

DOI: 10.7667/PSPC170830

# 基于改进 TOPSIS 法和德尔菲—熵权综合权重法的 电网规划方案综合决策方法

朱天瞳<sup>1</sup>, 丁坚勇<sup>1</sup>, 郑旭<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国家电网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 针对目前电网规划方案综合决策问题中客观数据利用不充分和权重分配不合理的问题, 提出一种基于改进 TOPSIS 法和德尔菲—熵权综合权重法相结合的电网规划方案综合决策方法。首先, 根据电网规划的发展特点和基本属性, 构建了考虑安全、效益、成本和适应性的电网规划 SECA 综合评价指标体系。其次, 应用博弈论模型得到德尔菲—熵权综合权重计算方法。然后, 引入绝对理想点以及投影法对 TOPSIS 法进行改进, 并采用改进 TOPSIS—德尔菲—熵权组合评价进行电网规划方案评估。最后, 利用实际算例验证了该方法的有效性。TOPSIS 法与综合权重法相结合充分利用了客观数据全部信息, 并且同时具备了 TOPSIS 法简单实用、可操作性强以及综合权重法主客观均衡的优势。

**关键词:** 电网规划; TOPSIS 法; 德尔菲法; 熵权法; 博弈论; 综合决策

## A comprehensive decision-making method for power network planning schemes based on the combination of the improved TOPSIS method with Delphi-entropy weight method

ZHU Tiantong<sup>1</sup>, DING Jianyong<sup>1</sup>, ZHENG Xu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Company Economic Technology Institute, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** In allusion to insufficient use of objective data and unreasonable weight assignment in present comprehensive decision-making of power network planning schemes, based on the combination of the improved TOPSIS method with Delphi-entropy weight comprehensive weight calculation method, a comprehensive decision-making method for power network planning schemes is proposed. Firstly, according to the development features and basic attributions of power network planning, a SECA power network planning comprehensive evaluation index system which is based on safety, effectiveness, cost and adaptability is established. Secondly, the Delphi-entropy weight comprehensive weight calculation method based on the game theory model. Then based on absolute ideal points theory and close-degree projection, TOPSIS method is improved. A combinational evaluation method based on improved TOPSIS-Delphi-entropy weight is used to evaluate power network planning schemes. The validity of the proposed method is verified by calculation results of actual case. The method based on the combination of TOPSIS method with the comprehensive weight calculation method can make full use of objective data. It has the advantages of simplicity, practicality and maneuverability, and the weight of this method is reasonable.

This work is supported by Science and Technology of State Grid Hubei Electric Power Company (No. 521538130212).

**Key words:** power network planning; TOPSIS method; Delphi method; entropy weight method; game theory; comprehensive decision-making

## 0 引言

电网规划方案决策是一个包括建立评价体系、

使用合理的评价方法对待选方案进行评价和排序、选择最优规划方案的过程<sup>[1]</sup>。近年来, 随着我国电力体制改革不断深入, 社会对电力系统安全性、适应性及环境保护的要求日益提高。电网规划方案决策的重要问题之一是平衡电网安全性、经济性、节

能环保和适应性之间的矛盾，具体表现为：一方面电力公司的企业属性决定了其追求电网成本最低、效益最高的特征；另一方面新的电力市场环境要求电网具有足够的安全性和适应性。SECA 综合评价指标体系通过对电网的安全、成本、效益及其适应性指标的综合评价可以有效地解决这一问题。

目前电网规划评估方法主要有层次分析法和数据包络法，这两种方法都具有较为明显的缺陷。电网规划方案综合决策中的另一个重要问题层次分析法权重主观性过强，并且不能充分利用客观数据所提供的信息。文献[2]提出了一种基于区间层次分析法的电网规划综合决策方法，将传统的层次分析法与区间数学结合，合理地处理了决策因素的不确定性和专家判断的模糊性，但还是未能解决专家评判主观性过强的问题。文献[3]在区间层次分析法的基础上，提出新的区间数权重求解方法，将区间判断矩阵权重求解转换为线性规划问题，提高了计算效率与精度，但在形成判断矩阵过程中还是依靠专家打分，主观性较强。文献[4]提出了一种基于三角模糊数的模糊层次分析法，改善了点值打分缺乏弹性的问题，在一定程度上降低了专家个人偏好对打分的影响。数据包络法是一种客观的评价工具，其利用线性规划的方法，对类型相同的多投入、多产出决策单元进行相对有效性评估。文献[5]将数据包络分析应用于电网规划方案综合决策，根据综合产出与综合投入的比率值对电网规划方案进行比选，具有一定实用价值。文献[6]在文献[5]的基础上通过引入交叉概率模型对数据包络法进行改进，进一步提升了评价结果的合理性。但是文献[5-6]都未能解决数据包络法只受输入和输出指标影响，忽略了决策者意见以及各指标的重要程度等实际因素的影响。为了避免层次分析法和数据包络法的不足，本文引入理想点排序法(the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)对电网规划方案进行综合决策。目前国内对于 TOPSIS 法的研究有了一定的成果：文献[7]利用该方法对电网智能改造程度进行评估；文献[8]采用 TOPSIS 法对电网运行规划分负荷方案进行评估；文献[9]将该方法应用到智能配电网综合评价中；文献[10]利用该方法对光伏并网接入方式进行全面评估。

