

DOI: 10.7667/PSPC150787

# 基于改进模糊 AHP 的电磁环网解环方案评估

韩子娇<sup>1</sup>, 李正文<sup>1</sup>, 赵鹏<sup>1</sup>, 李国庆<sup>2</sup>, 王长江<sup>2</sup>

(1. 辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 电磁环网解环方案评估能够辅助运行人员确定最优解环方案, 为电网的规划与建设提供重要的决策参考。介绍了模糊层次分析法的基本原理, 在构建一组反映解环方案优劣的指标集的基础上, 提出了一种基于改进模糊层次分析法的电磁环网解环方案评估方法。所提方法改进了模糊判断矩阵的一致性, 综合了模糊理论和层次分析法二者的优点, 既能将定性与定量分析有效结合, 又考虑了专家决策的模糊性质, 从而较为全面、客观、科学地评价解环方案的优劣。以鞍山电网实际系统为例, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 电磁环网; 模糊理论; 层次分析法; 方案评估

## Scheme evaluation for decoupling electromagnetic loop networks based on improved fuzzy AHP

HAN Zijiao<sup>1</sup>, LI Zhengwen<sup>1</sup>, ZHAO Peng<sup>1</sup>, LI Guoqing<sup>2</sup>, WANG Changjiang<sup>2</sup>

(1. Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110006, China; 2. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** Scheme evaluation for decoupling electromagnetic loop network can assist operating personnel in determining the optimal decoupling scheme, and provide an important reference for the planning and construction of power grids. First, the basic principles of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) are introduced, and then a new FAHP-based scheme evaluation method is proposed for decoupling electromagnetic loop networks based on a set of indicators reflecting the performance of the decoupling schemes. The proposed method improves the consistency of the fuzzy judgment matrix, and combines the advantages of fuzzy comprehensive evaluation and analytic hierarchy process. On the one hand, analytic hierarchy process effectively combines qualitative and quantitative analysis to ensure the rationality of the evaluation model; on the other hand, the judgment matrix and qualitative indicators are expressed with trapezoidal fuzzy numbers to make decision-makings more realistic. The effectiveness of the proposed method is validated by the application results on the real power system of Anshan region.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 2014GW-05).

**Key words:** electromagnetic loop network; fuzzy theory; analytic hierarchy process; scheme evaluation

## 0 引言

电磁环网是指电压等级不同的线路通过变压器的磁回路构成的环形电网<sup>[1]</sup>, 它是电网发展过程中的过渡阶段的产物。在高一级电压电网逐步发展中, 这种运行方式对提高电网供电可靠性、运行经济性等方面起到了积极作用; 但当高一级电网的网架结构显著增强后, 其缺点也显著暴露出来, 如增大了

电网运行的不确定性和管理难度, 给电网发展带来严重事故隐患<sup>[2-6]</sup>。如今, 避免和消除严重影响电网安全稳定运行的电磁环网, 已成为行业共识<sup>[7]</sup>。

消除环网运行的有效办法是将其解环, 实现电网分层、分区运行。由于不同的解环方案其潮流、短路电流、N-1、网损和稳定性等均有所不同, 直接影响电力系统的安全水平。在多种可行性方案中如何综合评价其优劣对提高系统的安全性、稳定性和经济性有很好的借鉴作用。因此, 电磁环网解环方案评估对辅助调度人员制定解环方案、提高电网送电能力和降低短路电流水平都具有重要意义。

**基金项目:** 2014 国网公司科技项目“柔性环网控制器关键技术研究及示范应用”(2014GW-05)

国内外研究人员已对电磁环网解环方案评估问题进行了一些有益的尝试和探索<sup>[8-10]</sup>。文献[8]提出了一种基于模糊综合评价(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCA)的 500kV-220kV 高低压电磁环网解环方案评价模型;文献[9]中运用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和模糊综合评价进行了解环方案的有益探索。但 AHP 针对不同系统确定判断矩阵时,受主观因素的影响很大。虽然模糊综合评价方法为传统最优化技术带来了新途径,但是评价模型缺乏系统性。文献[10]中运用基于熵权的模糊综合评价方法对电磁环网解环方案评估。受隶属度获取主观性大和指标间的相关性无法直观表示的制约。由于电磁环网解环方案评估问题的复杂性、模糊性和不确定性,现有层次分析法等评价方法的应用效果均不理想,因此迫切需要有新方法创新应用于解决电磁环网解环方案评估问题。

