

基于 CVaR 风险计量指标的发电商投标组合策略及模型

王 壬¹, 尚金成², 冯 旻³, 周晓阳¹, 张勇传¹, 游义刚¹

(1. 华中科技大学水电与数字化学院, 湖北省武汉市 430074; 2. 河南省电力公司调度通信中心, 河南省郑州市 450052)

(3. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京市 100083)

摘要: 电力市场中各类市场具有不同的价格波动特性和收益率随机变化特性。为了保证年度收益最大且风险最低, 发电商需在各个市场上合理分配参与竞价的电量。借鉴金融领域风险管理的理论, 以条件风险价值(CVaR)为风险计量指标, 综合考虑风险和期望收益率, 建立了新的发电商均值-CVaR 投标组合优化模型。应用该模型, 对发电商在年度合约市场、月度合约市场、日前市场和实时市场 4 个市场总电量的分配比例和有效前沿进行了计算。计算结果表明, 所提出的模型能较真实地反映发电商所面临的市场风险的本质特征, 可使发电商在保证一定期望收益率的前提下承担最小的 CVaR 风险, 从而为发电商的投标决策与风险评估提供了新的思路。

关键词: 电力市场; 投标组合; 条件风险价值; 风险计量; 有效前沿

中图分类号: TM73; F123.9

0 引言

随着电力市场化改革的深入, 发电厂竞价策略成为电力市场领域研究的热点问题。发电厂竞价策略应包括发电商在单一市场的竞价辅助决策和风险评估以及发电厂(机组)年度总发电量在多个市场的优化分配决策和风险分析两方面内容^[1]。

对单市场单时段计及风险的发电商竞价策略问题国内外已做了大量的研究^[2~5], 而关于发电商在多个市场中的优化分配决策和风险评估的研究, 目前国内外的文献还比较少。随着电力市场建设的不断完善, 这方面的研究将会越来越受到关注。它主要包括: 在考虑发电成本及市场燃料价格等因素的条件下, 电厂(机组)年度总发电量如何在合约市场、日前市场、实时市场、辅助服务市场等市场中进行优化分配, 以使电厂(机组)在一定的年度总收益期望值下, 降低风险水平; 或者电厂(机组)在保证一定的风险水平(指标)下, 提高年度总收益; 或者同时考虑提高收益和降低风险。

文献[6]引入合约组合和有效前沿的概念, 以售电收益的方差计量风险, 讨论了发电商在实时市场售电与发电投标时, 如何在期货市场购买一定量期货合约以使总收益的风险最小。文献[7]基于 Markowitz 资产组合理论, 以均值和方差计量收益及风险, 建立了发电商在 2 个市场优化分配投标电

量的数学模型。目前电力市场领域中计及风险的文献大多借鉴金融学中 Markowitz 的方差计量理论。然而, Markowitz 的均值-方差模型采用收益的方差作为风险计量的做法已受到置疑: 方差关于平均收益是对称的, 这意味着高于该平均值的收益也被计为风险。实际上, 收益的损失才是风险的本质特征, 因此用方差计量风险有较大的局限性^[8]。此外, Markowitz 的资产组合理论依赖于一系列假设, 其中最主要的假设“收益率服从正态分布”常常难以满足。因此近几十年来, 金融领域提出了大量新的风险计量方法^[8,9], 如风险价值(VaR——value at risk)和条件风险价值(CVaR——condition value at risk)方法, 以便更准确地反映风险的本质特征。文献[10]将 VaR 应用于电价波动研究, 并用 CVaR 估计电力公司的次日购电损失。因此, 探讨将 CVaR 理论应用于电力市场领域将是非常有意义的工作。本文将发电商在多个市场中进行投标发电的行为称为投标组合策略^[7], 并对此问题进行了研究。

1 CVaR 简介

VaR 作为金融领域广泛应用的一种风险计量工具, 是指在正常的市场条件和给定的置信水平下, 某一金融资产或证券组合在未来特定的时间段内的最大可能损失。

尽管 VaR 很受欢迎, 但研究表明, 将其应用在投资组合优化问题上仍存在重大缺陷^[11]。例如, 它不满足一致性公理、缺乏次可加性, 因此不能用于组合优化。另外, 其尾部损失测量也存在非充分性。

