

# 基于专家知识结构的错峰控制限电分配研究

李扬, 于宏涛, 高立群, 王红霞

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 采用了层次分析与模糊集理论相结合的方法, 在不同的专家知识结构的基础上, 探讨了在用电峰值时段对多地区之间进行限电分配的问题。首先从分析影响地区限电时间分配主要因素出发, 建立了地区限电分配指标体系以及递阶层次的结构, 构造并确定了各指标的相对隶属度函数, 然后采用基于层次分析与专家知识结构的群决策理论计算各指标的相对权重值, 最后采用模糊综合决策方法进行多地区多目标限电时间分配的优化分配决策计算, 经实例研究, 得到较满意的实例研究结果。

**关键词:** 知识结构; 多目标; 模糊集; 群决策; 限电分配

**中图分类号:** TM73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2006)19-0046-05

## 0 引言

2003年以来, 随着经济的迅速发展, 我国东部和中部的大部分省市地区都出现了用电紧张的情况。为了缓解用电紧张的局面, 国家电网公司和各地区电网公司进行了大规模的扩充发电容量的投资建设(包括三峡建设)。但由于我国目前用电量的增长速度远远大于电力基础设施的扩建速度, 各地区用电容量缺口较大, 虽然采用了一些经济和政策上的手段来进行错峰避峰控制, 但出于电网安全的考虑, 在用电峰值时段进行部分地区的限电控制是非常必要的。如何根据各地区限电标准与安全要求, 通过社会、经济与环境等方面效益综合分析, 进行有限限电峰值容量在各地区间的科学合理分配, 使各地区的电网安全性最高、限电损失最小, 是当前亟待解决并且有着实际意义的重要课题。

考虑到错峰控制限电分配中涉及到许多人的知识与经验, 并具有一定的模糊性, 因此, 可从社会、经济、资源、环境等方面的系统分析出发, 运用模糊集理论<sup>[2,5]</sup>和层次分析<sup>[1,6]</sup>相结合的方法, 对多个地区之间的错峰控制限电分配的多目标群决策<sup>[4,7]</sup>问题进行探讨。因此限电分配属于非线性多目标群决策问题。<sup>[8-12]</sup>

## 1 数学模型与求解方法、步骤

### 1.1 建立限电分配指标体系及其递阶结构

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60274099); 教育部博士点基金资助项目(20020145007)

考虑到错峰控制限电时间在多地区间的合理分配, 是为了满足各地区一定的用电容量标准要求并实现在保证电网用电安全性的基础上限电损失最小。而影响限电损失的因素是多方面的<sup>[13-17]</sup>, 它既与限电的影响范围及限电时间等有关, 还与各地区的人口、产业结构、国民经济指标等社会经济状况有关, 其中, 有些因素可用经济量表示, 如限电地区人口、限电地区用电企业数量、限电地区生产总值等。此外, 还有一些间接效益, 如限电对经济的影响、对经济结构的调整、对生态环境的损害等, 则是潜在而难以估算的。那种单纯用经济效益来评价错峰控制限电的必要性, 进而影响到各地区限电时间的分配, 在一定程度上存在某种不足。因此, 为了有利于促进有限限电时间既在各地区之间得到公平合理的分配又可产生最小的限电损失, 有必要依据概念清楚、资料易得、计算简便、体现公平与效益的原则, 从影响地区限电分配的主要因素即社会、经济因素中选取有关指标, 建立图1所示指标体系及其递阶层次结构。

### 1.2 构造并确定各指标的相对隶属度函数

由于图1中指标类型较多, 存在模糊信息, 故构造了如下指标相对隶属度函数:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min\{a_{ij}\}}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}} \quad (1)$$

式中:  $r_{ij}$ 为  $i$ 地区第  $j$ 指标的相对隶属度;  $\max, \min$ 分别为取大、取小符;  $a_{ij}$ 为第  $i$ 地区第  $j$ 指标的客观值、受价值、统计误差等因素的影响, 它具有模糊性。