本文提出了一种基于改进模糊 AHP(Fuzzy AHP, FAHP)的电磁环网解环方案评估方法。AHP 将决策问题进行层次分解,实现定性分析与定量分析的有效结合,但决策时其主观性较强。FAHP 是 AHP 在模糊环境下的扩展,通过将“权重计算”予以模糊化<sup>[11]</sup>,克服了 AHP 在处理决策问题上的局限性,使决策更加客观、合理。

### 1 模糊层次分析法

AHP 是一种将定性分析和定量计算相结合的多目标决策分析方法<sup>[11]</sup>。因为它具有简洁性和系统性的优点,近年来得到快速发展。

本文所提方法采用 AHP 建立方案评估模型,并将“权重计算”予以模糊化。采用两极比例方法实现定性定量指标的相互转换<sup>[12-13]</sup>,见表 1。

表 1 评价语与模糊数对照表

Table 1 Corresponding table of qualitative evaluation and fuzzy numbers

定性语	模糊数	定性语	模糊数
很重要	(0.8,1,1,1)	较不重要	(0,0.2,0.2,0.4)
重要	(0.7,0.9,1,1)	不重要	(0,0,0.1,0.3)
较重要	(0.6,0.8,0.8,1)	很不重要	(0,0,0,0.2)
一般	(0.3,0.5,0.5,0.7)		

令决策问题中有  $n (n \geq 2)$  个属性  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , 并记  $Y = \{y_i | i \in N\}$  为属性集,其中  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。称  $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{n \times n}$  为梯形模糊数互补判断矩阵,其中  $\tilde{r}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$  表示属性  $y_i$  比属性  $y_j$  重要的程度,  $a_{ij} \leq b_{ij} \leq c_{ij} \leq d_{ij}, \forall i, j \in N (i \neq j)$ , 且满足<sup>[14]</sup>:

$$(I) a_{ii}^{(k)} = b_{ii}^{(k)} = c_{ii}^{(k)} = d_{ii}^{(k)} = 0.5, \forall i \in N;$$

$$(II) a_{ij}^{(k)} + d_{ji}^{(k)} = 1, b_{ij}^{(k)} + c_{ji}^{(k)} = 1,$$

$$c_{ij}^{(k)} + b_{ji}^{(k)} = 1, d_{ij}^{(k)} + a_{ji}^{(k)} = 1$$

根据表 1,将两两判断矩阵改为梯形模糊数互补判断矩阵,根据模糊数的运算规则进行权重计算。FAHP 继承了 AHP 的优点,将复杂的决策问题分解成目标、准则、方案等层次,保证层次结构模型的合理性和系统性,并且将“权重计算”予以模糊化,从而克服了 AHP 在处理决策问题上的局限性,使决策更加客观、合理。

## 2 基于改进 FAHP 的电磁环网解环方案评估

### 2.1 电磁环网解环的基本原则

综合已有文献的成果<sup>[15-19]</sup>,本文考虑的主要解环基本原则如下:

- 1) 根据电网分层分区、方便管理的原则选择解环线路。
- 2) 解环后应适应不同的潮流变化,具有合理的潮流分布、网络结构,并且无元件过载现象。
- 3) 具有较大的抗干扰能力,符合 N-1 要求。
- 4) 通过解开电磁环网,降低系统的短路电流。
- 5) 断开联络线后,系统应具有较高的安全稳定性,以保证系统满足安全稳定性要求。
- 6) 解环后各分区应具有合理的电源分布,分区间互为备用电源,以防止解环后分区间发生大面积停电事故。

### 2.2 评估流程

本文所提的基于改进 FAHP 电磁环网解环方案评估方法大体包括如下步骤:层次结构模型的建立、模糊判断矩阵的构造及一致性改进、权重计算、指标值的归一化计算和解环方案的综合排序,如图 1 所示。

