

# 低碳经济下能效电厂的 半方差风险投资组合优化模型

李莉<sup>1</sup>, 王建军<sup>1</sup>, 李宁<sup>2</sup>, 谭忠富<sup>1</sup>, 安建强<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## A Risk Investment Portfolio Optimization Model of Energy Efficiency Power Plant Based on Mean Semi-Variance Theory in Low-Carbon Economy Environment

LI Li<sup>1</sup>, WANG Jianjun<sup>1</sup>, LI Ning<sup>2</sup>, TAN Zhongfu<sup>1</sup>, AN Jianqiang<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The risk investment portfolio optimization of energy efficiency power plant under various electricity-saving measures in low carbon economy environment is researched. Considering the fact that in low carbon economy environment the income of energy efficiency power plant constitutes by two parts, namely the income from selling electricity and that from the transaction in carbon market, so following risks should be considered during the investment portfolio optimization of energy efficiency power plant: the risk of price fluctuation of electricity to be sold, the risk of price fluctuation of carbon transaction and the risk of fluctuation of electricity-saving. To ensure the correctness of decision-making, the mean semi-variance (MSV) is utilized to replace traditional variance theory to measure the degrees of these risks. Analysis on results of calculation example shows that the income from carbon transaction has a big contribution to overall profit level, and MSV theory can incarnate the risk degree that the investors will encounter better than traditional variance theory and more contributes to rational decision-making.

**KEY WORDS:** low carbon economy; energy efficiency power plant; portfolio optimization model; mean semi-variance (MSV); risk of investment

**摘要:** 探讨了低碳经济下能效电厂在各种节电措施下的风险投资优化组合问题。考虑到在低碳经济下, 能效电厂的收益不仅包括售电收入, 而且包括碳市场交易收入, 将能效电厂在投资优化选择时要考虑的风险因素分为售电电价波动风

险、碳交易价格波动风险和节电量波动风险。用半方差(mean semi-variance, MSV)代替传统的方差理论度量这些风险大小, 以保证决策正确。算例分析结果表明: 碳交易收入对于能效电厂的整体利润水平贡献很大; 半方差理论较方差理论更能真正体现投资者在投资时遇到的风险大小, 更有助于理性决策。

**关键词:** 低碳经济; 能效电厂; 组合优化模型; 半方差; 投资风险

## 0 引言

随着能源供应的日趋紧张和环境污染的日益恶化, 节能减排在世界范围内得到了人们的重视, 走低碳经济发展之路已经成为当今世界实现可持续发展的必然选择。低碳经济实质上就是以最小化的能源消耗和碳排放来实现持续的经济水平。

能效电厂采取的各种节电措施所节约的用电量即为该电厂的“发电量”。在电力市场环境下, 这些电量可以参与市场竞价, 获得的竞价收入就是能效电厂的赢利。这是能效电厂与普通电厂的主要差别所在。此外, 能效电厂与普通电厂的另外一个差别就是, 能效电厂在生产电能的过程中不需要消耗任何能源, 因而也不排放二氧化碳, 与普通电能相比是一种低碳产品, 它所节约的碳排放空间在市场经济条件下是可以进行交易的。

由于能效电厂在我国尚处于推广期, 对能效电厂的研究大部分集中在定性分析上。文献[1]介绍了能效电厂在江苏省的实践情况。文献[2-3]研究了能效电厂的模式选择问题。文献[4]报告了美国能效电厂的实践经验, 文献[5]研究了建设能效电厂对促进

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(71071053); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(09QX68, 10QX44)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (71071053); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (09QX68, 10QX44).

我国节能减排方面的作用。关于能效电厂的定量分析也大多数集中在定量分析能效电厂的作用方面,如文献[6]研究表明能效电厂能够提高电力系统的可靠性,降低电力生产费用,文献[7]指出考虑能效电厂的综合资源规划具有更好的经济性和环境效益,文献[8]指出能效电厂能够促进发电产业的节能减排。目前,关于能效电厂在实际运行过程中遇到的一些技术问题建模分析的研究很少见。本文针对能效电厂的投资组合优化问题进行建模分析。