为了克服 VaR 的不足, Rockafeller 和 Uryasev 在文献[12]中首次提出基于条件风险价值 CVaR 的风险计量技术。该技术衍生于 VaR, 是指损失超过 VaR 的条件均值, 也称为平均超额损失或平均短缺, 它代表了超额损失的平均水平, 反映了损失超过 VaR 临界值时可能遭受的平均潜在损失的大小, 较 VaR 更能体现潜在的风险价值。与 VaR 一样, CVaR 不要求市场因子必须为正态分布, 且仅以减少下方损失作为目标, 因而在理论上被认为是优于方差的风险计量指标^[8,13]。同时, 它是一致性风险计量, 并且具有凸性。其基本原理如下。

设 X 为投资组合可行集, $X \subset \mathbf{R}^n$; 令 $f(x, y)$ 为损失函数。其中, $x \in X$ 为 n 维投资组合方案向量, $y \in \mathbf{R}^m$ 为 m 维随机变量, 表示市场的随机因素(如市场收益率)。假设 y 的联合概率密度函数为 $p(y)$, 对于确定的 x , 由 y 引起的损失 $f(x, y)$ 是 $\mathbf{R}$ 上服从某一分布的随机变量, 其不超过临界值 α 的分布函数为:

$$\Psi(x, \alpha) = \int_{f(x, y) \leq \alpha} p(y) dy \quad (1)$$

对于任意固定的 x , $\Psi(x, \alpha)$ 作为 α 的函数是在投资组合 x 下的损失累积分布函数。Rockafellar 和 Uryasev 证明了它对 α 非减且右连续^[12]。

以 β 表示置信水平, $\alpha_\beta(x)$ 表示当投资组合为 x 时损失 $f(x, y)$ 所对应的 VaR 值, 其计算公式为:

$$\alpha_\beta(x) = \min\{\alpha \in \mathbf{R}; \Psi(x, \alpha) \geq \beta\} \quad (2)$$

又以 $\phi_\beta(x)$ 表示资产损失 $f(x, y)$ 不小于 $\alpha_\beta(x)$ 时的 CVaR 值:

$$\phi_\beta(x) = E[f(x, y) | f(x, y) \geq \alpha_\beta(x)] = \frac{1}{1-\beta} \int_{f(x, y) \geq \alpha_\beta(x)} f(x, y) p(y) dy \quad (3)$$

由于式(3)中含有 VaR 函数 $\alpha_\beta(x)$ 项, 而 $\alpha_\beta(x)$ 的解析表达式难以求出, 文献[12]引入一个相对简单的函数 $F_\beta(x, \alpha)$ 代替 $\phi_\beta(x)$ 计算 CVaR:

$$F_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1-\beta} \int_{y \in \mathbf{R}^m} [f(x, y) - \alpha]^+ p(y) dy \quad (4)$$

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

通常情况下, 概率密度函数 $p(y)$ 的解析表达式难以得到, 可以利用随机变量 y 的历史数据, 或者使用蒙特卡罗法^[9]模拟样本数据来给出式(4)中积分的估计。设 $y^1, y^2, \dots, y^q$ 为 y 的 q 个样本, 则函数 $F_\beta(x, \alpha)$ 的估计值为:

$$\tilde{F}_\beta(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{q(1-\beta)} \sum_{k=1}^q [f(x, y^k) - \alpha]^+ \quad (5)$$

因此在实际计算中, 通常基于式(5)确定资产的最优组合系数向量 x 及相应的 CVaR 和 VaR 的值。

2 基于 CVaR 的投标组合优化模型

随着发电侧电力市场的开放和不断完善, 电力市场内各个市场, 甚至不同的区域市场具有不同的价格波动特性。受发电成本和燃料价格的影响, 对发电商而言, 在各个市场投标会有不同的收益率。因此, 发电商将年度总发电量分配到各个市场时, 采取不同的投标组合策略, 将会获得不同的总收益, 同时面临不同的损失风险。

本文将发电商年度总发电量类比为总资产, 将其在各类市场的发电收益看做投资回报, 这样, 发电商在多个市场中分配发电电量就转化为金融学中的投资组合优化问题。从而可用 CVaR 风险理论和资产组合方法来解决发电总量的多市场分配问题。