本文提出一种新的电网规划综合决策方法，在构建 SECA 综合评价指标体系的基础上，提出主客观相结合的德尔菲—熵权综合权重分析法，根据 SECA 综合评价指标体系中指标的特点，形成改进 TOPSIS 法—德尔菲—熵权综合评价计算模型。

### 1 SECA 综合评价指标体系

考虑到电网在投资、建设、运行、检修直至报废各个阶段的特点，根据评价指标尽可能全面、不重叠和易于取得的原则<sup>[5]</sup>，将电网规划方案综合评价指标体系分为安全指标、效益指标、成本指标和适应性指标四个一级指标以及若干二、三级指标。如图 1 所示。

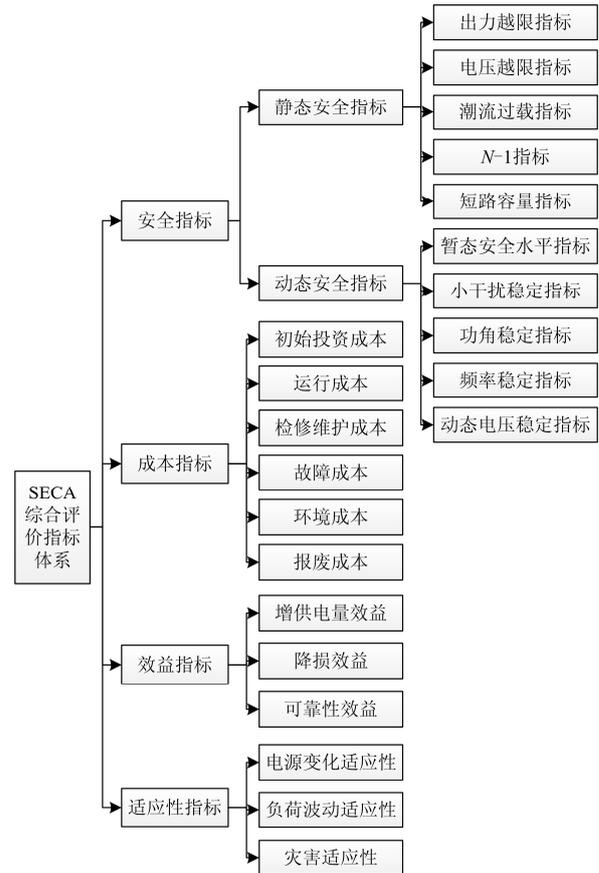


图 1 SECA 综合评价指标集

Fig. 1 SECA comprehensive evaluation index set

安全指标反映了规划电网在运行中避免发生故障的能力以及故障发生后保证对负荷持续供电的能力<sup>[11]</sup>。安全是电力系统的基础，对于安全的基本要求，在决策中实行“一票否决”制度，即任意一项安全指标无法满足，都应使电网规划方案评价结论为不合格。安全指标为强制性的定性指标，用来说明电网规划方案是否符合安全标准。

效益指标指电网规划方案实施后，因电网承担更多的负荷、网损下降以及可靠性提高而给电力公司带来的收益。效益指标为定量指标，其二级指标的具体计算方法见式(1)。

$$\begin{cases} EP = (P_A - P_B) \times T_{\max} \times R_G \\ EL = (L_B - L_A) \times \tau_{\max} \times R_G \\ ER = (EENS_B - EENS_A) \times R_G \end{cases} \quad (1)$$

式中: EP 为增供电量效益; EL 为降损效益; ER 为可靠性效益;  $P_A$  为项目实施后新电网的供电能力;  $P_B$  为项目实施前, 原电网的供电能力;  $T_{\max}$  为最大负荷利用小时数;  $R_G$  为某地区的产电比;  $L_B$  为原电网的网损;  $L_A$  为新电网的网损;  $\tau_{\max}$  为最大负荷损耗小时数;  $EENS_A$  为方案实施后新电网的电力系统可靠性指标不足期望值;  $EENS_B$  为原电网的电力系统可靠性指标不足期望值。

成本指标是指电网的全寿命周期成本指标<sup>[12]</sup>, 其反映了电网整个寿命周期内从初始投资到项目实施后的运行、检修维护、故障和报废处置等阶段所有成本的总和。成本指标为定量指标, 其二级指标的具体计算方法见式(2)。

$$\begin{cases} CI = CI_{\text{station}} + CI_{\text{line}} + CI_{\text{tr}} \\ CO = CO_1 + CO_2 \\ CM = CI \times \alpha \\ CF = EENS \times c_{\text{price}} \\ CD = CI \times k \\ CE = CE_1 + CE_2 + CE_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: CI 为初始投资成本; CO 为运行成本; CM 为检修维护成本; CF 为故障成本; CD 为报废成本; CE 为环境成本;  $CI_{\text{station}}$  表示新增变电站投资成本;  $CI_{\text{line}}$  表示新增线路投资成本;  $CI_{\text{tr}}$  表示技改投资;  $CO_1$  表示设备能耗费;  $CO_2$  表示日常运行维护费用;  $\alpha$  为检修维护系数, 与时间的函数关系为浴盆曲线关系; EENS 为电力系统可靠性指标不足期望值;  $c_{\text{price}}$  为单位电量停电损失, 按现行平均电价的 25 倍数估计; 报废成本可以取为初始投资成本的  $k$  倍;  $CE_1$  为电磁辐射成本;  $CE_2$  为噪声污染成本;  $CE_3$  为  $SF_6$  泄露成本。