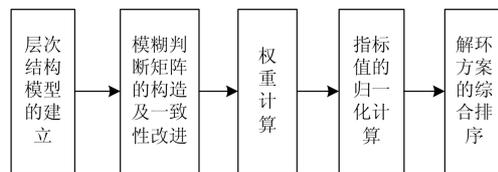


图 1 解环方案评估流程

Fig. 1 Flowchart of scheme evaluation

#### 2.2.1 层次结构模型的建立

针对本文所要解决的问题,将解环方案排序设定为目标层;根据《电力系统安全稳定导则》和电磁环网解环的基本原则选取准则和指标,建立评估模型,如图 2 所示。

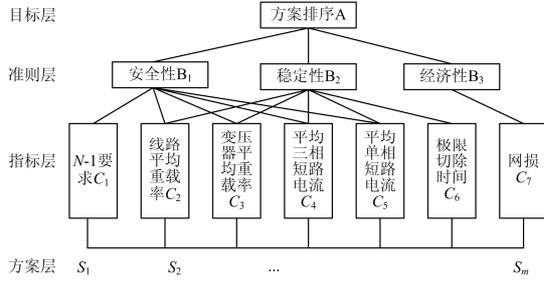


图2 解环方案评估的层次结构模型

Fig. 2 Hierarchical structure model of scheme evaluation

解环方案的准则层由安全性准则  $B_1$ 、稳定性准则  $B_2$  和经济性准则  $B_3$  组成。影响安全性的主要指标为  $N-1$  要求  $C_1$ 、线路平均重载率  $C_2$ 、变压器平均重载率  $C_3$ 、平均三相短路电流过流率  $C_4$  及平均单相短路电流过流率  $C_5$ , 将此五个因素作为安全性准则下的指标; 影响稳定性的主要指标为线路平均重载率  $C_2$ 、变压器平均重载率  $C_3$ 、平均三相短路电流过流率  $C_4$  及平均单相短路电流过流率  $C_5$  及极限切除时间  $C_6$ , 将此五个因素作为稳定性准则下的指标; 影响经济性的指标为网损  $C_7$ , 将此因素作为经济性准则下的指标。

1)  $N-1$  要求指标  $C_1$ 。  $C_1$  是指不满足  $N-1$  安全准则要求的元件总数; 进行  $N-1$  校核的元件包括线路、变压器或一台主力发电机。

2) 线路平均重载率指标  $C_2$

$$C_2 = \frac{\sum_{i=1}^{m_L} L_i}{m_L} \quad (1)$$

式中:  $m_L$  为系统中负载率超过阈值的线路总数;  $L_i$  为超过该阈值的各条线路的负载率。

3) 变压器平均重载率指标  $C_3$

$$C_3 = \frac{\sum_{i=1}^{m_T} T_i}{m_T} \quad (2)$$

式中:  $m_T$  为系统中负载率超过阈值的变压器总数;  $T_i$  为超过该阈值的各变压器的负载率。

4) 平均三相短路电流过流率指标  $C_4$

$$C_4 = \frac{\sum_{i=1}^{m_{3B}} SA_i}{m_{3B}} \quad (3)$$

式中:  $m_{3B}$  为系统中三相短路电流超过其额定值的母线条数;  $SA_i$  为相应母线的过流率。过流率定义为: (实际短路电流-额定电流)/额定电流。

5) 平均单相短路电流过流率指标  $C_5$

$$C_5 = \frac{\sum_{i=1}^{m_{1B}} DA_i}{m_{1B}} \quad (4)$$

式中:  $m_{1B}$  为系统中单相短路电流超过其额定值的母线条数;  $DA_i$  为相应的母线过流率。

6) 极限切除时间指标  $C_6$ 。  $C_6$  是指发生三相短路故障时的平均极限切除时间。如果极限切除时间越大, 则受扰系统越不容易失稳, 即在方案评估中该指标相对越优。

7) 网损指标  $C_7$ 。  $C_7$  是指整个电网的有功损耗。在满足各种安全、稳定要求前提下, 如果解环后全网有功损耗越小, 则方案评估中该指标相对越优。

### 2.2.2 模糊判断矩阵的构造及一致性改进

假设有  $L$  位专家参与评判, 根据表 1, 建立梯形模糊互补判断矩阵<sup>[20]</sup>。记第  $k$  位专家给出的梯形模糊数互补判断矩阵为  $\tilde{R}^{(k)} = (\tilde{r}_{ij}^{(k)})_{n \times n}$ , 其中  $\tilde{r}_{ij}^{(k)} = (a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}, c_{ij}^{(k)}, d_{ij}^{(k)})$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, L\}$ ;  $i, j \in N$ 。

