

# 基于证据理论的可中断负荷不确定性 风险收益评估模型

张颖<sup>1</sup>, 张有兵<sup>2</sup>, 曹一家<sup>1</sup>, 常向伟<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 电力公司在与用户签订可中断负荷合同的决策问题中存在大量不确定性因素, 不仅直接影响电力公司的经济收益, 还会产生风险损失, 因此电力公司在签订合同前, 应充分考虑这些不确定性因素, 正确对风险和收益做出评估。本文基于证据理论, 建立了综合考虑各种不确定性因素的可中断负荷风险收益评估模型, 并结合模糊层次分析法对模型具体设计进行说明; 其次简要阐述了模型在电力公司签订可中断负荷合同决策中的运用; 最后通过算例验证模型的可行性, 并对模型提出了改进的建议。

**关键词:** 可中断负荷; 不确定性因素; 风险; 收益; 证据理论

## An evaluating model of interruptible load uncertain risks and returns based on evidence theory

ZHANG Ying<sup>1</sup>, ZHANG You-bing<sup>2</sup>, CAO Yi-jia<sup>1</sup>, CHANG Xiang-wei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
2. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In the decision-making of signing up the interruptible load management (ILM) contract between power company and ILM users, there are a lot of uncertainties not only directly affecting power company's economic returns, but also causing risk of losses. Therefore, it is vital for power company to take full account of the impact of these uncertainties on returns and risks before signing up the contract. In this paper, a comprehensive evaluating model of IL uncertain risks and returns based on evidence theory is established and the specific steps with fuzzy analytic hierarchy process are introduced. Then the application of the model in the process of signing up the ILM contract is briefly described. Finally, an example proves the feasibility of the model and some suggestions about the improvement of the model are given.

**Key words:** interruptible load; uncertainty; risks; returns; evidence theory

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0001-06

## 0 引言

20世纪70年代石油危机爆发, 电力需求侧管理开始成为电力系统倍加重视的课题。可中断负荷管理(ILM)是其中的重要组成部分, 不同于传统的拉闸限电, 它将负荷作为消费电力产品的用户, 电力公司在综合考虑用户用电效益、停电意愿情况后, 与用户签订可中断负荷合同, 在电力需求紧张时按合同中断对用户的电力供应并给予一定经济补偿。

由于可中断负荷对电力公司具有经济性、消除阻塞、维护系统稳定等优点, 近年来人们对可中断

负荷, 尤其是电力公司与用户签订可中断负荷合同的决策问题<sup>[1-3]</sup>, 进行了大量研究并取得了很大进展。然而电力公司在与用户签订可中断负荷合同的决策中, 存在大量的不确定性因素, 不仅直接影响电力公司的经济收益, 同时会对其造成风险损失。综合考虑这些不确定性因素, 从而对电力公司的风险和收益进行正确评估, 将更有利于做出最佳决策。而现有的文献中, 这样的研究很少。

不确定性风险收益研究已在管理、金融等领域得到了广泛的发展<sup>[4]</sup>。本文尝试将其引入电力系统ILM中, 采用证据理论结合模糊层次分析法建立可中断负荷不确定性风险收益评估模型, 并对其在ILM决策中的应用作了说明, 最后用一个简单算例

基金项目: 国家电网公司重大科技创新专项

验证其可行性，并提出了模型改进的建议。

### 1 证据理论基本原理概述

证据理论<sup>[5-9]</sup>由上世纪 60 年代 Dempster 提出，后由 G. Shafer 在 1976 年出版的《证据的数学理论》专著中建立。它作为一种不确定推理方法，能很好地处理决策中证据不完备、不直接、模糊性等情况，将人们“很多、较高、很低”等对不确定性因素的判断语言量化，并给出多个因素评价结果合成的方法，最终确定最佳决策方案。因此证据理论已发展成一类重要的不确定处理方法，成为设计专家系统的标准工具。以下对其重要概念进行介绍：