### 1.3 采用基于层次分析与专家知识结构的群决策理论计算各指标的相对权重值

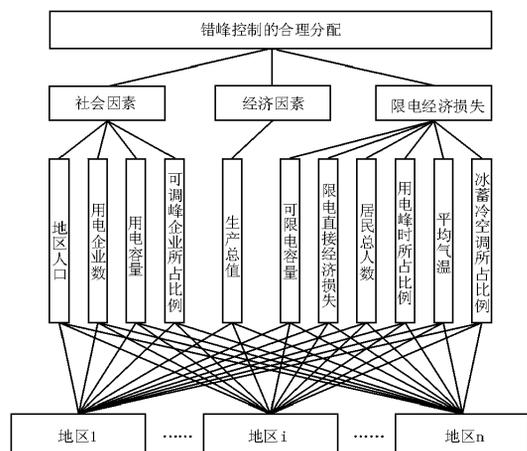


图1 地区错峰控制限电时间分配的决策指标体系

Fig 1 Decision system of peak load shifting power limiting distribution

层次分析法作为处理定性定量相结合的一种多目标决策方法,已广为应用<sup>[1]</sup>,但如何利用层次分析法解决决策问题尚不多见。本文采用基于专家知识结构不同的加权几何平均群排序向量法,处理多地区错峰控制限电时间分配中由多个专家的偏好以及其知识结构形成群偏好的问题。

### 1.3.1 专家组的选择

由于地区错峰控制限电时间分配主要受到图1中多种因素的影响,因此,专家组的选择一般考虑由错峰控制、电力规划等几个领域的专家组成。其中,各个领域的专家包括具有较强业务素质的电业管理专家和具有深厚的理论底蕴及丰富的科研实践能力的电网经济以及电网安全的研究专家组成。由于每位专家的知识结构是不同的,所以他们对于图1中每个影响因素的合理决策权重是不同的。

### 1.3.2 计算每个专家判断矩阵的权重向量

设选择有  $s$  个专家,  $n$  个错峰控制合理分配的影响因素或指标

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \quad (2)$$

对于每个专家都要针对  $n$  个影响因素判断重要程度,设  $s$  个专家所建立的  $n$  个影响因素的重要程度判断矩阵为  $V$ 。

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{s1} & \dots & v_{sn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$V$  按 AHP 法给出,根据判断矩阵可求出第  $i$  个专家所判断的  $n$  个影响因素对错峰限电控制分配重要程度的权重向量。

在应用 AHP 法的时候,专家对各个影响因素的

权重的确定遵循专家主观对各个影响因素重要程度的认识。比如说在一般情况下,在限电经济损失下面的 5 个因素中,由专家确定的“限电直接经济损失”所占有的权重往往要比其他 4 个因素要大一些,这也反映了专家认为“限电直接经济损失”在整个限电经济损失里所占的权重比较大。具体每个影响因素所占权值的定量计算,请参见参考文献 [1]。

将判断矩阵  $V$  归一化,得到归一化后的判断矩阵  $V$  :

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{s1} & \dots & v_{sn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{其中: } v_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum_{k=1}^n v_{ik}}, \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (5)$$

### 1.3.3 各个专家的权重向量合成

在群决策中,各决策者权重向量的合成一般有两种方法:一种是在判断矩阵上合成;另一种是在权重向量上合成。权重向量合成主要采用算术加权平均合成,该模型考虑了组成元素之间的相对重要程度,而且以权值的形式融入公式中,使得评价过程具有很强的合理性。由于专家的知识、经验和能力不同,他们在决策中对于不同的判断目标的相对重要性会不同,设  $s$  个专家对于  $n$  个因素的知识结构评判系数矩阵为:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ u_{s1} & \dots & u_{sn} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (6)$$

算术加权平均合成的方法为:根据  $s$  个专家分别得出的  $n$  个影响因素的重要程度的权重向量(上一节得出的第  $i$  个专家所建立的  $n$  个影响因素的重要程度判断向量为  $V_i$ ):

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})^T \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (7)$$

然后,根据以下公式计算群向量的各指标的相对权向量  $\bar{w} = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n]^T$ :

$$w_j = \frac{u_{ij}}{u_{1j} + u_{2j} + \dots + u_{sj}} = \frac{u_{ij}}{\sum_{k=1}^s u_{kj}} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^s w_j = w_{1j} + w_{2j} + \dots + w_{sj} = 1 \quad (9)$$

$$w_j = \sum_{k=1}^s (v_{kj} \times w_k) \quad (10)$$

$$j_j = j / \sum_{i=1}^s v_{ij}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

这里,  $v_{1j}, \dots, v_{sj}$  是对应于  $s$  个专家对于第  $j$  个影响因素知识结构水平的权重系数。

最后, 计算  $j_j$  的标准差

$$j_j = \sqrt{\frac{1}{n_j - 1} \sum_{k=1}^s (v_{kj} - j_j)^2} \quad (12)$$

当  $j_j < ( [0.5, 1] )$ , 认为群判断可以接受, 并将每个决策者的指标绝对权向量反馈给决策者, 供其参考; 若多个决策者都接受该权重向量, 则计算结束。否则, 请决策者提出修改判断意见。如此重复多次, 直到诸决策者获得满意权重向量时为止。