电网适应性指标反映电网规划方案对外部各类因素的适应能力, 例如电源规划的变更、负荷预测的不确定性、电网协调性等因素。适应性指标为定性指标, 可通过选取评价集来进行描述, 将其转变为定量指标。本文选取评价集 {1,2,3,4,5,6} 分别代表很差、较差、稍差、稍好、较好、很好 6 个等级, 通过向相关领域专家征询来确定各方案的适应性等级, 进而转变成定量指标进行综合评价。

SECA 综合评价指标体系提出将安全性作为一个独立的一级指标, 同时还将提升安全性的效果体现在成本、效益和适应性指标中, 例如减少停电使

故障成本减小, 可靠性效益增加。将安全性与经济性、适应性融合在一起, 平衡了它们之间的矛盾。相较于传统的电网规划方案评价体系, 实现了规划方案安全性、经济性与适应性的协调。

## 2 德尔菲—熵权综合权重计算

由于 SECA 综合评价指标体系中各评价指标的作用、重要程度不尽相同, 当衡量各指标对总体的贡献大小时, 必须对每个指标合理赋权<sup>[13]</sup>。

### 2.1 德尔菲法

德尔菲法<sup>[14]</sup>是一种主观的专家意见评价方法, 既可以将专家的个人偏好造成的片面性降低, 还可以体现出专家间的意见分歧。本文采用德尔菲法, 利用专家的知识、经验和个人观点对 SECA 综合评价指标体系中各指标赋权。采用专家意见的一致性作为确定指标权重的标准。

假设所参加评判的专家数为  $m$ , 则可将其表示为专家集  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ ;  $h_i$  表示第  $i$  个专家, 其给出的  $n$  个指标的权重分配意见为  $A_i = (a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n})$ , 并满足  $\sum_{j=1}^n a_{i,j} = 1$ 。德尔菲法的具体计算步骤如下所述。

#### 1) 计算专家意见集中度

根据本领域专家给出各指标权重  $a_{i,j}$  和参与专家人数  $m$  计算得到各权重的期望值  $E$ 。

$$e_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{i,j} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中:  $e_j$  是第  $j$  个指标的权重期望值; 权重期望值向量  $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ 。

#### 2) 计算专家意见一致性

若专家意见一致性较差, 则通过式(3)对专家意见进行加权后得到的权重期望值有可能违背所有专家的想法。因此采用 Kendall 一致性检验法对专家意见进行一致性检验, 过程如下。

对于  $\forall h_{ki} \in H$ , 其所给的权向量为  $A_{ki} = (a_{ki,1}, a_{ki,2}, \dots, a_{ki,n})$ , 构造对应的排序号向量:

$$R_{ki} = (r_{ki,1}, r_{ki,2}, \dots, r_{ki,n}) \quad (4)$$

式中,  $r_{ki,j} (1 \leq j \leq n)$  为相应的  $a_{ki,j}$  在  $A_{ki}$  中的排序号。具体的取值方法为: 当  $a_{ki,j}$  为  $A_{ki}$  中所有维分量最小值时, 令  $r_{ki,j} = 1$ ; 当  $a_{ki,j}$  为  $A_{ki}$  中所有维分量次小值时, 令  $r_{ki,j} = 2$ ; 以此类推可得对应的排序号向量取值。

专家意见的一致性可以用 Kendall 协和系数表示。

$$\text{Kendall}(H) = \frac{12 \left[ \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m r_{ki,j} \right)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m r_{ki,j} \right)^2 \right]}{m^2 (n^3 - n)} \quad (5)$$

3) 判断是否需要重新征询  
根据《Kendall 协和系数显著性临界值表》(表 1), 检查 Kendall( $H$ )是否达到显著性水平。若 Kendall( $H$ )大于表内临界值  $L$ , 则 Kendall( $H$ )达到显

著性水平, 认为专家意见一致性较强, 输出权重期望值  $E$ , 否则需要重新向专家征询各指标权重, 直至 Kendall( $H$ )大于表内临界值  $L$  为止。

表 1 Kendall 协和系数显著性临界值表  
Table 1 Kendall coefficient critical value table

专家个数 $m$	待评价指标数 $n$				
	3	4	5	6	7
显著性水平 $\alpha=0.05$					
3	—	—	0.715 6	0.659 7	0.624 2
4	—	0.618 8	0.552 5	0.511 8	0.484 4
5	—	0.500 8	0.449 2	0.416 9	0.394 6
6	—	0.420 6	0.378 1	0.351 4	0.332 5
8	0.375 8	0.317 8	0.287 0	0.267 0	0.252 8