**定义 1** 设  $\Theta$  是决策者能认识到的所有可能结果的识别框， $m$  是基于一项证据从识别框对应命题域  $2^\Theta$  映射到  $[0,1]$  上的函数，满足①  $m(\Phi) = 0$ ；② 对  $\forall A \in 2^\Theta, m(A) \geq 0$  且  $\sum_{A \in 2^\Theta} m(A) = 1$ ，则  $m(A)$  为命题  $A$  的基本概率赋值 BPA，是决策者对证据能为命题提供支持程度的主观判断。

**定义 2** 设  $m_1, m_2$  是同一识别框  $\Theta$  上基于两个独立证据的 BPA 函数， $X$  和  $Y$  分别为  $m_1$  和  $m_2$  函数对应的命题，通过 Dempster 合成规则，可以定义下列函数：①  $m_{12}(\Phi) = 0$  ②  $m_{12}(A) = \frac{1}{1-K} \sum_{X \cap Y = A} m_1(X)m_2(Y)$ ，

其中  $K = \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y)$  为不同证据的冲突因子，则  $m_{12}(A)$  表示  $m_1$  与  $m_2$  对应独立证据对命题  $A$  联合支持程度。

证据理论的明显优势是不确定性问题的定量表示，但由于理论上的局限性，也存在着一些制约着实际使用的问题。例如证据理论对证据的要求十分严格，判断不同因素的证据必须是相互独立的，不能使用相互关联的证据。考虑到这样的限制，本文下面在对影响可中断负荷风险收益的不确定性因素进行划分时，尽量使不同因素间的支持证据能够保持独立性。电力部门在使用证据进行判断时，有些支持证据实在无法解除关联性的，应只用于最相关因素的判断，而不能同时对多个不确定性因素提供支持。

## 2 影响可中断负荷风险收益的不确定性因素分析

### 2.1 影响可中断负荷收益的不确定性因素

电力公司运营的成本主要有两部分：一部分是发电侧实时市场的购电费用，另一部分是输配电设

备容量投资和运行成本。

在用电高峰时，系统发电侧的实时市场电能供应紧张，电价高于正常价格，甚至产生严重的价格尖峰；而考虑到社会和经济影响，电力公司配电侧的售电价格则基本保持平稳，因此电力公司在购电成本上可能损失巨大<sup>[10]</sup>。若电力公司采用 ILM 模式，则可避免实时市场高价电的购买，成本将大幅降低，节省的高价电费  $(P_m - P_s) * c$  应视为实施 ILM 的收益， $P_m$  为市场清算电价， $P_s$  为售电价格， $c$  为某用户可中断负荷容量。由于  $P_m$  和  $P_s$  存在一定的波动性，因此在决策时刻各用户将为电力公司在购电费用上带来的收益具有不确定性。本文将售电收入损失的风险已计入购电费用收益的不确定性中。

采用 ILM 还能减少电力公司输配电扩容投资和送电运行成本，也是 ILM 收益的一部分。该收益由负荷需求预测下可避免投资成本的估算和经济调度运行模拟下可避免运行成本的估算组成，是扣除了 ILM 相关设备的投资维护费用、中断补偿费用等成本后的净收益。由于在负荷预测、经济调度运行模拟、ILM 设备管理维护中存在大量不确定性因素，因此可避免投资成本和可避免运行成本的收益是一种“事先”不确定性的估算。通常，中断补偿费用（即用户中断成本）也会受到提前通知时间、停电持续时间、停电发生时间、用户缺电比率等多种不确定性因素影响。但根据我国实际情况，ILM 的实施可以采用一种较为简单的形式<sup>[1]</sup>：由愿意参与 ILM 的用户申报中断补偿费用和容量，再由电力公司对他们进行风险收益评估，最终签订中断合同，因此本文未将中断补偿费用的成本作为影响收益的主要不确定性因素。

此外，ILM 还可减少因中断负荷与用户发生的法律纠纷和经济赔偿；相当于增加备用机组，可减少未来维护系统稳定的费用等，这些都将是 ILM 给电力公司带来潜在资金节约的收益。

### 2.2 影响可中断负荷风险的不确定性因素

风险是由于未来决策及客观条件的不确定性导致的实际与预期结果的偏差，是未来不确定性产生利益损失的可能。电力公司实施 ILM 的风险主要有三方面：用户违约风险、技术政策风险和其他因素引发风险。