### 1.4 采用模糊综合决策方法进行多地区多目标限电时间分配的优化分配决策计算

针对图 1 所示递阶层次模型结构, 建立下列多地区多目标限电时间分配模糊综合决策模型

$$\bar{Y} = R \circ \bar{w} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $R$  为指标的相对隶属度矩阵;  $r_{ij}$  表示在  $m$  个地区中第  $i$  个地区第  $j$  个指标的相对隶属度;  $\bar{w}$  为群决策理论所确定的指标权重向量,  $w_j$  表示群决策下  $n$  个指标中第  $j$  个指标的权重;  $\bar{Y}$  为地区限电时间分配的比例向量。“ $\circ$ ”为模糊算子, 考虑到限电时间分配影响因素多, 且受整体目标制约, 可采用加权平均模型予以计算 (加权平均模型见文献 [2])。根据式 (13) 计算所得各地区的限电分配比例。

## 2 实例研究

根据辽宁省主管部门提供的资料, 2005 年夏辽宁省拟对该省所属 6 个地区进行错峰控制限电分配, 这 6 个地区的社会经济如表 1 所示, 错峰控制限电直接损失见表 2。

表 1 各地区社会经济指标值

Tab 1 Parameter of social economy

地区	地区人口 万人	用电企业 数量/家	用电容量 /MkW	可调峰企 业比例/(%)	生产总值 /万元
地区 1	56.42	308	47.28	17.83	476.52
地区 2	23.18	106	21.53	52.12	180.63
地区 3	89.13	416	62.52	41.63	725.20
地区 4	10.67	89	18.62	71.63	97.65
地区 5	36.21	218	32.15	31.25	207.26
地区 6	43.56	229	29.56	52.06	168.88

表 2 限电直接损失指标值

Tab 2 Economic loss of power limiting

地区	限电容量 /MkW	限电经济 损失/万元	居民人数 (万人)	用电峰时 比例/(%)	平均气温 /(°C)	冰蓄冷空 调所占比 例/(%)
地区 1	41.07	28.71	50.26	67.12	33.5	25.6
地区 2	28.52	8.28	19.17	40.06	31.2	30.1
地区 3	55.73	34.62	83.54	72.56	34.7	15.7
地区 4	34.64	7.43	8.99	36.11	29.8	35.2
地区 5	27.35	10.52	34.04	50.12	30.6	22.6
地区 6	23.06	9.31	39.56	54.58	31.3	21.7

表 3 专家知识结构评判

Tab 3 Expert knowledge structure judgment

专家	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$	$f_{11}$
1	50	90	85	60	45	80	45	40	90	35	65
2	80	70	70	55	60	70	65	95	70	85	85
3	70	40	45	85	95	50	90	65	40	80	50

注:  $f_1$  为地区人口;  $f_2$  为用电企业数量;  $f_3$  为用电容量;  $f_4$  为可调峰企业比例;  $f_5$  为生产总值;  $f_6$  为限电容量;  $f_7$  为限电经济损失;  $f_8$  为居民人数;  $f_9$  为用电峰时比例;  $f_{10}$  为平均气温;  $f_{11}$  为冰蓄冷空调所占比例

如果有 3 个决策者参与错峰控制限电分配决策, 采用上述模型方法进行 2005 年夏季该 6 个地区的错峰控制限电分配计算, 可得如下结果 (计算过程略):