显然, 发电商希望分配方案使平均总收益尽可能大而风险尽可能小, 即多市场的总发电量分配是一个双目标优化问题。依据多目标优化理论, 可将其中的 1 个目标(如年度期望总收益)约束在某一水平, 求另一目标的最优化(如风险最小化), 从而转化为单目标最优化问题, 这时最优解为原问题的有效解。依照这一思路, 我们以年度总期望收益作为约束条件之一, 最小化 CVaR 风险水平, 建立了发电公司年度总发电量多市场分配的 CVaR 投标组合优化模型。

尽管 VaR 和 CVaR 的计量为货币单位, 由于货币单位与收益的百分比之间有一一对应的线性关系, 为方便起见, 将收益、损失、VaR 和 CVaR 都折算为收益的百分比, 即收益率, 这也是风险的相对计量方法。

设 $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 为发电商的一种投标组合。其中: 分量 x_i 表示发电商的年度总电量在第 i 市场所分配的比例; N 为市场的总数, 满足条件

$x_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, N)$ 且 $\sum_{i=1}^N x_i = 1$ 。设 y_i 为第 i 个市场的收益率, 则多元随机变量 $y^T = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ 表示发电商的组合收益率向量。 y 的均值向量 μ 和协方差矩阵 Σ 分别为: $\mu^T = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$, $\Sigma = [\sigma_{ij}]_{N \times N}$ 。

定义投标组合的收益函数为 $R(x, y)$, 则 $R(x, y) = x^T y$ 。组合收益的均值 $E[R(x, y)]$ 与方差 $\sigma^2[R(x, y)]$ 分别为:

$$E[R(x, y)] = E(r_x) = x^T \mu$$

$$\sigma^2[R(x, y)] = \sigma^2(r_x) = x^T \Sigma x$$

发电商组合投标损失函数 $f(x, y) = -R(x, y)$, 可由下式给出:

$$f(x, y) = -(x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_N y_N) = -x^T y \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),得到 $F_{\beta}(\mathbf{x}, \alpha)$ 的形式为:

$$F_{\beta}(\mathbf{x}, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1-\beta} \int_{\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m} [-\mathbf{x}^T \mathbf{y} - \alpha]^+ p(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \tag{7}$$

取市场收益率 $\mathbf{y}$ 的样本值 $\mathbf{y}^1, \mathbf{y}^2, \dots, \mathbf{y}^q$, 式(7)的估计式为:

$$\hat{F}_{\beta}(\mathbf{x}, \alpha) = \alpha + \frac{1}{q(1-\beta)} \sum_{k=1}^q [-\mathbf{x}^T \mathbf{y}^k - \alpha]^+ \tag{8}$$

设虚拟变量 $z_k (k = 1, 2, \dots, q)$, 令 $z_k = [-\mathbf{x}^T \mathbf{y}^k - \alpha]^+$, 则 $z_k \geq 0$ 且 $z_k \geq (-\mathbf{x}^T \mathbf{y}^k - \alpha)$ 。于是最小化 CVaR 的发电商投标组合优化模型就转化为由线性函数和线性约束构成的线性规划问题:

$$\min_{(\mathbf{x}, \alpha) \in (X, \mathbf{R})} \hat{F}_{\beta}(\mathbf{x}, \alpha, \mathbf{z}) = \min \left(\alpha + \frac{1}{q(1-\beta)} \sum_{k=1}^q z_k \right) \tag{9}$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^N x_i = 1 \quad x_i \geq 0 \tag{10}$$

$$\mathbf{x}^T \boldsymbol{\mu} \geq e \tag{11}$$

$$z_k \geq 0 \tag{12}$$

$$z_k \geq (-\mathbf{x}^T \mathbf{y}^k - \alpha) \tag{13}$$

式中: e 为收益下界且 $0 \leq e \leq 1$ 。

式(11)的含义为组合期望收益必须大于收益下界。上述模型为固定期望收益水平求风险最小。

综上所述,基于 CVaR 的发电商组合投标模型可以描述为:寻求最优的投标组合,使得在未来一定时期内(通常为 1 年),在给定的概率置信水平下,在保证年度期望收益约束下,使发电商可能遭受的发电平均超额损失 CVaR 为最小。

3 算例分析

在电力市场中,年度合约市场、月度合约市场、

表 3 投标竞价发电量分配及 VaR 和 CVaR 的值
Table 3 Allocation of bidding generation and the value of VaR and CVaR