## 2.2 熵权法

熵权法是一种根据各指标所含信息量确定指标权重的客观赋权法<sup>[15-17]</sup>。SECA 综合评价指标体系中各指标涵盖了大量的数据信息, 熵权法可以充分利用这些信息, 使各指标的权重值完全客观。

### 1) 构建指标矩阵

假设对  $m$  个方案进行评价, 包含  $n$  个评价指标, 方案  $i$  的第  $j$  个指标的指标值为  $d_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ , 由各方案的指标值组成指标矩阵  $D=(d_{ij})_{m \times n}$ 。

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2) 指标矩阵标准化

各评价指标之间由于性质、单位、量级存在一定差别, 需要进行归一化处理, 得到无量纲的标准化矩阵  $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 。

$$\begin{cases} x_{ij} = \frac{|d_j^0 - d_{ij}|}{d_{jm} - d_{jm}} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \\ d_{jm} = \max(d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{mj}) \\ d_{jm} = \min(d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{mj}) \\ d_j^0 = \begin{cases} d_{jm}, d_j \text{ 为正指标时, 即指标越大, 方案越优} \\ d_{jm}, d_j \text{ 为负指标时, 即指标越小, 方案越优} \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

### 3) 指标权重确定

根据熵的定义, 计算第  $j$  项指标的熵值  $b_j$  为

$$b_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m q_{ij} \ln q_{ij} \quad (8)$$

$$q_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (9)$$

式中,  $q_{ij}$  表示第  $j$  项指标下第  $i$  种方案的比重, 则

第  $j$  项指标的权值为式(10)。

$$c_j = (1 - b_j) / \sum_{j=1}^n (1 - b_j) \quad (10)$$

指标权重列向量为

$$C=(c_1, c_2, \dots, c_n)^T \quad (11)$$

式中,  $c_i$  表示第  $i$  项指标的权重。

## 2.3 基于博弈论的德尔菲—熵权综合权重法

主观赋权法德尔菲法和客观赋权法熵权法各有利弊, 将两种方法相结合, 使权重不仅包含数据本身信息, 还能体现出专家的主观判断。目前可采用的综合赋权法只是对主客观赋权法的结果进行加权平均, 其合理性较差<sup>[18-20]</sup>。因此以 NASH 均衡作为协调目标将博弈论引入到综合评价, 提出基于博弈论的综合权重法, 其基本思想为用博弈论模型在不同权重之间寻找一致或妥协, 使可能的权重与各基本权重之间偏差最小<sup>[21-22]</sup>, 最终得到一个较均衡的综合权重。

使用  $l$  种方法对综合评价指标体系中的各指标进行权重确定, 由此构造一个基本权重集  $u = \{u_1, u_2, \dots, u_l\}$ , 将其中的  $l$  个向量任意线性组合就构造了一个综合权重集:

$$u = \sum_{k=1}^l g_k u_k^T (g_k > 0) \quad (12)$$

为从综合权重集中找到最满意的权重  $u^*$ , 使用博弈论模型, 对式(12)中  $l$  个线性组合系数  $g_k$  进行优化, 优化的目标是使  $u$  与各个  $u_k$  的离差极小化。因此, 可导出如下对策模型:

$$\min \left\| \sum_{j=1}^l g_j u_j^T - u_i \right\|_2 (i=1, 2, \dots, l) \quad (13)$$

该对策模型的本质是将多个权重向量交叉组合的规划模型, 根据矩阵的微分性质, 得出式(13)最优化一阶导数条件为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^T & \cdots & \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^T \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{u}_l \mathbf{u}_1^T & \cdots & \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^T \\ \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

计算可得 \$(g\_1, g\_2, \dots, g\_l)\$, 然后再对其归一化处理:

$$g_k^* = g_k / \sum_{k=1}^l g_k \quad (15)$$

因此, 求得综合权重为

$$\mathbf{u}^* = \sum_{k=1}^l g_k^* \cdot \mathbf{u}_k^T \quad (16)$$

采用德尔菲法和熵权法计算各指标权重, 构成基本权重集, 运用基于博弈论的综合权重法将两者结合, 得到更均衡的综合权重。

### 3 改进 TOPSIS—德尔菲—熵权组合评价计算模型

SECA 综合评价指标体系中的安全、成本、效益、适应性指标数据信息量大。传统层次分析法和数据包络法计算过程复杂且不能充分利用这些客观数据, 因此引入理想点排序法(TOPSIS)来进行评价计算。TOPSIS 法的基本思想: 计算现实中的每个方案距离最佳方案和最差方案的距离, 利用理想解的相对接近度作为综合评估的标准<sup>[23]</sup>。研究表明, 传统的 TOPSIS 法在理想方案的选取和距离计算上存在不足, 可能导致待选方案出现逆排序或因距离计算不准确而不能得到最佳方案。因此, 将 TOPSIS 法进行改进, 引入了绝对理想点以及投影法<sup>[24]</sup>。提出改进 TOPSIS—德尔菲—熵权组合评价计算模型, 用德尔菲—熵权综合权重计算法替代传统 TOPSIS 法的专家经验赋权法, 以减小赋权误差, 提高计算精度。计算步骤如下所述。