(1) 决策者 1 的指标绝对权向量为

$$V_1 = \{0.0483, 0.1690, 0.0549, 0.0554, 0.0978, 0.0052, 0.1949, 0.1093, 0.0918, 0.0602, 0.1132\}$$

(2) 决策者 2 的指标绝对权向量为

$$V_2 = \{0.0623, 0.346, 0.0650, 0.0574, 0.1324, 0.0064, 0.1529, 0.0925, 0.0744, 0.1432, 0.0789\}$$

(3) 决策者 3 的指标绝对权向量为

$$V_3 = \{0.0924, 0.2084, 0.0386, 0.0621, 0.1105, 0.0116, 0.0988, 0.0863, 0.1242, 0.0428, 0.1243\}$$

(4) 根据 1.3.3 节专家权重向量的合成, 可以得到群决策者的指标权向量为

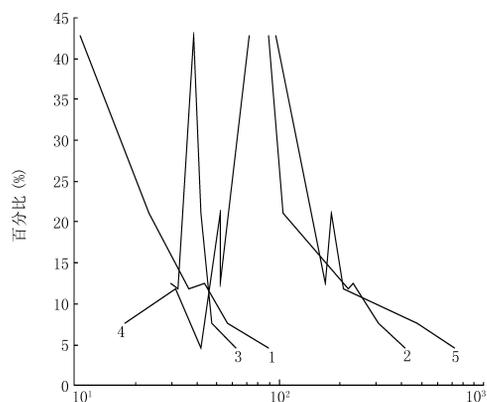
$$\bar{w} = \{0.0705, 0.1677, 0.0557, 0.0598, 0.1162, 0.0073, 0.1404, 0.0954, 0.0938, 0.0900, 0.1032\}$$

(5) 各地区计算错峰控制限电分配比例为:

$$Z_1 = 7.83\%, Z_2 = 19.75\%, Z_3 = 4.87\%, Z_4 = 43.52\%, Z_5 = 12.98\%, Z_6 = 11.05\%$$

## 3 结论

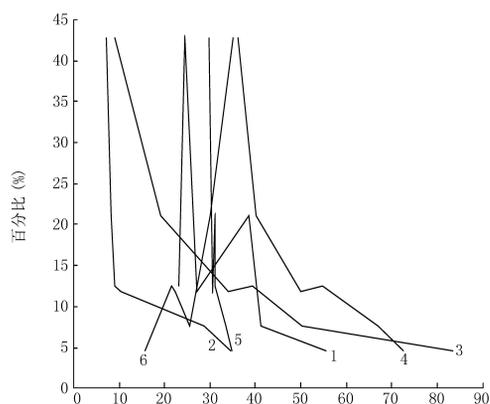
根据以上地区错峰控制限电时间分配的各种决策指标和限电分配比例的对应曲线示意图 (图 2 和图 3) 可以看出: 随着各地区社会经济指标值和限电直接损失的变化, 最终得到的限电分配比例也随之变化: 地区人口越多, 用电企业越多, 生产总值越多,



1为地区人口,2为用电企业数量,3为用电容量,4为可调峰企业比例,5为生产总值

图2 各地区社会经济指标值和限电分配比例的对应曲线示意图

Fig 2 Corresponding curve schematic diagram of social economic indicator and power limiting distribution in every region



1为可限容量,2为限电经济损失,3为居民人数,4为用电峰时比例,5为平均气温,6为冰蓄冷空调所占比例

图3 限电直接损失指标值和限电分配比例的对应曲线示意图

Fig 3 Corresponding curve schematic diagram of the economic loss indicator of power limiting and power limiting distribution proportion

限电损失越大,峰时比例越大,平均气温越高,冰蓄冷空调比例越小,可调峰企业比例越小的限电地区,决策者考虑到经济和社会的影响因素,最终分配的错峰限电时间比例越小。这非常符合人们的正常思维方式,从而,具有可行性,满足了实际的限电分配要求。

总之,限电分配是一项复杂的多目标群决策问题,限电时间的分配决策除与技术、经济和限电标准规划等因素有关以外,还直接关系到电网供电安全

和社会的稳定等方面,其限电时间分配决策的研究就更加复杂。本文从分析影响地区限电时间分配主要因素出发,建立了地区限电分配指标体系及其递阶层次结构,提出了基于层次分析与模糊综合评价相结合的大系统多目标群决策模型和方法,并得到较满意的实例研究结果。但是需要注意的是,错峰限电方案还应受到电气设备极限容量约束,因此在今后的研究过程中,还应考虑到各个用电地区的电气设备极限容量的问题,并且进一步加强错峰控制限电分配的社会评价与国民经济评价、环境影响评价、限电分配不确定性分配决策方法及其可靠性等的研究。