由于能效电厂产生电能的主要来源不是实物存在的发电机组,而是用户响应,这是不可精确预测的,故需要考虑风险。本文首先将能效电厂在低碳经济下的收入分为2个部分:一部分为电能交易收入,另一部分为碳交易收入。从这2部分着手寻找风险因素。然后运用半方差(mean semi-variance, MSV)风险度量方法来度量这些风险,这是一种基于 Markowitz 均方差风险理论<sup>[9-12]</sup>的改进的风险度量方法。主要的改进之处是 MSV 理论认为只有那些不利于决策者的偏差才属于风险<sup>[13]</sup>,而均方差理论则认为所有偏差都是风险。对于大多数投资者来说,有利的那一面偏差,一般来说都不会控制,只是想知道不利的那一面偏差是多大,以提出相应的应对措施,因此如果再用均方差的理论度量风险不太合理,而 MSV 风险理论更适合这种情况。在此基础上,本文将建立虚拟电厂的风险投资优化组合模型,并通过算例验证该模型的合理性。

## 1 能效电厂的投资决策优化模型

### 1.1 能效电厂投资项目的成本分析

根据能效电厂发电类型(节电来源)的不同,能效电厂的投资不同,各项投资风险也不同。如一些具有固定节电效益的技术措施,投资主要集中在前期固定设备投资上,投资较大,但风险较小。而另外一些具有不固定节能效益的经济措施,由于节电效果不可预期,投资主要集中在前期宣传,后期集中在对用户的激励和小型负控设备的安装上,投资风险较大。为便于分析,本文不再对各种措施进行细分,通过风险大小来区分各类措施。现假设供电公司第 $t(t=1,2,\dots,T)$ 时期共投资于 $i$ 种节能措施(经济措施和技术措施)来建设能效电厂,第 $i$ 种措施的投资成本(新投资和投资分摊)用 $C_{it}$ 表示,则供电公司第 $t$ 时期的总投资成本 $C_t$ 为

$$C_t = \sum_{i=1}^I C_{it} \quad (1)$$

### 1.2 能效电厂投资项目的收益分析

在市场经济条件下,能效电厂产生的“电能”可以像普通电厂一样在市场上进行交易。因此,售电市场的收入可以看作是能效电厂一部分收益来源。现假设第 $t(t=1,2,\dots,T)$ 时期预期的上网电价为 $S_{ct}$ ,能效电厂的第 $i$ 种措施预期产生的节电效益分别为 $P_{it}$ ,则能效电厂的预期售电收入 $R_{ct}$ 可表示为

$$R_{ct} = \sum_{i=1}^I P_{it} S_{ct} \quad (2)$$

与普通电厂不同,能效电厂的产出不仅是“电能”,还包括减少的二氧化碳排放量。在低碳经济下,减少排放的二氧化碳是可在碳交易市场上进行交易的,因此能效电厂将获得另外一部分碳交易收入。现假设第 $t(t=1,2,\dots,T)$ 时期预期的碳交易价格为 $S_{ct}$ ,则能效电厂预期的碳交易收入 $R_{ct}$ 为

$$R_{ct} = \sum_{i=1}^I P_{it} s_{ce} e_c S_{ct} \quad (3)$$

式中: $s_{ce}$ 为全国发电标准煤耗; $e_c$ 为发电用煤的二氧化碳排放系数。

节电措施的节电量是能效电厂发电量的主要源头,它是与能效电厂的投资成本相关的,本文假设二者呈线性函数关系,即

$$P_{it} = \lambda_{it} + \beta_{it} C_{it} \quad (4)$$

式中 $\lambda_{it}$ 和 $\beta_{it}$ 是参数,一般情况下为常数,可通过实验统计获得。

### 1.3 决策优化模型

供电公司投资能效电厂的目标是获得最大化利润,那么能效电厂的投资决策优化模型可表示为

$$\max_{C_{it}, C_{it}} F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I [(R_{ct} + R_{ct}) - C_{it}]$$

该模型的约束条件为各时期的投资总额不能超过该时期的预期投资预算和各种投资不能超过各项目投资的最大、最小预算,分别表示为

$$\sum_{i=1}^I C_{it} \leq C_{te} \quad (5)$$

$$C_{it \min} \leq C_{it} \leq C_{it \max} \quad (6)$$

式中: $C_{te}$ 为供电公司第 $t$ 时期的总投资预算; $C_{it \min}$ 和 $C_{it \max}$ 分别为供电公司投资于第 $i$ 种节能措施的最小和最大预算。