为了检验判断矩阵的一致性, 引入核、核算子、核矩阵<sup>[21]</sup>的概念, 通过检查它的核矩阵的一致性检查判断矩阵的一致性。梯形模糊数  $\tilde{r}_{ij}^{(k)}$  的核<sup>[22]</sup>为

$$K(\tilde{r}_{ij}^{(k)}) = \begin{cases} a_{ij}^{(k)}, & \text{当 } a_{ij}^{(k)} = b_{ij}^{(k)} = c_{ij}^{(k)} = d_{ij}^{(k)} \text{ 时} \\ \frac{(c_{ij}^{(k)})^2 + (d_{ij}^{(k)})^2 - (a_{ij}^{(k)})^2 - (b_{ij}^{(k)})^2 + d_{ij}^{(k)} c_{ij}^{(k)} - a_{ij}^{(k)} b_{ij}^{(k)}}{3(c_{ij}^{(k)} + d_{ij}^{(k)} - a_{ij}^{(k)} - b_{ij}^{(k)})}, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\tilde{R}^{(k)}$  对应的核矩阵为  $R^{(k)'} = (r_{ij}^{(k)'})_{n \times n}$ ,  $r_{ij}^{(k)'} = K(\tilde{r}_{ij}^{(k)})$ 。

一致性改进的具体步骤如下:

Step1: 根据式(5), 得到核矩阵  $R^{(k)'} = (r_{ij}^{(k)'})_{n \times n}$ 。

Step2: 按照式(6), 计算  $R^{(k)'}$  的一致性指标  $\rho$ :

$$\rho = \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^n \left| r_{ij}^{(k)'} - (r_{ik}^{(k)'} + r_{kj}^{(k)'} - \frac{1}{2}) \right| \quad (6)$$

如果  $\rho < \varepsilon$ , 则  $R^{(k)'}$  满足一致性、跳转到 Step8; 反之, 则跳转到下一步。其中,  $\varepsilon$  为一致性指标临界值, 文中  $\varepsilon$  取为 0.2。

Step3: 计算  $R^{(k)'}$  的特征矩阵  $R^{(k)*} = (r_{ij}^{(k)*})_{n \times n}$

$$r_{ij}^{(k)*} = \alpha(w_i^{(k)} - w_j^{(k)}) + 0.5 \quad (7)$$

其中,  $w_i^{(k)}$  为排序向量,

$$w_i^{(k)} = 1/n - 1/n\alpha + \sum_{k=1}^n r_{ij}^{(k)*} / n\alpha \quad (8)$$

其中,  $a \geq (n-1)/2$ 。

Step4: 计算  $R^{(k)'}$  的偏差矩阵  $D$ ,  $D = (d_{ij})_{n \times n} =$

$$R^{(k)'} - R^{(k)*}, \text{ 求出 } |d_{st}| = \max \{ |d_{ij}| : i < j, i, j \in n \}.$$

Step5: 若  $d_{st} < 0$ , 则跳转到 Step6; 若  $d_{st} > 0$ ,

则适当减小  $\tilde{r}_{st}^{(k)}$ , 即令  $\tilde{r}_{st}^{(k)'} = \tilde{r}_{st}^{(k)} - \theta$ , 同时相应增大  $\tilde{r}_{ts}^{(k)}$ , 即令  $\tilde{r}_{ts}^{(k)'} = \tilde{r}_{ts}^{(k)} + \theta$ 。其中,  $\theta$  为调整量,  $0 < \theta < 1$ 。

Step6: 此时,  $d_{st} < 0$ , 则适当增大  $\tilde{r}_{st}^{(k)}$ , 即  $\tilde{r}_{st}^{(k)'} = \tilde{r}_{st}^{(k)} + \theta$ , 同时相应减小  $\tilde{r}_{ts}^{(k)}$ , 即令  $\tilde{r}_{ts}^{(k)'} = \tilde{r}_{ts}^{(k)} - \theta$ 。

