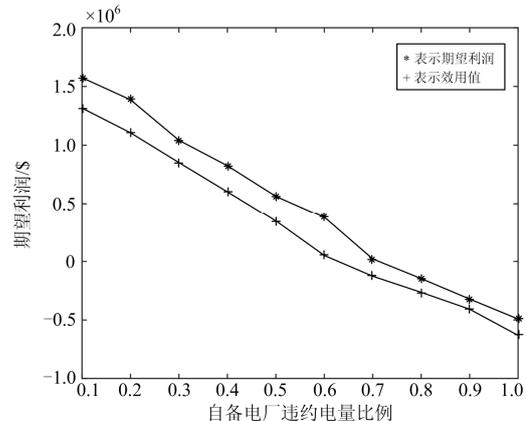


图 2 不同违约电量的期望利润和效用值  
Fig. 2 Expected profit and utility value of different default electricity

润、效用值都在不断地减小, 说明期望利润和效用值具有一致性。当自备电厂企业的违约电量达到一定的比例时期望利润和效用值都为零, 因此自备电厂企业应该制定合理的用电计划, 减小因违约带来的损失。

## 5 结论

通过分析自备电厂企业在替代交易中的电价风险、电量风险、燃煤成本等主要风险, 提出了基于双边交易的替代交易收益模型, 结合金融领域的效用函数和的 CVaR 风险评估方法建立了自备电厂企业风险评估决策模型, 该评估模型研究了自备电厂在不同交易市场由于电价差异和波动情况的交易电量最优分配方案, 使自备电厂企业交易利润最大、风险最小。最后分析了违约电量和燃煤成本对交易电量分配系数、利润、CVaR 的影响。计算结果表明:

1) 该评估决策模型能够准确反映自备电厂企业不同交易策略所带来的收益和风险价值, 相比于常规决策模型能够降低交易风险, 增加收益, 使交易结果的效用值最大。

2) 交易决策者对风险厌恶程度越高, 越重视风险因素, 年度交易市场的电量比例越高, 从而降低交易风险, 但也会降低期望利润。

3) 燃煤成本的降低和违约电量的增加均会改变自备电厂企业的交易电量最优分配系数、降低交易的期望利润、增加 CVaR。因此自备电厂企业应利用历史数据和先进的预测技术确定燃煤成本和违约电量, 从而选择最优分配系数。

因此, 本文提出的评估模型能够积极推动自备电厂企业参与促进新能源消纳的替代交易, 充分挖掘自备电厂企业的调峰能力。

## 参考文献

- [1] 耿静, 严正, 蒋传文, 等. 考虑环境成本的调峰权交易研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 111-114.  
GENG Jing, YAN Zheng, JIANG Chuanwen, et al. The studies of peak regulation transaction considering environment costs[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 111-114.
- [2] 白雪. 节能减排目标下的自备电厂发电权转让交易研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
BAI Xue. Research on generation rights trade of self-generation power plants consider energy-saving emission reduction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [3] 张显, 耿建, 庞博, 等. 发电权交易在中国节能减排中的应用及分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 87-90.  
ZHANG Xian, GENG Jian, PANG Bo, et al. Application and analysis of generation right trade in energy-saving and emission reduction in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 87-90.
- [4] 杨胡萍, 严飞飞, 张力, 等. 考虑静态电压稳定约束的低网损发电权交易优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 45-49.  
YANG Huping, YAN Feifei, ZHANG Li, et al. Optimization of low network loss generation right transaction considering steady state voltage stability constraint[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 45-49.
- [5] 华夏, 罗凡, 张建华, 等. 促进新能源消纳的自备电厂发电权交易模式可行性探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 200-206.  
HUA Xia, LUO Fan, ZHANG Jianhua, et al. Feasibility analysis of trade mode promoting new energy consumption based on generation rights trade of self-generation power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 200-206.
- [6] 周竞, 王珂, 王维洲, 等. 自备电厂参与新能源消纳的交易模式效益分析及应用探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 145-150.  
ZHOU Jing, WANG Ke, WANG Weizhou, et al. Benefit Analysis and application discussion of trading mode with self-owned power plant participating in renewable energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 145-150.
- [7] 郭源善, 匡洪辉, 郭少青, 等. 协调中长期市场交易计划与日发电计划的周机组组合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 78-82.  
GUO Yuanshan, KUANG Honghui, GUO Shaoqing, et al. Research on weekly unit commitment strategy harmonizing long term market tradeplanning and daily generation scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 78-82.
- [8] 宋巍, 王佳伟, 赵海波, 等. 考虑需求响应交易市场的虚拟电厂多阶段竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 35-45.  
SONG Wei, WANG Jiawei, ZHANG Haibo, et al. Research on multi-stage bidding strategy of virtual power plant considering demand response market[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 35-45.
- [9] 刘皓明, 韩蜜蜜, 侯云鹤, 等. 供电公司多能量市场最优购电组合的加权 CVaR 模型[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 133-138.  
LIU Haoming, HAN Mimi, HOU Yunhe, et al. A mean-weighted CVaR model for distribution company's optimal portfolio in multi-energy markets[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 133-138.