## 2 基于 MSV 的能效电厂风险投资决策模型

### 2.1 MSV 风险度量指标

用 MSV 进行风险度量首先要将偏离均值的偏差分为2个部分:一部分为高于均值的那部分偏差,

对这部分偏差求均方差得出正均方差。一部分为低于均值的那部分偏差，对这部分偏差求均方差得到负均方差。决策者根据自己的决策问题选择要控制的风险是正均方差还是负均方差。

### 2.2 能效电厂投资风险 MSV 度量

供电公司投资能效电厂的风险主要来源于：

1) 售电电价波动风险。电力市场环境下，售电电价是随供需变化而变化的，其经常发生剧烈的波动，这会造成能效电厂售电收入的波动。对于能效电厂来说，偏离均值的负方差为风险，则  $D^-(S_{ct})$  为能效电厂遇到的上网电价风险。

2) 碳交易价格波动风险。在低碳经济环境下，碳交易市场的交易价格会随供需关系变化而变化，随着市场日趋完善和政府环保力度加强，这种变动会给能效电厂的碳交易收入带来一定风险，同样对于能效电厂来说，用碳交易价格波动的负方差  $D^-(S_{ct})$  来度量能效电厂遇到的碳交易价格风险。

3) 节电量波动风险。由于供电公司不能控制用户对供电公司提出的节能措施的反应，只能对其通过大量的实地调研或经验进行预测，这带有一定的不确定性。对于能效电厂来说，用节电函数参数预测值波动的负方差  $D^-(\lambda_{it})$  和  $D^-(\beta_{it})$  来表示能效电厂遇到的节电量波动风险。

### 2.3 能效电厂投资风险 MSV 决策模型

定义  $E(S_{ct})$  为售电电价的期望值， $E(S_{ct})$  为碳交易价格的期望值， $E(\lambda_{it})$  和  $E(\beta_{it})$  为节电函数参数的期望值， $F'$  为能效电厂的风险利润，同时假设模型中各风险变量之间相互独立，则能效电厂投资的风险决策模型为

$$\begin{aligned} \max_{C_{it}, C_{jt}} F' = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J E[(R_{ct} + R_{ct}) - C_{it}] - D^-[R_{ct} + \\ & R_{ct}) - C_{it}] E[(\lambda_{it} + \beta_{it} C_{it})(S_{ct} + s_{cc} e_c S_{ct}) = \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J -C_{it}] - D^-[ (\lambda_{it} + \beta_{it} C_{it})(S_{ct} + s_{cc} e_c S_{ct}) - \\ & C_{it}] \{ (E(\lambda_{it}) + E(\beta_{it}) C_{it}) [E(S_{ct}) + s_{cc} e_c E(S_{ct})] - \\ & C_{it} \} - \{ D^-(\lambda_{it}) D^-(S_{ct}) + E^2(\lambda_{it}) D^-(S_{ct}) + \\ & D^-(\lambda_{it}) E^2(S_{ct}) + (s_{cc} e_c)^2 [D^-(\lambda_{it}) D^-(S_{ct}) = \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J E^2(\lambda_{it}) D^-(S_{ct}) + D^-(\lambda_{it}) E^2(S_{ct}) \} + \\ & C_{it}^2 [D^-(\beta_{it}) D^-(S_{ct}) + E^2(\beta_{it}) D^-(S_{ct}) + \\ & D^-(\beta_{it}) E^2(S_{ct})] + (s_{cc} e_c C_{it})^2 [D^-(\beta_{it}) \cdot \\ & D^-(S_{ct}) E^2(\beta_{it}) D^-(S_{ct}) + D^-(\beta_{it}) E^2(S_{ct})] \} \end{aligned}$$

上述风险决策模型的约束条件同样为式(5)(6)。求解以上模型可以求出能效电厂在各种节能措施中的最优风险投资  $C_{it}^*$ 。

### 3 算例结果与分析

本文假设某供电公司在某一年度拟投资 1 个能效电厂，共选择了 5 项节能措施，分别用  $ME_1$ 、 $ME_2$ 、 $ME_3$ 、 $ME_4$  和  $ME_5$  表示。各种措施的节电量函数系数情况如表 1 所示。表中： $ME_1$  和  $ME_2$  是技术措施，产生的固定节电量较多，可变节电量较少，节电量变动风险较少；而  $ME_3$ 、 $ME_4$  和  $ME_5$  是经济措施，产生的固定节电量较少，可变节电量较多，节电量变动风险也较大。