Step7: 重复 Step1 至 Step6。

Step8: 调整结束, 当前的互补判断矩阵满足一致性要求。

对模糊判断矩阵进行一致性校验及改进的具体流程如图 3 所示。

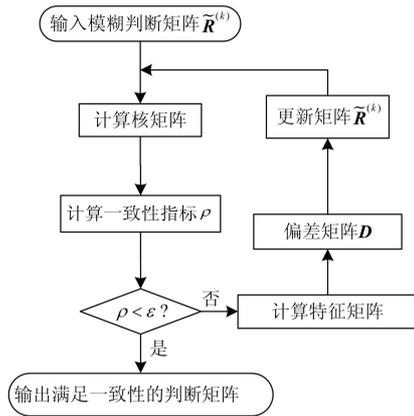


图 3 一致性改进的流程图

Fig. 3 Flowchart of consistency improvement

### 2.2.3 权重计算

综合各专家的评判信息。

$$\tilde{r}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}) = \left( \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L a_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L b_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L c_{ij}^{(k)}, \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L d_{ij}^{(k)} \right) \quad (9)$$

可得, 模糊数互补判断矩阵为  $\tilde{R} = (\tilde{r})_{n \times n}$ 。

计算各层间的权重。计算各属性  $y_i$  的模糊评价值:

$$\tilde{v}_i(a_i, b_i, c_i, d_i) = \left( \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \quad (10)$$

属性  $y_i$  的模糊评价值的期望:

$$I(\tilde{v}_i) = \frac{a_i + b_i + c_i + d_i}{4} \quad (11)$$

对式(9)进行归一化处理, 可得梯形模糊数互补判断矩阵中各属性的相对权重:

$$w_i = \frac{I(\tilde{v}_i)}{\sum_{i=1}^n I(\tilde{v}_i)}, \quad i \in N \quad (12)$$

式中,  $w_i$  为属性  $y_i$  的相对权重。

### 2.2.4 指标值的归一化计算

FAHP 中, 假定方案在各指标上越大越好, 并对各指标值进行归一化处理, 则综合评价价值最大的方案为最优方案。

指标  $C_1$  的归一化公式为

$$x_{ij} = (1 - z_{ij}/10) / \sum_{i=1}^m (1 - z_{ij}/10) \quad (j=1) \quad (13)$$

式中:  $z_{ij}$  表示备选方案  $S_i$  中指标  $C_j$  的值;  $x_{ij}$  表示经归一化处理后备选方案  $S_i$  中指标  $C_j$  的值,  $i \in M$ ,

$M = \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, 7\}$ 。

$C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  及  $C_7$  的归一化公式为

$$x_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} / \sum_{i=1}^m \frac{1}{z_{ij}} \quad (j=2, 3, \dots, 7) \quad (14)$$

### 2.2.5 解环方案的综合排序

通过以上计算方法, 可以确定准则层相对总目标的权重向量为  $W_A$ , 运用相同的原理可以得到各相应指标对准则  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  的权重向量为  $W_{B1}$ 、 $W_{B2}$ 、 $W_{B3}$ , 从而得到指标层相对准则的权重向量为  $W_B$ 。经归一化的指标值用  $X$  表示, 从而得到各方案的综合评价值  $F = X * W_B * W_A$ , 综合评价价值最大的方案即为最优方案。

## 3 算例分析

### 3.1 鞍山电网概况

鞍山电网地处辽宁电网中南部, 500 kV 基本环网已形成, 220 kV 电网密集程度较高, 是±500 kV 伊穆直流以及辽宁中部输电通道、辽西外送通道的重要落点, 网架集中, 对电网短路电流水平提出了很高的要求。

随着辽宁电网发展, 网架结构不断加强。“十二五”后两年辽宁电网燕州变、长岭变、西海变等重要输变电工程建成投产后, 一方面将使地区供电能力大大提高, 但同时整体短路电流水平也将随之升高, 短路电流超标问题突出。鞍山电网的地区接线图如下图 4 所示。

### 3.2 初步方案的确定

以电力系统计算分析软件(PSD-BPA)为仿真工具, 通过分析计算, 提供了三种待评估的解环方案:

方案 1: 断开城昂-红旗堡之间的双回线、前杠

-草河口之间的单回线、王铁-海城之间的单回线。

方案 2: 断开渤海-南海之间的单回线、渤海-熊岳之间的单回线、渤海-北海之间的双回线。

方案 3: 断开鞍山-刘二堡之间的双回线、鞍山-城昂之间的双回线、断开牛庄-东昌间的双回线。

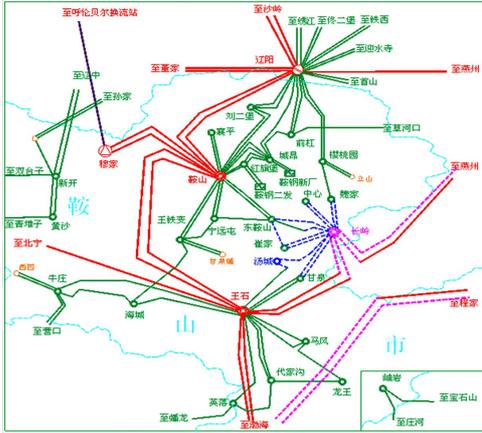


图 4 鞍山电网地区接线图  
Fig. 4 Diagram of Anshan power grid

### 3.3 结果与讨论

通过仿真计算, 所得各参与评估方案的指标实际值如表 2 所示。

表 2 实际的指标值

Table 2 Actual index values of related schemes

指标	方案 1	方案 2	方案 3
C <sub>1</sub>	0	6	0
C <sub>2</sub>	81.3	92.8	90.3
C <sub>3</sub>	85.24	85.41	87.03
C <sub>4</sub>	0.062	0.069	0.066
C <sub>5</sub>	0.151	0.138	0.186
C <sub>6</sub>	0.11	0.12	0.10
C <sub>7</sub>	230.75	237.48	240.26

其中, N-1 指标、线路平均重载率、变压器平均重载率、平均三相短路电流过流率、平均单相短路电流过流率、网损是属于越小越好的指标, 而极限切除时间是属于越大越好的指标。由于上表各个评价指标单位、量纲、数量互不相同, 不仅会影响决策的结果, 而且可能会造成决策失误。归一化后的指标值 X 见表 3。

聘请三位专家, 通过两两比较形成准则层由定性评价语表示的互补矩阵; 然后根据表 1, 得出梯形模糊数互补判断矩阵。经计算, 一致性指标分别为  $\rho_1=0.1333$ ,  $\rho_2=0.1222$ ,  $\rho_3=0.1000$ , 均满足一致性(小于  $\epsilon$ )。专家意见加权平均后准则层相对于目标层的梯形模糊判断矩阵  $\tilde{R}$  为

表 3 归一化后的指标值

Table 3 Normalized index values of related schemes

指标	方案 1	方案 2	方案 3
C <sub>1</sub>	0.4167	0.1667	0.4167
C <sub>2</sub>	0.3602	0.3155	0.3243
C <sub>3</sub>	0.3359	0.3352	0.3290
C <sub>4</sub>	0.3524	0.3166	0.3310
C <sub>5</sub>	0.3441	0.3765	0.2794
C <sub>6</sub>	0.3315	0.3039	0.3646
C <sub>7</sub>	0.3411	0.3314	0.3276

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} (0.5, 0.5, 0.5, 0.5) & (0.3, 0.5, 0.5, 0.7) & (0.8, 0.9, 1.0, 1.0) \\ (0.3, 0.5, 0.5, 0.7) & (0.5, 0.5, 0.5, 0.5) & (0.6, 0.8, 0.8, 1.0) \\ (0.0, 0.0, 0.1, 0.2) & (0.0, 0.2, 0.2, 0.4) & (0.5, 0.5, 0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

得到各准则的权重为

$$W_A = [0.4245 \ 0.3999 \ 0.1756]^T$$

按上述方法, 得到指标层 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub> 相对准则层 B<sub>1</sub> 的权重向量为  $W_{B1} = [0.3 \ 0.033 \ 0.067 \ 0.3 \ 0.267 \ 0 \ 0]^T$ ; 指标层 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub> 相对于准则层 B<sub>2</sub> 的权重向量为  $W_{B2} = [0 \ 0.067 \ 0.1 \ 0.267 \ 0.233 \ 0.33 \ 0]^T$ , 指标层 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub> 相对于准则层 B<sub>3</sub> 的权重向量为  $W_{B3} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ , 进而可得指标层相对准则层的权重向量 W<sub>B</sub>, 即

$$W_B = [W_{B1}, W_{B2}, W_{B3}] = \begin{bmatrix} 0.3000 & 0 & 0 \\ 0.0330 & 0.0670 & 0 \\ 0.0670 & 0.1000 & 0 \\ 0.3000 & 0.2670 & 0 \\ 0.2670 & 0.2330 & 0 \\ 0 & 0.3300 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