- [10] 刘春辉, 刘敏. 电力市场环境考虑大用户直购电的电网公司风险管理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 94-101.  
LIU Chunhui, LIU Min. Study on risk management for power grid company considering large consumers direct electricity purchasing in electricity markets[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 94-101.
- [11] 张宗益, 亢娅丽, 郭兴磊. 基于谱风险度量的大用户直购电组合模型分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 266-270.  
ZHANG Zongyi, KANG Yali, GUO Xinglei. Model analysis of large consumers' power purchase portfolio based on spectral measures of risk[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 266-270.
- [12] 雷霞, 刘俊勇, 党晓强. 配电市场购售电优化模型研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 136-145.  
LEI Xia, LIU Junyong, DANG Xiaoqiang. Review of optimal models of purchase and sale in distribution electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 136-145.
- [13] 刘伟佳, 尚金成, 周文玮, 等. 基于多重分形理论的电力市场风险价值评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 48-54.  
LIU Weijia, SHANG Jincheng, ZHOU Wenwei, et al. Evaluation of value-at-risk in electricity markets based on multifractal theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 48-54.
- [14] 王金凤, 李渝曾, 张少华. 基于 CVaR 的供电公司电能购买决策模型[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 19-23.  
WANG Jinfeng, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. CVaR-based electricity purchase model for power supply company[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 19-23.
- [15] 朱文昊, 谢品杰. 基于 CVaR 的峰谷分时电价对供电公司购电组合策略影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 16-21.  
ZHU Wenhao, XIE Pinjie. Influence analysis of CvaR model based TOU electricity price on portfolio strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 16-21.
- [16] LIU M, WU F F. Managing price risk in a multimarket environment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1512-1519.
- [17] 姚海祥, 李仲飞. 不同借贷利率下的投资组合选择——基于均值和 VaR 的效用最大化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(1): 22-28.  
YAO Haixiang, LI Zhongfei. Portfolio selection with different borrowing-lending rates: utility maximization model based on mean and VaR[J]. System Engineering Theory and Practice, 2009, 29(1): 22-28.
- [18] 刘敏, 吴复立. 电力市场环境发电公司风险管理框架[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 1-6.  
LIU Min, WU Fuli. A framework for generation risk management in electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 1-6.
- [19] 郭兴磊, 张宗益, 亢娅丽, 等. 基于 CVaR 模型的大用户直购电决策分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 32-37.  
GUO Xinglei, ZHANG Zongyi, KANG Yali, et al. Research on direct-power-purchasing decision of large consumers based on CVaR model[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 32-37.
- [20] 熊尚飞, 邹小燕. 电力市场价格风险价值与波动预测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 146-153.  
XIONG Shangfei, ZOU Xiaoyan. Value at risk and price volatility forecasting in electricity market: a literature review[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 146-153.
- [21] 徐辉, 焦扬, 蒲雷, 等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3590-3597.  
XU Hui, JIAO Yang, PU Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for virtual power plant of integrated wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3590-3597.
- [22] 易国伟, 童小娇, 周鹏, 等. CVaR 和 EVaR 安全运行风险管理下的电力系统经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 49-56.  
YI Guowei, TONG Xiaojiao, ZHOU Peng, et al. Power system economic dispatch under CVaR and EVaR security operation risk management[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 49-56.
- [23] 王秀国, 王义东. 基于随机基准的动态均值-方差投资组合选择[J]. 控制与决策, 2014, 29(3): 499-505.  
WANG Xiuguo, WANG Yidong. Dynamic mean-variance portfolio selection based on stochastic benchmark[J]. Control and Decision, 2014, 29(3): 499-505.

收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2018-10-19

作者简介:

李东波(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场交易风险评估; E-mail: k8722159902@163.com

李凤婷(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为风电场风速与风电功率预测; E-mail: xjlf2009@sina.com

宋学强(1987—), 男, 工程师, 主要从事电力系统分析、电力市场化交易。

(编辑 周金梅)