表 1 节电量函数参数预测情况统计  
Tab. 1 Prediction of the electricity saving function's parameters

参数	节能措施					
	ME <sub>1</sub>	ME <sub>2</sub>	ME <sub>3</sub>	ME <sub>4</sub>	ME <sub>5</sub>	
$\lambda$	期望/kW·h	100	120	20	40	15
	方差/kW·h	16	25	1	2	1
	负方差/kW·h	9.00	10.00	0.70	0.95	0.45
$\beta$	期望/kW·h	5	3	10	8	12
	方差/kW·h	0.18	0.06	1.50	1.60	2.00
	负方差/kW·h	0.115	0.125	0.550	0.630	0.850

上网电价的期望值、均方差和负均方差分别为 0.31 元/kW·h、0.041 元/kW·h 和 0.018 元/kW·h。碳交易价格的期望值、均方差和负均方差分别为 100 元/t、25 元/t 和 9 元/t。火电厂的标准煤耗大约为 0.37kg/kW·h，火电厂燃煤的二氧化碳排放系数为 2.85 t/吨标准煤。总投资预算为 500 万元，其中  $ME_1$  和  $ME_2$  每项投资的投资预算不超过 200 万元。其他每项投资不超过 100 万元。

本文分 3 种情况计算采用不同技术措施时的投资额、期望节电量和预期利润，如表 2 所示。情况 1 和 2 均考虑了能效电厂在碳市场上的交易。不同的是，情况 1 的计算模型中的风险是用方差度量的；情况 2 的计算模型中的风险是用负方差度量的；在情况 3 的模型在优化过程中不考虑能效电厂在碳市场上的交易，且计算模型中的风险用负方差度量。

表 2 各种情况下节电量和利润比较  
Tab. 2 Comparison of the electricity saving and profits for each case

情况	各项投资额/万元					期望节电量/ 万 kW·h	预期利润/ 万元
	ME <sub>1</sub>	ME <sub>2</sub>	ME <sub>3</sub>	ME <sub>4</sub>	ME <sub>5</sub>		
1	178.94	200	44.02	67.04	10.00	2 886.22	1 199.08
2	165.84	200	41.65	63.54	28.96	2 996.54	1 244.91
3	165.84	200	41.79	63.27	29.10	2 997.46	929.21

从表2可以看出,为了最大化期望利润,最小化风险,供电公司在技术措施上的投资比在经济措施上的投资要多。由表2还可以看出,情况2和3产生的总预期节电量都比情况1要大。主要差别在于ME<sub>1</sub>和ME<sub>5</sub>投资不同。这是因为在情况1中用方差度量风险相对于半方差的度量方式扩大了ME<sub>5</sub>的节电量风险,因此在情况1中对ME<sub>5</sub>的投资相对偏少,最终导致期望节电量和期望利润均偏少3.8%。这说明用方差度量无形中扩大了个别风险,从而使决策有差错。比较情况2和3发现,尽管在各项投资上的差别不是非常大,期望节电量也不是非常大,但供电公司的总预期利润却减少了近25.36%。这主要是因为情况3中没有考虑碳交易给供电公司带来的收益,这从另一方面说明了低碳经济将对能效电厂的发展具有重要的激励作用,而碳交易给能效电厂带来的巨大利润就是一个重要表现,这非常有助于整个国家的节能减排。

#### 4 结论

1) 低碳经济给能效电厂的发展带来了机遇,在碳交易市场上,参与交易能给能效电厂带来数量可观的收入,这是能效电厂与其它电厂竞争的一个主要优势。由于能效电厂电能生产的灵活性和不确定性,能效电厂在进行投资决策时必须考虑风险因素,而采用科学的度量手段是保证决策合理性的一个重要前提条件。

2) 本文只针对能效电厂生产运营中的一个小问题进行分析建模,能效电厂的实际生产运作中会出现更多的问题,如报价问题、售电问题以及效益评估问题等,这些都是未来研究的方向。