经计算归一化后的指标值与权重矩阵相乘得到各备选方案的综合评价值为:  $F = X * W_B * W_A = [0.3482 \ 0.3151 \ 0.3215]^T$ 。由综合评价值知, 三个方案的优劣顺序为: S<sub>1</sub> > S<sub>3</sub> > S<sub>2</sub>, 方案 S<sub>1</sub> 为最优方案。

### 3.4 与其他评估模型的比较

为了进一步验证所提方法的有效性, 分别采用 FCA 法<sup>[8]</sup>和 AHP 法<sup>[9]</sup>的进行了对比测试, 所得优先度及排序结果见表 4。

由表 4 可知: 本文方法的综合评价结果为方案 1 为最优、方案 3 次之、方案 2 为最差, 此排序结果与文献[8]FCA 法的结果相一致; AHP 法所得的最优方案也为方案 1, 但次优方案及最差方案与上述两种方法不同。

表 4 其他评估模型的评估结果

Table 4 Evaluation results of other related schemes

评估模型		方案 1	方案 2	方案 3
FCA	优先度	0.3502	0.3084	0.3224
	排序	1	3	2
AHP	优先度	0.3613	0.3261	0.2996
	排序	1	2	3
本文方法	优先度	0.3482	0.3151	0.3215
	排序	1	3	2

分析其原因,可知:采用AHP法进行方案评估时,所得结果的正确性受决策者的主观影响很大;而本文所采用的FAHP法有如下特点:一方面,FAHP继承了AHP的优点,将复杂的决策问题分解成目标、准则、方案等层次,使评价模型更加系统、合理;另一方面,FAHP将两两比较矩阵予以“模糊化”构建梯形模糊数互补判断矩阵,有效降低了专家决策的主观性。因此,在本文算例中,当分别采用本文方法和经典AHP法评估解环方案时,所得方案2和方案3排序结果不一致。

#### 4 结论

本文提出了基于改进模糊层次分析法的电磁环网解环方案评估方法,并将其应用于鞍山电网实际系统中,结论如下:

(1) 所提方法综合了层次分析法和模糊理论的优点,通过采用梯形模糊数代替两两比较因素的重要程度,有效解决了层次分析法在处理专家主观因素所具有的局限性。

(2) 应用于鞍山电网实际系统的算例结果表明,所提方法能够全面、客观、科学地评价不同电磁环网解环方案的优劣,为方案决策提供支持。

(3) 所提电磁环网方案评估方法可为电网规划与建设领域中其他需要通过方案评估进行决策参考的应用场合提供了有益的借鉴。

#### 参考文献

[1] 刘楠,唐晓骏,张文朝,等.特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(2):131-136.  
LIU Nan, TANG Xiaojun, ZHAO Wenchao, et al. Study on electromagnetic ring opening in Henan province under ultra-high voltage power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 29(2): 131-136.

[2] GRANELLI G, MONTAGNA M, ZANELLINI F, et al. A genetic algorithm-based procedure to optimize system

topology against parallel flows[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 333-340.

[3] 白宏坤,李干生.郑州220 kV电磁环网解环规划研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(7):127-132.  
BAI Hongkun, LI Gansheng. Study on open-loop planning of 220 kV electromagnetic ring in Zhengzhou[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 127-132.

[4] 周专,姚秀萍,王维庆,等.基于多电磁环网的功率转移研究与分析[J].电力系统保护与控制,2013,41(22):134-140.  
ZHOU Zhuan, YAO Xiuping, WANG Weiqing, et al. Research and analysis of power transfer based on multiple electromagnetic looped network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 134-140.

[5] 孙艳,凌武能,李如琦,等.采用分布系数和相角匹配分析的电磁环网潮流监控形式[J].电力系统保护与控制,2015,43(17):22-28.  
SUN Yan, LING Wuneng, LI Ruqi, et al. Power flow control of electromagnetic loop network based on distribution coefficient and phase angle matching analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 22-28.