在电力市场环境下，可中断负荷应建立在用户自觉履行与电力公司签订的 ILM 合同中中断负荷的基础上<sup>[11]</sup>。若其违约，电力公司可能遭受重新购买高价电、输配电耗费、网络稳定性维护等惨重损失。电力公司一旦与用户签订 ILM 合同，就要承担用户违约风险，因此在签订合同的决策时，应充分考虑

违约风险的影响。影响用户违约风险的不确定性因素主要有用户生产经营状况、经营者素质和 IL 合同相关内容的影响三个方面。电力公司一般可通过对用户生产效率、调整能力、恢复时间、电力在生产中的基础效用等证据资料对用户生产经营状况进行考察。经营者素质是对经营者诚信度的考察, 电力公司可以依据用户商业银行信用、偿债记录、支付电费情况等证据。IL 合同相关内容的影响是指合同中有关停电时间、提前通知时间、停电持续时间、违约罚款等条款对用户违约产生的影响。

其次, 未来向不同用户实施 ILM 时技术水平、相关政策法规调整等因素, 也存在一定的风险损失。此外, 电力公司进行可中断负荷操作实施的毕竟是人, 人类的非理性行为不可避免, 还可能突发一些意外的失误或者不利因素, 这都是其他一些引发可中断负荷风险的不确定性因素。

### 3 基于证据理论的可中断负荷不确定性风险收益评估模型及决策中的应用

通过上述分析可知, 电力公司与用户签订 ILM 合同前, 应全面考虑各种不确定性因素, 对不同用户给电力公司可能带来的风险和收益进行评估, 从而做出最佳决策。

#### 3.1 基于证据理论模型设计整体思路

证据理论允许将整个不确定性推理问题分解成若干层次分析, 对每个层次子因素做出处理的基础上, 利用证据合成法则得到目标问题的解, 因此本文将可中断负荷不确定性风险收益评估模型设计成一种层次推理模型。由前面对 ILM 不确定性因素分析, 将模型分成四个层次: 目标层即可中断负荷不确定性风险收益的综合评估; 在指标层将目标问题分为风险和收益两个指标; 在因素和子因素层对两

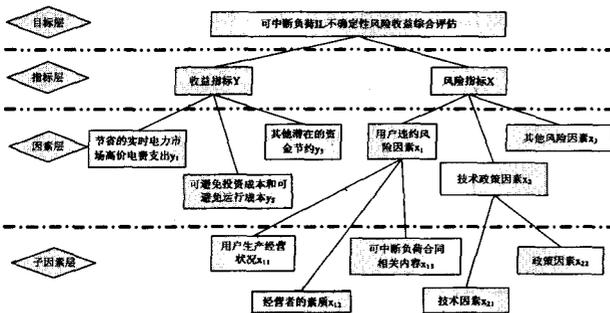


图 1 基于证据理论的可中断负荷不确定性风险收益评估模型

Fig.1 An evaluating model of IL uncertain risks and returns based on evidence theory

个指标进一步细化精炼, 形成树状结构的层次推理模型, 见图 1。模型的每个底层因素直接通过外部获得的独立证据进行判断处理, 并作为支持上层因素或指标的证据, 利用证据合成法则进行多次合成后得到上层因素的判断结果, 以此类推计算出顶层目标的 BPA 值, 最终由合适的决策规则得到 IL 不确定性风险收益评估结果。

#### 3.2 模型影响因素权重的确定

考虑到确定权重时, 决策者往往思维带有模糊不确定性, 采用基于三角模糊数互补判断矩阵的层次分析法对权重赋值<sup>[12]</sup>。分别将模型各层次相关因素两两比较, 构造各因素权重的三角模糊数互补判断矩阵  $\tilde{S} = (\tilde{s}_{ij})_{n \times n}$ , 其中三角模糊数  $\tilde{s}_{ij} = (s_{ij}^l, s_{ij}^m, s_{ij}^u)$  的  $s_{ij}^l, s_{ij}^m$  和  $s_{ij}^u$  分别表示因素  $s_i$  与  $s_j$  进行重要性比较, 决策者给出的  $s_i$  相对  $s_j$  最悲观、最可能和最乐观估计。由矩阵  $\tilde{S}$ , 求得模糊权重向量  $W = (\tilde{w}_1 \cdots \tilde{w}_i \cdots \tilde{w}_n)$ :