期望收益下限 e	置信水平 β	x_1	x_2	x_3	x_4	VaR	CVaR
0.20	0.95	0.160 391	0.248 265	0.127 306	0.464 038	0.067 555	0.112 885
	0.99	0.217 371	0.170 549	0.124 709	0.487 371	0.152 326	0.152 326
0.30	0.95	0.299 388	0.386 459	0.314 152	0	0.182 430	0.262 862
	0.99	0.385 588	0.311 499	0.136 257	0.166 656	0.330 357	0.330 357

注: x_1, x_2, x_3, x_4 分别表示实时市场、日前市场、月度合约市场和年度合约市场的电量分配比例。

为了得到组合期望收益率 $E(r_x)$ 随 CVaR 值变化的曲线,改变约束中的期望收益率下限 e , 重复上述计算;同时,根据 $E(r_x) = \mathbf{x}^T \boldsymbol{\mu}$ 计算 $E(r_x)$, 可以得到如图 1 所示的均值-CVaR 曲线。

这种描述组合期望收益与风险关系的曲线就是金融学中的有效前沿曲线。图中 1, 2, 1', 2' 分别对应表 3 中 $e=0.20$ 和 $e=0.30$ 的 4 组计算数据。

图 1 中有效前沿以下的区域为投标组合的可行

域,其中每一点(如点 3)对应 1 组可行的投标组合 $\mathbf{x}$ 。从图中看出,在同样期望收益下,有效前沿上的点对应的风险水平明显低于可行集内其他的点。在同样风险水平下,有效前沿上的点期望收益大于可行集内的其他点。即有效前沿是可行集的 1 个特殊子集,投标(投资)的最优组合点在有效前沿上。

表 1 4 个市场电价分布数据
Table 1 Price distribution in four power markets

美元/(MW·h)

电价指标	实时市场 p_1	日前市场 p_2	月度合约市场 p_3	年度合约市场 p_4
均值 μ_{p_i}	43.0	40.0	34.0	32.0
标准差 σ_{p_i}	21.0	15.0	9.6	2.6

市场收益率 $y_i = (p_i - c)/c$, 则 $\mu_{y_i} = (\mu_{p_i} - c)/c$, $\sigma_{y_i} = \sigma_{p_i}/c$, 由此可计算收益率 y_i 的均值和标准差, 如表 2 所示。

表 2 4 个市场的收益率分布数据
Table 2 Revenue rate distribution in four power markets

收益率指标	实时市场 y_1	日前市场 y_2	月度合约市场 y_3	年度合约市场 y_4
均值 μ_{y_i}	0.433 3	0.333 3	0.133 3	0.066 7
标准差 σ_{y_i}	0.700 0	0.500 0	0.320 0	0.086 7

按正态分布随机产生了收益率的 100 组样本, 作为模拟的市场历史数据: $\mathbf{y}^k = (y_1^k, y_2^k, y_3^k, y_4^k)$, 其中 $k=1, 2, \dots, 100$ 。置信水平 β 取 0.95 和 0.99, 期望收益率下限 e 取 0.20 和 0.30, 利用线性规划的 LINDO 程序分别进行运算, 结果如表 3 所示。

由计算结果和图 1 可以得到如下结论:

1) 从表 3 可以明显看出: 如果提高置信水平, 年

度和月度合约市场的分配比例增大,即发电商趋于保守,试图增大收益的可靠性而放弃较高的风险。

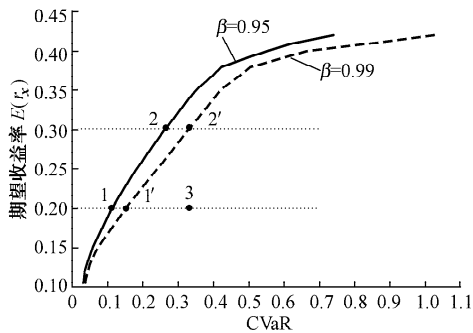


图1 均值-CVaR的有效前沿
Fig 1 Efficient frontier of Mean-CVaR

2)两条有效前沿曲线都是单调递增的,说明在有效前沿曲线上,增加期望收益率必定导致 CVaR 增加,反之亦然,这符合市场行为的真实情况。

3)当置信水平 β 增大时,有效前沿曲线右移。在相同的期望收益水平下,得到的最优点对应的风险也就越大,说明发电商的风险厌恶度越大;相反,

表5 改变 σ_{yi} 后的投标竞价发电量分配及 VaR 和 CVaR 的值
Table 5 Allocation of bidding generation and the value of VaR and CVaR after changing σ_{yi}