[6] 李刚,孙焜,李大虎.600 MW级机组接入220 kV电网适应性分析[J].电网与清洁能源,2014,30(10):20-25.  
LI Gang, SUN Kun, LI Dahu. The adaptability analysis for 600 MW generator units connected to 220 kV electric power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(10): 20-25.

[7] 电力行业电网运行与控制标准化技术委员会. DL755-2001电力系统安全稳定导则[S].北京:中国电力出版社,2001.

[8] 叶华,刘玉田,牛新生.500 kV-220 kV电磁环网开环方案模糊综合评价[J].电力自动化设备,2006,26(7):1-5.  
YE Hua, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Fuzzy comprehensive evaluation of opening schemes for 500 kV-220 kV electromagnetic loop[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 1-5.

[9] 张占安.东北电网省间电磁环网解环的研究[D].吉林:东北电力大学,2009.

[10] 李春红,张东妮.电网规划方案比较评价[J].技术经济,2011,30(4):77-80.  
LI Chunhong, ZHANG Dongni. Technical and economic evaluation on power grid planning[J]. Technology Economics, 2011, 30(4): 77-80.

[11] 徐玖平,吴巍.多属性决策的理论与方法[M].北京:清华大学出版社,2006.

- [12] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [13] 元继学, 王未今. 模糊多属性群决策一致性分析研究[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(1): 126-130.  
YUAN Jixue, WANG Weijin. A study of consensus analysis in fuzzy multi-attribute group decision making[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(1): 126-130.
- [14] 牟琼, 杨春德. 一种基于梯形模糊数互补判断矩阵确定权重的方法[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2006, 18(6): 809-811.  
MU Qiong, YANG Chunde. Method of determining weights based on complementary judgement matrix with trapezium fuzzy numbers[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2006, 18(6): 809-811.
- [15] 潘炜, 刘文颖, 杨以涵, 等. 电磁环网条件下西北 750 kV 电网运行方式的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 33-38.  
PAN Wei, LIU Wenyong, YANG Yihan, et al. Research on operating modes of 750 kV Northwest China power grid electro-magnetically coupled with 330 kV power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 33-38.
- [16] 郝文斌, 夏春, 王彪, 等. 一种基于图论搜索的限制短路电流分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 38-44.  
HAO Wenbin, XIA Chun, WANG Biao, et al. A short-circuit current limiting partitioning method based on graph theory search[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 38-44.
- [17] 侯俊贤, 韩民晓, 董毅峰, 等. 基于子网络收缩的输电断面搜索方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 92-97.  
HOU Junxian, HAN Minxiao, DONG Yifeng, et al. Transmission section searching method based on power system sub-network combination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 92-97.
- [18] 董曼玲, 丁国君, 董丽洁, 等. 220 kV 电磁环网开环点断路器雷击故障分析及防护措施研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 56-66.  
DONG Manling, DING Guojun, DONG Lijie, et al. Research on circuit-breaker lightning failure of open-ring point in 220 kV electromagnetic loop network[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 56-66.
- [19] 刘明松, 张健, 张文朝. 弱电磁环网运行控制若干问题及对策[J]. 电力系统自动化, 2014, 39(4): 109-114.  
LIU Mingsong, ZHANG Jian, ZHANG Wenchao. Problems and countermeasures for operation and control of weak electro magnetic loops[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 39(4): 109-114.
- [20] 钟慧荣. 电力系统黑启动与网架重构技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [21] YAGER R R. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval[J]. Information Sciences, 1981, 24(2): 143-161.
- [22] 侯福均, 吴祈宗. 混合互补判断矩阵一致性研究[J]. 数学的实践与认识, 2005, 35(4): 46-55.  
HOU Fujun, WU Qizong. Study on consistency of hybrid complementary judgment matrix[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2005, 35(4): 46-55.

收稿日期: 2015-06-11; 修回日期: 2015-10-12

#### 作者简介:

韩子娇(1988-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统调度自动化;

李正文(1980-), 男, 工程师, 主要从事电网安全稳定计算和无功电压管理工作;

赵鹏(1983-), 男, 工程师, 从事电网调度运行工作。

(编辑 张爱琴)