$$\tilde{w}_i = (w_i^l, w_i^m, w_i^u) = \frac{\sum_{j=1}^n \tilde{s}_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{s}_{ij}} = \left( \frac{\sum_{j=1}^n s_{ij}^l}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij}^l}, \frac{\sum_{j=1}^n s_{ij}^m}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij}^m}, \frac{\sum_{j=1}^n s_{ij}^u}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij}^u} \right) \quad (1)$$

建立可能度矩阵  $P = (p_{ij})_{n \times n} = P(\tilde{w}_i \geq \tilde{w}_j)$ , 并通过

可能度矩阵排序公式得到权重值  $w_i$ :

$$w_i = \frac{1}{n} \left[ \sum_{j=1}^n p_{ij} + 1 - \frac{n}{2} \right] \quad (2)$$

其中: 
$$p_{ij} = 0.5 \max \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{w_j^m - w_i^l}{w_i^m - w_i^l + w_j^m - w_j^l}, 0 \right\}, 0 \right\} + 0.5 \max \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{w_j^u - w_i^m}{w_i^u - w_i^m + w_j^u - w_j^m}, 0 \right\}, 0 \right\}$$

#### 3.3 模型底层因素确信度评定的模糊等级法<sup>[13]</sup>

电力公司可以直接通过外部获取的相互独立证据, 做出模型底层因素对风险收益指标作用大小的判断(即确信度)。采用模糊等级法, 将“很多、较高、很低”等对不确定性因素的模糊判断评语转换为确信度值。表 1 为不确定因素的模糊推断评语集, 将该评语映射到表 2 的模糊特征评语集, 定量刻画出电力公司对模型底层因素的确信度。

若电力公司对底层因素  $s_i$  的模糊推断评语为

$u_s$ , 则其对因素  $s_i$  关于模糊特征评语  $H_l$  的确信度为:

$$\bar{m}(H_l) = \frac{\sum_{k=1}^9 \min(u_{sk}, H_{lk})}{\sum_{k=1}^9 \max(u_{sk}, H_{lk})} \quad (l=1,2,3,4,5) \quad (3)$$

归一化处理得到  $m(H_l)$ , 记为  $\beta_l^{s_i}$ , 满足

$$\sum_{l=1}^5 \beta_l^{s_i} = 1。$$

表 1 模糊推断评语集定义

Tab.1 Fuzzy judgment language set

模糊推断评语	1	2	3	4	5	6	7	8	9
收益很多//风险很危( $u_1$ )	1	0.75	0	0	0	0	0	0	0
收益较多//风险高( $u_2$ )	0.25	1	0.75	0	0	0	0	0	0
收益较少//风险较高( $u_3$ )	0	0.25	1	0.75	0	0	0	0	0
无收益//风险中等( $u_4$ )	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0
负收益较少//风险较低( $u_5$ )	0	0	0	0.75	1	0.25	0	0	0
负收益较多//风险低( $u_6$ )	0	0	0	0	0.75	1	0.25	0	0
负收益很多//风险很低( $u_7$ )	0	0	0	0	0	0.75	1	0.25	0.1

表 2 模糊特征评语集定义

Tab.2 Fuzzy feature language set

模糊特征评语	1	2	3	4	5	6	7	8	9
大( $H_1$ )	1	0.75	0	0	0	0	0	0	0
较大( $H_2$ )	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
中等( $H_3$ )	0	0	0	0.75	1	0.25	0	0	0
较小( $H_4$ )	0	0	0	0	0	0.75	1	0.25	0
小( $H_5$ )	0	0	0	0	0	0	0	0.25	1

### 3.4 模型各因素基本概率赋值确定及其合成

根据各影响因素的权重和确信度, 利用重要度定义, 就可以得到各因素的基本概率赋值。

定义 3 根据决策者给出的各因素权重  $w_i$ , 因素  $s_i$  的重要度  $\alpha^{s_i}$  为:

$$\alpha^{s_i} = \mu^{s_i} \sigma^{s_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