- 1) 假设有 \$m\$ 个评价方案, \$n\$ 个评价指标, 构造标准化决策矩阵 \$\mathbf{X}=(x\_{ij})\_{m \times n}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)\$。
- 2) 利用德尔菲—熵权综合权重计算方法确定指标 \$i\$ 权重为 \$c\_i\$, 对应的权重矩阵为 \$\mathbf{C}=\text{diag}(c\_1, c\_2, \dots, c\_n)\$。
- 3) 确定加权判断矩阵。

$$\mathbf{V} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{C} = (\mathbf{v}_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

- 4) 确定正、负理想方案向量。

传统 TOPSIS 法中, 正、负理想方案的选择是相对的, 当待评价方案数量发生变化时, 可能导致理想方案变化, 引起逆排序问题。因此引入绝对理

想点, 将正理想方案固定为 \$\mathbf{V}^+ = (1, 1, \dots, 1)\_n^T\$, 负理想方案固定为 \$\mathbf{V}^- = (0, 0, \dots, 0)\_n^T\$。

- 5) 计算贴近度。

从几何视角看, 每个待选方案可以看成是一个空间向量, 将正、负理想方案的连线作为参照向量。待选方案向量与参照向量越接近则待选方案越优。将待选方案向量在参照向量上的投影作为贴近度, 可反映向量之间的接近程度, 计算公式如式(18)所示。

$$P_{V^+}(\mathbf{v}_i) = \sum_{j=1}^n V_j^+ v_{ij} / \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_j^+)^2} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (18)$$

式中: \$\mathbf{V}\_j^+ = (1, 1, \dots, 1)\_n^T\$ 表示正理想方案向量, 即为参照向量; \$\mathbf{v}\_i = (v\_{i1}, v\_{i2}, \dots, v\_{in})^T\$ 表示第 \$i\$ 个待评估方案向量; \$v\_{ij}\$ 表示第 \$i\$ 个待评估方案第 \$j\$ 个指标的值; \$P\_{V^+}(\mathbf{v}\_i)\$ 为贴近度, 其值越大, 表明方案 \$\mathbf{v}\_i\$ 越接近正理想方案而远离负理想方案, 说明方案越优。

改进 TOPSIS—德尔菲—熵权组合评价计算模型整体计算步骤流程图如图 2 所示。

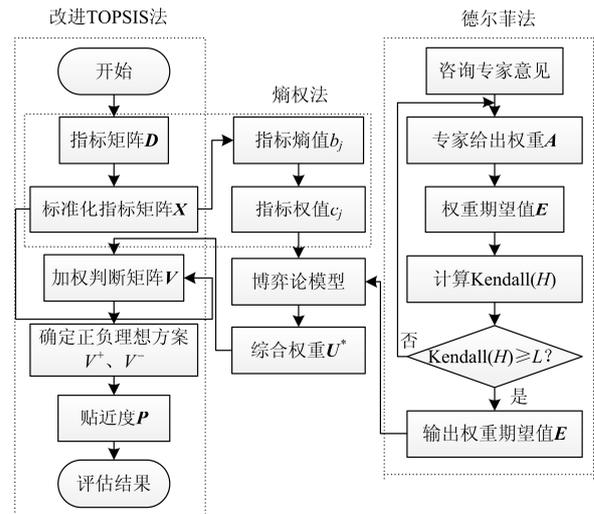


图 2 改进 TOPSIS—德尔菲—熵权组合评价计算模型整体流程图

Fig. 2 Whole flow chart of improved TOPSIS-Delphi-entropy weight evaluation model

### 4 算例分析

选取某地区 220 kV 输电网规划方案作为研究对象, 规划前的电网接线图如图 3 所示。6(7)、9(10)和 15(16)变电站电压为 500 kV, 其余变电站电压为 220 kV。其中变电站 11 容量为 420 MVA。变电站 9—变电站 11 的双回线路距离为 23 km。计算中取线路成本为 140 万元/km, 变电站成本为 32 万元/MVA;

购电价取 0.409 元/kWh, 售电价取 0.655 元/kWh; 最大负荷利用小时数以及最大负荷损耗小时数分别取 4 300 h 与 3 200 h。

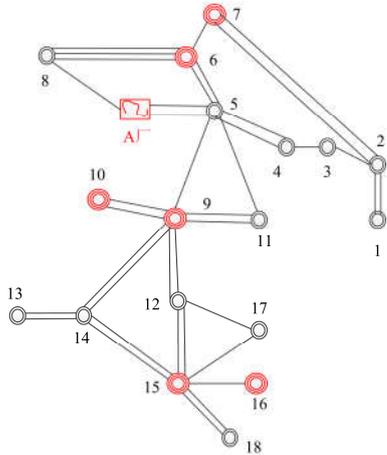


图 3 原电网网络结构

Fig. 3 Network structure of original grid

根据电网规划年份内的负荷分布、数量大小及供电距离并结合类似工程实例拟定了三个待选方案。

方案一：新建变电站 19,  $\pi$  接到变电站 9-变电站 12 双回线路中, 变电站 19 至  $\pi$  接点距离为 1.8 km, 其容量为 480 MVA; 变电站 19 和变电站 11 之间新建一回线路, 距离为 10.5 km。

