

基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价

赵书强, 汤善发

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:针对进行输电网规划时难以量化各指标主观权重与客观权重的问题,提出了一种将改进层次分析法、基于指标相关性的指标权重确定(CRITIC)法和逼近理想解排序法(TOPSIS)相结合的输电网规划方案评价方法。该方法首先分别利用改进层次分析法与 CRITIC 法计算各指标的主观、客观权重,并将两权重结合得到综合权重;然后利用 TOPSIS 计算各规划方案与理想解的相对贴近度,以相对贴近度的大小为衡量标准,实现对规划方案的排序。这种综合考量主、客观权重的方法有效地利用了指标数据的客观信息,并充分考虑了实际电网规划中主观评判和决策的重要作用。以输电网规划常用的经典 IEEE Garver-6 节点系统为算例验证了所提评价方法的有效性。

关键词:输电网规划;综合评价;层次分析法;CRITIC 法;逼近理想解排序法;权重

中图分类号:TM 715

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.023

0 引言

输电网规划方案决策是在满足用电端需求的前提下,考虑在何时、何地投建何种类型的线路及其回路数,通常在满足各项技术指标的基础上,寻求投资费用最少的规划方案。但是在现阶段的综合评价^[1-3]中,人们往往更注重客观指标或主观因素的影响,对两者的综合考量不足。如何将客观、主观因素的影响作用相结合,提高决策过程的准确性,是当前输电网规划面临的一个重要问题。

目前,有关输电网规划综合评价方面的研究也取得了一定的成果,文献[4]采用主成分分析法对输电网方案进行评价,通过计算各方案的评价函数值,实现对输电网的寻优规划。然而,在根据主成分对总方差的贡献率进行指标权重确定时,需要大量的数据作为基础,这在工程实际中难以满足。文献[5-6]运用灰关联分析对输电网方案进行评价,其理想方案的确定需要选定每一个指标的最佳值,操作过程繁琐。输电网规划方案综合评价的关键点是确定权重,权重数值会直接影响评价结果的合理性。文献[7-9]将层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 应用于综合评价中,将复杂的问题分解为具有层次结构的子因素,对各层因素进行人为赋权。但 AHP 赋权过程的主观性过强,易受专家偏好的影响,且 AHP 的判断矩阵存在不能通过一致性检验的可能。文献[5]将熵权法应用于输电网方案评价,但只能计算各指标的客观权重,忽视了主观决策在实际处理过程中的作用。

为了充分利用主观、客观因素的作用,避免单一赋权方法的不足,本文将基于指标相关性的指标权重确定 CRITIC (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation) 法、改进 AHP 相结合来确定综合权重。CRITIC 法^[10]是依据各指标所包含的信息量的多少确定指标权重的客观赋权法,在求取信息量的过程中充分考虑了各指标间的冲突性和对比强度,较其他方法更加准确,已被广泛应用于多行业的评价研究中。文献[11]通过 CRITIC 法实现了对各省/市工业与互联网融合程度的评价。文献[12]将 CRITIC 法应用于初始水权分配中,取得了一定的效果。改进 AHP 是一种计算指标主观权重的方法,通过利用标度构造法建立判断矩阵,克服了传统 AHP 一致性检验中的不便之处^[13]。逼近理想解排序法 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 能够利用计算得到的指标权重确定各评价对象到参考点的距离,进而可实现对各研究对象的综合评价^[14-15]。

CRITIC 法、改进 AHP 分别在客观、主观权重的确定方面有较高的适用性,融合主、客观权重将使主观和客观因素均得到充分利用,使赋权过程更合理,这与输电网规划中重视主观、客观因素的思想相适应。因此,本文尝试将 CRITIC 法、改进 AHP 所求权重相结合,并在此基础上利用 TOPSIS 对输电网的规划方案进行综合评价。

1 主、客观权重的计算

1.1 改进 AHP 计算主观权重

当利用传统 AHP 进行权重计算时,往往会因判断矩阵不满足一致性检验而无法做出决策,导致实际评价过程出现困难。本文采用改进 AHP 解决上

收稿日期:2018-04-12;修回日期:2018-12-24

基金项目:国家电网公司科技项目(XT71-17-028)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(XT71-17-028)