其中: 折扣因子  $\sigma^{s_i} = \begin{cases} 1 & w_i \geq 1/n \\ w_i & w_i < 1/n \\ 1/n & \end{cases}$ ,  $n$  为影响因素的

个数;  $\mu^{s_i} \in [0.9, 1]$  为  $s_i$  的修正系数, 其取值与决策者对该因素影响大小的经验、偏好等有关。

电力公司对模型各因素关于  $H_l$  的基本概率赋值 BPA 为<sup>[13]</sup>:

$$m_l^{s_i} = \alpha^{s_i} \times \beta_l^{s_i} \quad (l=1,2,3,4,5) \quad (5)$$

$$m_\Omega^{s_i} = 1 - \sum_{l=1}^5 m_l^{s_i} \quad (6)$$

首先可以得到模型底层因素 BPA 值, 作为支持上层因素的证据, 利用 Dempster 证据合成规则合成后, 即为上层因素的确信度。以风险因素  $x_{11}$  和  $x_{12}$  合成为例:

$$m_l^{x_{11}x_{12}} = \frac{m_l^{x_{11}} \times m_l^{x_{12}} + m_l^{x_{11}} \times m_\Omega^{x_{12}} + m_l^{x_{12}} \times m_\Omega^{x_{11}}}{1-K} \quad (7)$$

其中: 冲突因子  $K = \sum_{l=1}^5 m_l^{x_{12}} \times (1 - m_l^{x_{11}} - m_\Omega^{x_{11}})$ 。同理合成  $x_{11}x_{12}$

与  $x_{13}$  得  $m_l^{x_{11}x_{12}x_{13}}$ , 得到风险因素  $x_1$  确信度  $\beta_l^{x_1}$ ,

结合重要度  $\alpha^{x_1}$  求出  $m_l^{x_1}$ 。以此类推, 计算出风险指

标  $x$  和收益指标  $y$  的确信度  $\beta_l^x$  和  $\beta_l^y$ 。通过特征评

语集的效用值集  $U(\Omega) = \{u(H_1), u(H_2), u(H_3), u(H_4), u(H_5)\}$   $0 \leq u(H_i) \leq 1$ , 得到最终目标值:

$$f(V_i, R_i) = (1-\lambda)V_i - \lambda R_i \quad (8)$$

其中:  $R_i = \sum_{l=1}^5 u(H_l) \beta_l^x$  和  $V_i = \sum_{l=1}^5 u(H_l) \beta_l^y$  分别为风险

和收益指标的大小;  $i (i=1,2,\dots,N)$  为愿意参与 ILM 的用户;  $\lambda$  为电力公司对风险的态度系数。

### 3.5 评估模型在决策中的应用

由上述讨论建立了 ILM 不确定性风险收益评估模型, 就可以在电力公司与用户签订 ILM 合同的决策中加以应用。首先由大用户对中断容量及补偿

费用报价,然后电力公司可建立如下决策模型,目标函数为:

$$\max f(V_i, R_i) = \sum_{i=1}^N U_i [(1-\lambda)V_i - \lambda R_i] \quad (9)$$

其中:  $N$  为愿意参与 ILM 的用户;  $V_i, R_i$  分别为电力公司根据用户  $i$  中断容量  $c_i$  及补偿费用申报,由不确定性风险收益评估模型,得到的用户  $i$  可能带来的收益和风险评估值;  $U_i$  为 0 和 1 的随机变量,表示用户  $i$  是否被选中参与 ILM。基本约束条件为:

$$\sum_{i=1}^N U_i c_i \geq \Delta L \quad (10)$$

其中:  $\Delta L$  为系统容量缺额,还可根据需要加入潮流、中断时间等约束条件。可以看出,决策模型就是建立在图 1 模型基础上并满足一定约束条件的应用问题。

#### 4 算例分析

假设有三个用户参与 ILM 申报,则电力公司根据用户中断容量和补偿费用的申报及获取的独立证据进行分析。表 3 为电力公司对模型各影响因素权重和重要度的确定,表 4 为电力公司根据获得的独立证据给出的模型底层因素的模糊推断评语。