方案二：新建变电站 19,  $\pi$  接到变电站 9-变电站 12 双回线路中, 变电站 19 至  $\pi$  接点距离为 1.8 km, 其容量为 480 MVA; 19 和 11 变电站之间无输电回路。

方案三：新建变电站 19,  $\pi$  接到变电站 9-变电站 12 双回线路中, 变电站 19 至  $\pi$  接点距离为 1.8 km, 其容量为 480 MVA; 19 和 11 变电站之间新建两回线路, 距离为 10.5 km。

通过经济技术比选, 实际工程最终确定方案一为最优方案。三个待选方案的网络结构图见图 4—图 6。

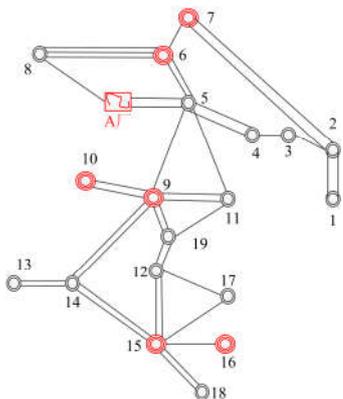


图 4 方案一结构图

Fig. 4 Network structure of plan 1

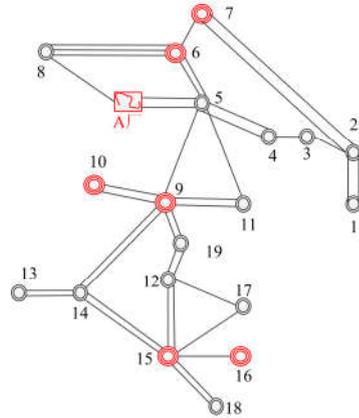


图 5 方案二结构图

Fig. 5 Network structure of plan 2

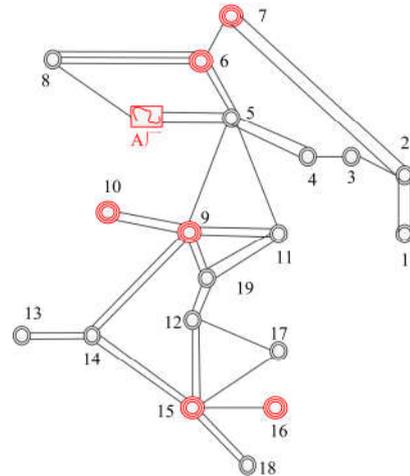


图 6 方案三结构图

Fig. 6 Network structure of plan 3

本文在构建 SECA 综合评价指标体系的基础上, 采用改进 TOPSIS—德尔菲—熵权组合评价方法对三个待选方案进行综合评估并对结果进行分析。

1) 建立 SECA 综合评价指标体系, 计算其中各指标值, 见表 2。

表 2 SECA 体系中各指标值

Table 2 Index value of SECA system

指标	E	C	A
方案一	22 151.6	2 790.1	4
方案二	21 986.7	2 776.1	3
方案三	22 164.6	2 956.1	6

因为安全指标 S 为定性指标, 故未在表格中注明其数值。通过采用电力系统综合程序软件(PSASP)验证得出 3 个方案的安全指标都满足相关的标准。

2) 采用德尔菲—熵权综合权重计算法求取各

指标权重值。

在利用德尔菲法给指标赋权时, 有 8 位专家参与, 每位专家根据其知识和经验给各指标赋权, 再根据式(3)一式(5)计算得到主观权重向量  $C_1=[0.4, 0.4, 0.2]$ 。

依照表 2 中的数据, 根据式(6)一式(11)计算得到熵权法确定的客观权重向量  $C_2=[0.3, 0.3, 0.4]$ 。

利用博弈论模型求得主、客观权重的纳什均衡解, 如图 7 所示。

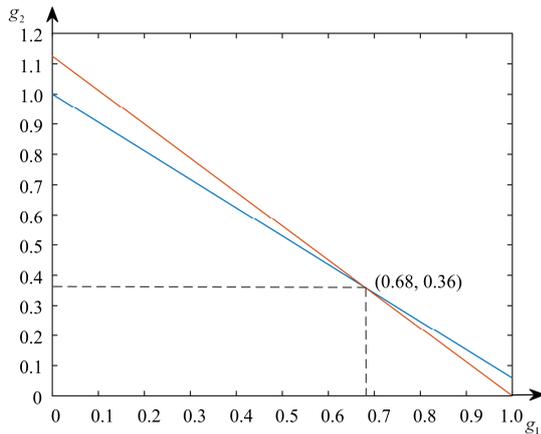


图 7 NASH 均衡点

Fig. 7 NASH equilibrium point

解得  $g_1=0.68$ ,  $g_2=0.36$ , 归一化后  $g_1^*=0.65$ ,  $g_2^*=0.35$ , 根据式(16)得到各指标的综合权重, 结果如表 3 所示。