置信水平 β	x_1	x_2	x_3	x_4	VaR	CVaR
0.95	0.168 207	0.179 815	0.362 888	0.289 090	0.096 965	0.137 685
0.99	0.139 996	0.140 413	0.682 138	0.037 454	0.166 694	0.166 694

注:期望收益下限 e 取 0.20; x_1, x_2, x_3, x_4 分别表示实时市场、日前市场、月度合约市场和年度合约市场的电量分配比例。

从 2 个市场计算结果的对比中可以看出:在同样的置信水平和组合收益率期望约束下,随着市场的收益率方差增大(市场波动性增大),年度和月度合约市场在整个市场分配比例中所占份额也增大,即发电商通过增大合约市场的份额来适应市场的变化,保证年度总期望收益的实现。这说明均值-CVaR 优化模型能够反映不同的市场条件变化,给出相应的分配决策。

4 结论

本文以 CVaR 为风险计量指标,建立了 CVaR 风险最小化的投标组合均值-CVaR 模型。由于 CVaR 以减少下方损失为目标,因而可以为发电商提供更多的损失保护。该模型可采用非参数估计方法,而不限定组合收益率服从正态分布和联合正态分布。根据期望值模型理论,还可将随机规划问题转化为确定性规划问题。本文的计算结果表明:

1)CVaR 风险计量指标提供了一种反映发电商风险承受能力的指标 β ,提高置信水平,发电商趋于厌恶风险,年度与月度合约市场的分配比例相应增

置信水平越低,有效前沿曲线越往左移,在相同的期望收益水平之下,得到的最优点风险也越小,意味着发电商的风险厌恶度越小。

从图 1 可看到,组合期望收益率 $E(r_x)$ 有一个大致范围,因此发电商在一定的风险态度(β 值)下,制定投标策略时期望收益不能太高也不能太低。

最后,为了更清楚地看到基于 CVaR 的投标组合优化模型在不同市场的表现,我们变动市场收益率标准差 σ_{yi} ,给出另外一组市场数据,与第 1 组市场进行对比研究,结果如表 4 所示。

表4 改变 σ_{yi} 后的 4 个市场收益率分布数据
Table 4 Revenue rate distribution in four power markets after changing σ_{yi}

收益率指标	实时市场 y_1	日前市场 y_2	月度合约市场 y_3	年度合约市场 y_4
均值 μ_{yi}	0.433 3	0.333 3	0.133 3	0.066 7
标准差 σ_{yi}	0.670 0	0.483 3	0.202 0	0.070 0

取 $e=0.20$,基于上述统计数据,按照正态分布再随机产生 100 个样本数据,代入优化模型(式(9)~式(13)),得到如表 5 所示的结果。

大,这个现象比较客观地反映了发电商的实际行为。因此对于厌恶风险的发电商来说,可以选择较高的置信水平,增大年度与月度合约市场比例,以便能锁定风险;对于喜好风险的发电商来说,可以设置较低的置信水平,使得日前市场与实时市场比例加大,以做出积极的投资策略。

2)不同的市场条件和相同的置信水平及期望收益约束下,基于 CVaR 的组合优化模型结果反映了市场波动情况对发电商投标组合决策的调整,他们可以采用不同的市场分配比例来保证预期期望收益和风险水平。

总之,基于 CVaR 风险计量指标的发电商组合投标策略及模型能较真实地反映发电商所面临的市场风险本质特征,为发电商的投标决策与风险评估提供了新的工具与思路。

参考文献

[1] 尚金成,黄永皓,夏清,等.电力市场理论研究与应
用.北京:中国电力出版社,2002.
SHANG Jin-cheng, HUANG Yong-hao, XIA Qing et al.
Research on Electricity Market Theory and Its Applications.

- Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 马磊,文福拴,倪以信,等.考虑风险约束的发电公司报价策略研究.电力系统自动化,2003,27(23):6—11.
MA Li, WEN Fu-shuan, NI Yi-xin et al. Risk-constrained Optimal Bidding Strategies for Generation Companies in Electricity Market Environment. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 6—11.
- [3] RODRIGUEZ C P, ANDERS G J. Bidding Strategy Design for Different Types of Electric Power Market Participants. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 964—971.
- [4] 马磊,房鑫焱,侯志俭.发电侧市场竞争策略的风险分析及决策模型.继电器,2001,29(12):21—24.
MA Lei, FANG Xin-yan, HOU Zhi-jian. The Risk Analysis and Decision Model of Competition Strategy for Pool Purchase Price. Relay, 2001, 29(12): 21—24.
- [5] 赖菲,丁振华,张崇见,等.发电商的风险竞价策略选择.电力自动化设备,2003,23(1):65—67.
LAI Fei, DING Zhen-hua, ZHANG Chong-jian et al. Risk Control for Power Suppliers in Power Market. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 65—67.
- [6] BJORGAN R, LIU C C, LAWARREE J. Financial Risk Management in a Competitive Electricity Market. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1285—1291.
- [7] 任震,黄福全,黄雯莹,等.电力市场中的发电厂投标组合策略.电力系统自动化,2002,26(2):14—17.
REN Zhen, HUANG Fu-quan, HUANG Wen-ying et al. Bidding Strategy for Power Plant in Multi-electricity Markets. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 14—17.
- [8] HARLOW W V. Asset Allocation in a Downside Risk Framework. Financial Analysts Journal, 1991, 47(5): 28—40.
- [9] 乔瑞·菲利普. VaR: 风险价值——金融风险新标准. 张海鱼,译.北京:中信出版社,2000.
JORION P. VaR: The New Benchmark for Controlling Derivatives Risk. ZHANG Hai-yu, Trans. Beijing: CITIC Publishing House, 2000.
- [10] DAHLGREN R, LIU C C, LAWARREE J. Risk Assessment in Energy Trading. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 503—511.
- [11] 林辉,何建敏. VaR 在投资组合应用中存在的缺陷与 CVaR 模型.财贸经济,2003,(12):46—49.
LIN Hui, HE Jian-min. The Shortcomings of VaR in Portfolio Management and Improved CVaR Model. Finance and Trade Economics, 2003, (12): 46—49.
- [12] ROCKAFELLAR R T, URYASEV S. Optimization of Conditional Value-at-Risk. Journal of Risk, 2000, 2(3): 21—41.
- [13] 黄向阳,陈学华,杨辉耀.基于条件风险价值的投资组合优化模型.西南交通大学学报,2004,39(4):511—515.
HUANG Xiang-yang, CHEN Xue-hua, YANG Hui-yao. Portfolio Optimization Model Based on Conditional Value-at-risk. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(4): 511—515.

王 壬(1976—),女,博士研究生,主要从事电力市场风险管理方面的研究工作。E-mail: emmawang2001@sohu.com

尚金成(1966—),男,博士,主要从事电力系统(电网)优化调度、电力市场竞价交易理论与风险管理、发电厂调度交易管理与竞价上网辅助决策等方面的研究与管理工作的。

冯 旸(1984—),女,主要从事国际金融与风险管理等方面的工作。E-mail: fyfy0984@yahoo.com.cn

Combined Bidding Strategy and Model for Power Suppliers Based on CVaR Risk Measurement Techniques

WANG Ren¹, SHANG Jin-cheng², FENG Yang³, ZHOU Xiao-yang¹, ZHANG Yong-chuan¹, YOU Yi-gang¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2. Henan Electric Power Dispatching and Communication Center, Zhengzhou 450052, China)

(3. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In electricity market, the different markets have different price fluctuation and stochastic changing characteristics of revenue rate. To obtain the maximum annual profits and the minimum risk value, the power suppliers should allocate the bidding electricity to each market reasonably. Using the risk management theory in financial research field for reference, taking the conditional value at risk (CVaR) as risk measurement index, a novel Mean-CVaR optimal combined bidding model is built by considering the risk and expected revenue rate synthetically. Based on the proposed model, the efficient frontier and the electricity allocation ratio for the power suppliers in four markets, such as annual contract market, monthly contract market, day-ahead market and spot market are calculated. The calculation results show that the proposed model can truly reflect the essential characters of the market risk facing the power suppliers and guarantee the power suppliers to obtain the expected profits at the minimum CVaR risk level. So it provides the power suppliers a new way for bidding decision-making and risk valuation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 70271069).

Key words: electricity market; combined bidding; conditional value at risk (CVaR); risk measurement; effective frontier