#### 参考文献:

- [1] 王莲芬,许树柏.层次分析引论[M].北京:中国人民大学出版社,1990  
WANG Lian-fen, XU Shu-bai Introduction of Hierarchical Analysis[M]. Beijing: China Renmin Press, 1990.
- [2] 周泰文,王晓星,刘后邗.模糊数学基础简明教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1993  
ZHOU Tai-wen, WANG Xiao-xing, LU Hou-han Fuzzy Mathematics Basic Conciseness Tutorial [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1993.
- [3] 唐焕文,秦学志.最优化方法[M].大连:大连理工大学出版社,1994  
TANG Huan-wen, QN Xue-zhi Optimization Method [M]. Dalian: Dalian of Technology University Press, 1994.
- [4] Delgado M, Herrera F, Herrera V E, et al Combining Numerical and Linguistic Information in Group Decision Making[J]. Information Sciences, 1998, 107: 177-194
- [5] Chiclana F, Herrera F, Herrera V E Integrating Three Representation Models in Fuzzy Multipurpose Decision Making Based on Fuzzy Preference Relations[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 97: 33-48
- [6] XU Ze-shui, WEI Cui-ping A Consistency Improving Method in the Analytic Hierarchy Process [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 116: 443-449.
- [7] Bryson N, Mobolurin A. An Action Learning Evaluation Procedure for Multiple Criteria Decision Making Problems [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 96: 379-386
- [8] Hwang C L, Yoon K Multiple Attribute Decision Making [M]. New York: Springer Verlag, 1981.
- [9] MA Jian, FAN Zhi-ping, HUANG Li-hua A Subjective and Objective Integrated Approach to Determine Attribute

- Weights[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 112: 397-404.
- [10] Herrera F, Herrera V E. Linguistic Decision Analysis: Steps for Solving Decision Problems Under Linguistic Information[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 115: 67-82.
- [11] Herrera F, Herrera V E. Choice Functions and Mechanisms for Linguistic Preference Relations[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120: 223-239.
- [12] Mamol A M, Puerto J, Femandez F R. The Use of Partial Information on Weights in Multi-attribute Decision Problem[J]. Journal of Multi-attribute Decision Analysis, 1998, 7: 322-329.
- [13] Ahmed S. Seasonal Models of Peak Electric Load Demand [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2005, 72 (5) : 609-622.
- [14] Al-Shakrchi M R G, Ghulain M M. Short Term Load Forecasting for Baghdad Electricity Region [J]. Electr Mach Power Syst, 2000, 28 (3) : 355-371.
- [15] Senjyu T, Sakihara H, Tamaki Y, et al. Next Day Peak Load Forecasting Using Neural Network with Adaptive Learning Algorithm Based on Similarity [J]. Electr Mach Power Syst, 2000, 28 (6) : 613-624.
- [16] Krunic M, Slavisa K I, Rajakovic N. An Improved Neural Network Application for Short Term Load Forecasting in Power Systems [J]. Electr Mach Power Syst, 2000, 28 (7) : 703-721.
- [17] Huang H C, Hwang R C, Hsieh J G. A New Artificial Intelligent Peak Power Load Forecaster Based on Non-Fixed Neural Networks [J]. Electr Power Energy Syst, 2002, 24 (2) : 245-250.

收稿日期: 2006-02-16; 修回日期: 2006-04-22

作者简介:

李扬 (1980 - ), 男, 博士研究生, 研究方向为复杂系统建模与智能优化; E-mail: holy\_blood@163.com

高立群 (1949 - ), 男, 教授、博士生导师, 研究方向为复杂系统建模与智能优化、模式识别与图像处理等;

于宏涛 (1978 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统建模与优化。

### Power limiting distribution research based on expert knowledge structure in peak load shifting control

LI Yang, YU Hong-tao, GAO Li-qun, WANG Hong-xia  
(Northeast University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Combining Analytical Hierarchy Process and fuzzy set theory and based on different expert knowledge structures, this paper studies power limiting distribution on power peak time between multi-zones. First, it establishes allocation of investment indicator system and hierarchical structure, constructs and determines indicator's relative degree of membership function. Then it adopts fuzzy integrated decision method to calculate optimized distribution decision of multi-zones multi-objective power limiting time distribution, and at last, a fuzzy comprehensive group decision model for multi-objective and multi-zones power limiting distribution in peak load shifting is built up. The performance of experiment of actual example is satisfactory.

**Key words:** knowledge structure; multi-objective; fuzzy sets; group decision; power limiting planning

(上接第 21 页 continued from page 21)

### Application of graph theory in distribution network flow calculation

X DNG Zhi-wei, CA IJ in-ding  
(Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** In order to solve the problems using traditional methods to calculate distribution network flow, this paper puts forward a new method to calculate distribution network flow based on graph theory. This new method avoids complicated process of matrix calculation, improves the precision of distribution network flow and gets over the problem that traditional methods can not be used in special circumstances of distribution network. The new method doesn't have convergence problems and many calculation results. And there is no calculational error that exists in traditional flow calculation methods.

**Key words:** distribution network flow; Char-Mai graph theory; iterative method