表 3 各指标权重值

Table 3 Weight value of each index

指标	E	C	A
权重	0.365	0.365	0.27

3) 使用改进 TOPSIS 法对各方案进行评估并与其他方法进行对比。

根据式(18)计算三个电网规划方案的基于投影法贴度为  $P=[0.4416 \ 0.2107 \ 0.3666]$ , 对应的贴度示意图如图 8 所示。

根据表 2 中的数据, 运用模糊层次分析法、超高效数据包络法(SE-DEA)对三个电网规划待选方案进行综合评价, 并将其评价结果与改进 TOPSIS 法的评价结果对比见表 4。

利用本文提出的改进 TOPSIS 法计算得出, 方案一较其他两个方案有较明显的优势, 方案三为次好方案, 方案二最差。因此根据改进 TOPSIS 法对该地区电网规划方案进行综合决策, 最终推荐采用方案一, 且实际工程中也将方案一作为首选方案。

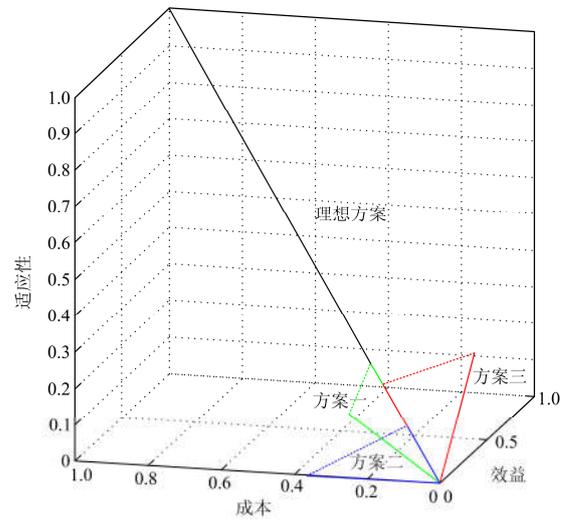


图 8 贴度示意图

Fig. 8 Sketch map of nearness degree

表 4 三个方法的综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation results of three methods

方法	方案一	方案二	方案三
SE-DEA 法	1.079 5	1.086 5	1.534 2
模糊层次分析法	0.377 3	0.331 3	0.290 9
改进 TOPSIS 法	0.441 6	0.210 7	0.366 6

模糊层次分析法的评价结果为方案一最优, 方案二次优, 方案三最差。其评价结果与改进 TOPSIS 法略有不同, 原因是模糊层次分析法确定指标权重时受决策者主观偏好影响, 存在一定的不确定因素。由模糊层次分析法确定的各指标权重为  $C_3=[0.3 \ 0.6 \ 0.1]$ , 相较于德尔菲—熵权综合权重法确定的权重  $C=[0.365 \ 0.365 \ 0.27]$ , 其适应性指标权重过低, 成本指标权重过高。说明专家更重视项目的初始投资, 而忽略了电网建设完毕后的适应性, 这种判断不尽合理。

SE-DEA 法的评价结果为: 方案三最优, 方案二次优, 方案一最差。其结果与实际电网规划方案选择有较大差异。DEA 法虽是一种无需考虑指标权重的客观方法, 但由于输入与输出指标联系性不大, 不能完全体现各方案的优势性。另外, 完全忽视了决策者在电网规划中的重要性, 无法与实际情况相联系, 可能会导致评价结果出现偏差。

## 5 结论

本文针对电网规划的特点, 提出了一套 SECA 综合评价指标体系, 涵盖的指标能综合反映电网规划方案的安全性、经济性、可靠性以及适应性, 多角度地综合评价电网规划方案的整体性能, 打破了

传统电网规划方法经济评价与技术校验割裂的局限。

根据 SECA 综合评价指标体系的数据特点,采用改进 TOPSIS 法进行多指标多目标评估分析,发挥了 TOPSIS 法在多指标多目标分析中能充分利用客观数据的优势,同时采用基于博弈论的德尔菲—熵权综合权重法来代替原始 TOPSIS 法使用的专家赋权法,提高了指标赋权的合理性,使评价结果更加科学和客观。通过在实际电网规划方案比选中的应用,表明所提指标体系与评价方法具有工程实用性,可为电网规划方案综合决策提供参考。