表 3 模型各影响因素权重和重要度的确定

Tab.3 The weight and importance of the uncertainties of the model

	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$w$	$\alpha$
$y_1$	(0.5,0.5,0.5)	(0.3,0.4,0.7)	(0.4,0.7,0.8)	0.405 4	0.95
$y_2$	(0.3,0.6,0.7)	(0.5,0.5,0.5)	(0.4,0.7,0.8)	0.458 4	1
$y_3$	(0.2,0.3,0.6)	(0.2,0.3,0.6)	(0.5,0.5,0.5)	0.136 2	0.408 6
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$w$	$\alpha$
$x_1$	(0.5,0.5,0.5)	(0.4,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)	0.607 6	1
$x_2$	(0.2,0.3,0.6)	(0.5,0.5,0.5)	(0.4,0.6,0.7)	0.284 9	0.769 2
$x_3$	(0.2,0.3,0.4)	(0.3,0.4,0.6)	(0.5,0.5,0.5)	0.107 5	0.322 5
	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$w$	$\alpha$
$x_{11}$	(0.5,0.5,0.5)	(0.4,0.6,0.7)	(0.3,0.4,0.5)	0.308 1	0.924 3
$x_{12}$	(0.3,0.4,0.6)	(0.5,0.5,0.5)	(0.3,0.4,0.5)	0.142 0	0.426
$x_{13}$	(0.5,0.6,0.7)	(0.5,0.6,0.7)	(0.5,0.5,0.5)	0.549 9	1
	$x_{21}$	$x_{22}$		$w$	$\alpha$
$x_{21}$	(0.5,0.5,0.5)	(0.4,0.6,0.7)		0.625	1
$x_{22}$	(0.3,0.4,0.6)	(0.5,0.5,0.5)		0.375	0.75

假设  $U(\Omega) = \{u(H_1), u(H_2), u(H_3), u(H_4), u(H_5)\} = \{1, 0.8, 0.5, 0.3, 0.1\}$ , 则电力公司可以通过求解图 1 模型,得到各用户不确定性风险收益评估结果见表 5,从而确定优先签约对象。

由表 5 可以看到,虽然用户 2 带给电力公司的收益小于用户 1,但其相对风险也较小,电力公司在权衡比较收益和风险后,得到综合评估结果为:用户 2 > 用户 1 > 用户 3,即电力公司在满足各项约束条件的情况下,应首先考虑与用户 2 签约。

表 4 电力公司对各用户模型底层因素的模糊推断评语

Tab.4 Power company's fuzzy judgment about the bottom

	uncertainties		
	用户 1	用户 2	用户 3
$y_1$	$u_1$	$u_2$	$u_3$
$y_2$	$u_1$	$u_1$	$u_3$
$y_3$	$u_2$	$u_2$	$u_3$
$x_{11}$	$u_5$	$u_4$	$u_2$
$x_{12}$	$u_2$	$u_6$	$u_5$
$x_{13}$	$u_4$	$u_5$	$u_5$
$x_{21}$	$u_3$	$u_6$	$u_6$
$x_{22}$	$u_6$	$u_6$	$u_6$
$x_3$	$u_3$	$u_5$	$u_6$

表 5 三个用户风险收益综合评估结果

Tab.5 The comprehensive result of risks and returns

	from three users		
	用户 1	用户 2	用户 3
收益 $V$	0.993 6	0.966 8	0.780 2
风险 $R$	0.586 2	0.504 9	0.529 6
综合值( $\lambda$ 取 0.5)	0.203 7	0.231 0	0.125 3

#### 5 结论

本文综合考虑了实施可中断负荷存在的多种不确定性因素,基于证据理论建立了一个类似专家系统的可中断负荷不确定性风险收益评估模型,并简要描述了其在电力公司签订 ILM 合同决策中的应用。算例证明了模型的可计算性,考虑到初步建立模型的粗糙性,在实际中还有许多有待改进的地方:①算例给出的仅是一种假设情况,实际情况下电力公司应搜集全面的证据,力求准确地对每个用户底层因素给出判断评语;②对不确定性因素进行评价使用的模糊推断评语集(表 1)可做进一步补充,使电力部门能对风险收益各种不确定性情况做出更精确的语言描述;③模型将某些因素直接简化成了底层因素,还可进一步细分这些因素,如经营者素质可再分解为商业、银行信用、还贷信用等子因素,层层细化以便决策者根据外部证据更容易做出准确的判断。

#### 参考文献

- [1] 王建学,王锡凡,王秀丽.可中断负荷合同模型研究[J].