#### 参考文献

- [1] 季强,李强,宋宏坤,等.江苏省能效资源潜力及能效电厂研究[J].电力需求侧管理,2005,7(4):19-22.  
Ji Qiang, Li Qiang, Song Hongkun, et al. Research on energy efficiency resources potential and efficiency power plant in Jiangsu[J]. Power Demand Side Management, 2005, 7(4): 19-22(in Chinese).
- [2] 李朝明.广东省能效电厂项目机制研究和探索[J].电力需求侧管理,2007,19(5):115-116.  
Li Zhaoming. Research of EPP mechanism of Guangdong province[J]. Power Demand Side Management, 2007, 19(5): 115-116(in Chinese).
- [3] 吴鹏,谭显东,单葆国,等.我国能效电厂建设组织模式研究[J].电力需求侧管理,2010,22(5):4-8.  
Wu Peng, Tan Xiandong, Shan Baoguo, et al. Organization model research of efficiency power plant in China[J]. Power Demand Side Management, 2010, 22(5): 4-8(in Chinese).
- [4] 张念瑜.美国能效电厂机制建设经验与借鉴[J].电力需求侧管理,2009,21(5):74-76.

- Zhang Nianyu. Experience and reference of the United States energy efficiency power plant mechanism construction[J]. Power Demand Side Management, 2009, 21(5): 74-76(in Chinese).
- [5] David M, Frederick W, 周伏秋,等.大力推行能效电厂,支持实现国家节能减排目标[J].电力需求侧管理,2007,9(4):2-5.  
David M, Frederick W, Zhou Fuqiu, et al. Devote major efforts to practise EPP to support national goal of energy conservation and emission reduction[J]. Power Demand Side Management, 2007, 9(4): 2-5(in Chinese).
- [6] 谭显东,胡兆光,彭谦.考虑能效电厂的供需资源组合优化模型[J].电网技术,2009,33(20):108-112.  
Tan Xiandong, Hu Zhaoguang, Peng Qian. A resource combination optimization model considering efficiency power plant[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 108-112(in Chinese).
- [7] 周景宏,胡兆光,田建伟,等.含能效电厂的电力系统生产模拟[J].电力系统自动化,2010,34(18):27-31.  
Zhou Jinghong, Hu Zhaoguang, Tian Jianwei, et al. Power system production simulation including efficiency power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 27-31(in Chinese).
- [8] 姜海洋,谭忠富,胡庆辉,等.用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析[J].中国电力,2010,43(6):37-40.  
Jiang Haiyang, Tan Zhongfu, Hu Qinghui, et al. Action analysis of nominal power plants on energy saving and emission controlling of power industry[J]. Electric Power, 2010, 43(6): 37-40(in Chinese).
- [9] 刘亚安,管晓宏.考虑风险因素的两市场购电优化分配问题[J].电力系统自动化,2002,26(9):41-46.  
Liu Ya'an, Guan Xiaohong. Optimization of purchase allocation in dual electric power markets with risk management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 41-46(in Chinese).
- [10] 郭金,江伟,谭忠富.风险条件下供电公司最优购电问题研究[J].电网技术,2004,28(11):18-22.  
Guo Jin, Jiang Wei, Tan Zhongfu. Research on optimized power purchasing of power suppliers under risk condition[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 18-22(in Chinese).
- [11] 周明,聂艳丽,李庚银,等.电力市场下长期购电方案及风险评估[J].中国电机工程学报,2006,26(6):116-122.  
Zhou Ming, Nie Yanli, Li Gengyin, et al. Long-term electricity purchasing scheme and risk assessment in power markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 116-122(in Chinese).
- [12] 于春云,赵希男,彭艳东,等.基于条件风险值理论的供应链优化与协调模型研究[J].中国管理科学,2007,15(3):31-39.  
Yu Chunyun, Zhao Xinan, Peng Yandong, et al. Study of supply chains optimization and coordination model based on conditional value-at-risk[J]. Chinese Journal of Management Science, 2007, 15(3): 31-39(in Chinese).
- [13] 刘艳春,高闯.风险资产组合的均值-WCVaR模糊投资组合优化模型[J].中国管理科学,2006,14(6):16-21.  
Liu Yanchun, Gao Chuang. Mean-WCVaR fuzzy portfolio optimization model of risk property combination[J]. Chinese Journal of Management Science, 2006, 14(6): 16-21(in Chinese).



李莉

收稿日期:2011-05-04.

作者简介:

李莉(1983),女,博士研究生,主要研究方向为能源经济、能源风险管理和电力系统经济等,  
E-mail: lilinw2001@126.com.

(责任编辑 杜宁)