目前国内外提出的安全指标量化方法尚不能应用于实际工程,下一步 SECA 综合评价中,需要进一步研究安全指标简单有效的量化和计算方法。

### 参考文献

- [1] 高山,王深哲,李海峰,等.基于前景理论的电网规划方案综合决策方法[J].电网技术,2014,38(8):2029-2036.  
GAO Shan, WANG Shenzhe, LI Haifeng, et al. Prospect theory based on comprehensive decision-making method of power network planning schemes[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2029-2036.
- [2] 肖峻,王成山,周敏.基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J].中国电机工程学报,2004,24(4):50-57.  
XIAO Jun, WANG Chengshan, ZHOU Min. An IAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57.
- [3] 范利国,牛东晓.基于区间层次分析法的输电网规划综合评价决策[J].继电器,2007,35(12):47-51.  
FAN Ligu, NIU Dongxiao. An IAHP-based MADM method in transmission network planning[J]. Relay, 2007, 35(12): 47-51.
- [4] 陈大宇,肖峻,王成山.基于模糊层次分析法的城市电网规划决策综合评判[J].东北电力技术,2003(9):5-9.  
CHEN Dayu, XIAO Jun, WANG Chengshan. Comprehensive judgment of policy-making for urban power network based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Northeast Electric Power Technology, 2003(9): 5-9.
- [5] 韦钢,吴伟力,刘佳,等.基于SE-DEA模型的电网规划方案综合决策体系[J].电网技术,2007,31(24):12-16.  
WEI Gang, WU Weili, LIU Jia, et al. Comprehensive judgment for power system Planning alternatives based on SE-DEA model[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 12-16.
- [6] 高庆敏,张乾业.基于SE-DEA的交叉效率模型的城  
市电网规划综合评判决策[J].电力系统保护与控制,2011,39(8):60-64.  
GAO Qingmin, ZHANG Qianye. Comprehensive evaluation and decision-making for urban power system planning using a cross efficiency model based on SE-DEA[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 60-64.
- [7] 胡元潮,阮江军,杜志叶,等.基于TOPSIS法的变电站一次设备智能化评估[J].电力自动化设备,2012,32(12):22-27.  
HU Yuanchao, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Evaluation of substation primary equipment intellectualization based on TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 22-27.
- [8] 李兆伟,刘福锁,李威,等.基于TOPSIS法考虑电力安全事故风险的运行规划分负荷方案优化[J].电力系统保护与控制,2013,41(21):71-77.  
LI Zhaowei, LIU Fusuo, LI Wei, et al. Optimization of operating and planning load dispatching scheme considering the risk of electrical safety incidents based on TOPSIS method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 71-77.
- [9] 赵凤展,王佳慧,卫泽晨,等.利用改进G1-TOPSIS法的智能配电网层次化评价[J].电网技术,2016,40(10):3169-3175.  
ZHAO Fengzhan, WANG Jiahui, WEI Zechen, et al. Hierarchical evaluation of smart distribution grid based on improved G1-TOPSIS method[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3169-3175.
- [10] 陈力,胡钊,卫敬宜,等.一种新的光伏并网评价体系[J].电力系统保护与控制,2017,45(2):105-110.  
CHEN Li, HU Po, WEI Jingyi, et al. A new evaluation system of grid-integrated PV generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 105-110.
- [11] 吴际瞬.电力系统静态安全分析[M].上海:上海交通大学出版社,1985:1-6.
- [12] 梁唐杰,谢庆,柳春芳,等.基于全寿命周期理论和云物元理论的配电网规划综合效益的评估[J].电力系统保护与控制,2017,45(19):12-17.  
LIANG Tangjie, XIE Qing, LIU Chunfang, et al. Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the life cycle cost theory and the cloud matter element theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 12-17.
- [13] 罗毅,李昱龙.基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J].电网技术,2013,37(1):77-81.  
LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission on network planning based on entropy

- weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- [14] 陈坚红, 盛德仁, 李蔚, 等. 火电厂工程多目标综合评价模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 152-155.  
CHEN Jianhong, SHENG Deren, LI Wei, et al. A model of multi-objective comprehensive evaluation for power plant projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 152-155.
- [15] 马纪, 刘希喆. 基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 87-93.  
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 87-93.
- [16] 肖淳, 邵东国, 杨丰顺. 基于改进 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(3): 329-334.  
XIAO Chun, SHAO Dongguo, YANG Fengshun. A model of initial water rights allocation in watershed based on improved TOPSIS method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(3): 329-334.
- [17] 李慧伶, 王修贵, 崔远来, 等. 灌区运行状况综合评价的方法研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 543-548.  
LI Huiling, WANG Xiugui, CUI Yuanlai, et al. Comprehensive evaluation methods for irrigation district[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 543-548.
- [18] 郭腾云, 刘艳. 基于博弈方法的含分布式电源配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 28-34.  
GUO Tengyun, LIU Yan. Game theory based reconfiguration optimization for distribution network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (7): 28-34.
- [19] 李彦斌, 于心怡, 王致杰. 采用灰色关联度与 TOPSIS 法的光伏发电项目风险评价研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1514-1519.  
LI Yanbin, YU Xinyi, WANG Zhijie. Risk assessment on photovoltaic power generation project by grey correlation analysis and TOPSIS method[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1514-1519.
- [20] 陆伟锋, 唐厚兴. 关于多属性决策 TOPSIS 方法的一种综合改进[J]. 统计与决策, 2012(19): 38-40.  
LU Weifeng, TANG Houxing. A comprehensive improvement of TOPSIS method for multiple attribute decision making[J]. Statistics & Decision, 2012(19): 38-40.

---

收稿日期: 2017-06-06; 修回日期: 2017-12-13

作者简介:

朱天瞳(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电网规划及综合评价; E-mail: 18722373301@163.com

丁坚勇(1957—), 男, 博士生导师, 研究方向为电力系统可靠性、电网规划及综合评价。E-mail: jyding@whu.edu.cn

(编辑 姜新丽)