- 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 11-16.
- WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, WANG Xiu-li. Study on Model of Interruptible Load Contract in Power Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 11-16.
- [2] 方勇, 张少华, 李渝曾. 一种激励相容的电力市场中断负荷管理合同模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 23-26.
- FANG Yong, ZHANG Shao-hua, LI Yu-zeng. An Incentive Compatible Contract for Interruptible Load Management in Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 23-26.
- [3] 张显, 王锡凡, 王建学, 等. 可中断电力合同中新型期权的定价[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 18-23.
- ZHANG Xian, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Pricing for Exotic Option of Interruptible Electricity Contracts[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 18-23.
- [4] 韩平, 席酉民. 企业违约风险因素分析与模糊综合评价[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2000, 20(3): 24-28.
- HAN Ping, XI You-min. Factor Analysis and Fuzzy Evaluation of Corporate Default Risk [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University (Social Sciences), 2000, 20(3): 24-28.
- [5] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence[M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1976
- [6] 杨春, 李怀祖. 一个证据推理模型及其在专家意见综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 44-48.
- YANG Chun, LI Huai-zu. An Evidence Reasoning Model with Its Application to Expert Opinions Combination[J]. Systems Engineering-theory and Practice, 2001, 21(4): 44-48.
- [7] 张全, 樊治平, 孟军. D-S 理论在不确定性属性决策中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 44-48.
- ZHANG Quan, FAN Zhi-ping, MENG Jun. The Application of D-S Theory in Multiple Attribute Decision Making with Uncertainty[J]. Systems Engineering-theory and Practice, 2001, 21(4): 44-48.
- [8] Yang J B, Singh M G. An Evidence Reasoning Approach for Multiple Attribute Decision Making with Uncertainty[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(1): 1-18.
- [9] 何波, 任鸣鸣, 王坚强. 一种基于证据理论推理的信息不完全的多准则决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(3): 58-62.
- HE Bo, REN Ming-ming, WANG Jian-qiang. A Method Based Evidential Reasoning for Multi-criteria Decision Making with Incomplete Information [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2006, 36(3): 58-62.
- [10] 方勇, 李渝曾. 电力市场中激励性可中断负荷合同的建模与实施研究[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 41-46.
- FANG Yong, LI Yu-zeng. Modeling and Implementation of Incentive Interruptible Load Contracts in Electricity Markets [J]. Power system Technology, 2004, 28(17): 41-46.
- [11] HUANG Shao-ling, LI Li, TAN Zhong-fu. Evaluating Electric ILM Customers' Default Risk Based on Fuzzy Set Theory[A]. in: 2007 IEEE Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery[C]. 2007.
- [12] 代旻, 陈云翔, 向玲. 不确定多属性决策中的一种模糊赋权方法[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(15): 60-64.
- DAI Min, CHEN Yun-xiang, XIANG Ling. A Fuzzy Method of Weighting in Uncertain MADM [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(15): 60-64.
- [13] 杨萍, 刘卫东. 一种考虑不确定性信息的专家综合评价方法[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 236-242.
- YANG Ping, LIU Wei-dong. An Evaluation Method of Experts Decision Making with Uncertainty [J]. Control and Decision, 2002, 17(2): 236-242.

收稿日期: 2008-09-25; 修回日期: 2008-10-16

作者简介:

张颖(1985-), 女, 硕士研究生, 从事电力市场方向研究; E-mail: carolinzhangying@sohu.com

张有兵(1971-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为分布式发电和可中断负荷、电能质量分析与控制、配电网自动化和通信技术; E-mail: youbingzhang@zjut.edu.cn

曹一家(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与控制、信息技术在电力系统中的应用、分布式智能系统理论等。