述问题^[13],利用标度构造法确定判断矩阵,按重要程度不减的方式对 n 个指标进行排序,比较相邻 2 个指标的重要程度并记为 1 个标度,依此得到的判断矩阵均满足一致性,不需要进行检验。

判断矩阵 $R=[r_{ij}]$ 满足如下条件:① $r_{ij}>0$;② $r_{ii}=1$;③ $r_{ij}=1/r_{ji}$;④ $r_{ij}=r_{ik}r_{kj}$ 。其中 r_{ij} 为第 i 个指标相对于第 j 个指标的标度值。标度值含义见表 1。

表 1 标度值含义

Table 1 Meaning of scale values

标度值	含义	标度值	含义
1.0	同等重要	1.6	明显重要
1.2	稍微重要	1.8	绝对重要
1.4	强烈重要		

设有 n 个指标 x_1, x_2, \dots, x_n , 按重要程度不减的原则对指标进行主观排序, 结果为 $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_n$, 按表 1 比较 x_i 与 x_{i+1} 的重要度关系, 确定标度值并将对应标度记为 t_i , 最终得到所有相邻指标之间的标度值 t_1, t_2, \dots, t_{n-1} 。根据重要程度的传递性得到判断矩阵中的其他元素, 那么最终的判断矩阵 R 如式(1)所示。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1 t_2 & \dots & \prod_{i=1}^{n-1} t_i \\ \frac{1}{t_1} & 1 & t_2 & \dots & \prod_{i=2}^{n-1} t_i \\ \frac{1}{t_1 t_2} & \frac{1}{t_2} & 1 & \dots & \prod_{i=3}^{n-1} t_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\prod_{i=1}^{n-1} t_i} & \frac{1}{\prod_{i=2}^{n-1} t_i} & \frac{1}{\prod_{i=3}^{n-1} t_i} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由此方式得到的判断矩阵满足一致性,可直接用于权重的计算,不需要进行检验。各项指标的主观权重由式(2)确定^[13]。

$$\alpha_i = \left(\prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} \quad (2)$$

其中, α_i 为第 i 项指标的权重值; $\prod_{j=1}^n r_{ij}$ 表示矩阵 R 中第 i 行所有元素的乘积。由此可定量确定输电网规划中各指标的主观权重。

1.2 CRITIC 法计算客观权重

CRITIC 法是一种基于指标数据的客观赋权法,当利用该方法确定权重时,不仅考虑了指标所含信息量的大小,还考虑了不同方案之间的对比度以及各指标间的冲突性,计算结果更加客观合理。

假设共有 m 个规划方案,每个方案有 n 个指标,则评价矩阵可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

客观权重的计算步骤如下。

a. 指标同向化。

正向指标是指数值越大则效果越好的指标,负向指标是指数值越小则效果越好的指标。在输电网综合评价中往往会包含运行费用、建设费用等负向指标。2 种指标同时存在会增加指标体系的计算量,需进行指标的同向化处理,通常将负向指标转换为正向指标,转换方式如式(4)所示。

$$x'_{ij} = \frac{1}{p + \max |X_i| + x_{ij}} \quad (4)$$

其中, $\max |X_i|$ 为第 i 个指标的最大值,即矩阵 X 第 i 行的最大值; p 为协调系数,一般取为 0.1。经过上述处理得到正向化后的评价矩阵 X' 。

b. 指标数据无量纲化。

矩阵 X' 中各指标的含义不同,单位也不同,需对其进行无量纲化处理,处理方式如式(5)所示,由此得到标准矩阵 X'' 。

$$x''_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x'_{ij})^2}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

c. 计算指标客观权重。

在 CRITIC 法中,以指标的标准差表征不同的方案中同一指标取值差距的大小,即方案间的对比度;以各指标间的相关系数为依据,构造表征冲突性的量化表达式,以此反映指标间的冲突性。由标准矩阵 X'' 可得各指标数据的标准差 s_i 和指标间的相关系数 ρ_{ij} 分别为:

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x''_{ij} - \bar{x}_i'')^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\rho_{ij} = \text{cov}(X_i'', X_j'') / (s_i s_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中, \bar{x}_i'' 为第 i 个指标的均值,即矩阵 X'' 第 i 行元素的均值; $\text{cov}(X_i'', X_j'')$ 为标准矩阵 X'' 第 i 行与第 j 行的协方差。

按 CRITIC 法计算各指标所含的信息量 G_i , 如式(8)所示。

$$G_i = s_i \sum_{j=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中, $\sum_{j=1}^n (1 - \rho_{ij})$ 为第 i 个指标与其他指标冲突性的量化指标。 G_i 越大,则第 i 个指标所含的信息量就越大,该指标就越重要,赋权也应更大。客观权重 β_i 的计算式为:

$$\beta_i = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad (9)$$

1.3 综合权重的确定

由上述改进 AHP 及 CRITIC 法分别得到主观权重向量 α 和客观权重向量 β 。为了使综合权重 ω_i 尽可能地接近 α_i 和 β_i , 而不偏重其中任意 1 项, 本文依据最小鉴别信息原理^[16] 求取综合权重 ω_i , 目标函数为:

$$\begin{cases} \min J(\omega) = \sum_{i=1}^n \left(\omega_i \ln \frac{\omega_i}{\alpha_i} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\beta_i} \right) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

求解此优化模型(具体求解过程见附录 A), 得到综合权重为:

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\alpha_i \beta_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j}} \quad (11)$$

则综合权重向量为 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 。

2 输电网规划综合评价

在确定了评价指标的综合权重后, 可计算得到各方案的加权指标值, 并以加权指标值对所有待选方案进行综合评价计算。但是在计算过程中, 综合评价与各指标间的函数关系未确定, 若以简单的线性关系求和, 则难以保证决策结果的准确性、合理性。所以, 本文采用 TOPSIS 对规划方案进行评价, TOPSIS 是依据各规划方案与理想解的距离大小来实现对各方案的评价与排序, 无需求取综合评价值且过程简便, 已被广泛应用于多行业的评价体系中。

TOPSIS 采用相对贴近度来表征各个评价方案与理想解的距离。首先确定理想解, 包括正理想解和负理想解, 分别表示最优和最劣状况; 然后计算各个评价方案与 2 个理想解的距离, 与正理想解越接近或与负理想解越疏远说明被评价方案的综合特性越好。TOPSIS 的计算步骤如下。

a. 确定加权评价矩阵 Z 。

根据指标的综合权重及标准矩阵 X'' , 由式(12) 计算加权评价矩阵的各行向量 Z_i 。

$$Z_i = X''_i \omega_i \quad (12)$$

最终得到加权评价矩阵 Z 。

b. 计算相对距离。

由于所有数据已正向化, 则数值越大表明结果越优, 故取各指标的最大值构成正理想解 Z^+ , 取各指标的最小值构成负理想解 Z^- 。

$$Z^+ = \{ \max(Z_1), \max(Z_2), \dots, \max(Z_n) \} \quad (13)$$

$$Z^- = \{ \min(Z_1), \min(Z_2), \dots, \min(Z_n) \} \quad (14)$$

评价方案到正理想解的距离 d_j^+ 、到负理想解的距离 d_j^- 的公式分别如下:

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{ij} - z_i^+)^2} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (15)$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{ij} - z_i^-)^2} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (16)$$

其中, z_i^+, z_i^- 分别为正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- 中的第 i 项元素。

c. 计算相对贴近度。

相对贴近度是综合表征评价方案与正理想解、负理想解距离关系的物理量。TOPSIS 求相对贴近度的定义式如式(17)所示。

$$C_j = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (17)$$

根据 C_j 值的大小可实现对评价方案的排序, C_j 越大, 表明该方案与正理想解的距离越近, 综合评价结果越好。

3 输电网规划方案综合评价算例

3.1 算法流程

指标体系要顾及规划方案的经济性、安全性、可扩展性等, 选取的指标要尽可能地相互独立, 结合上述算法, 输电网规划方案的综合评价流程见图 1。

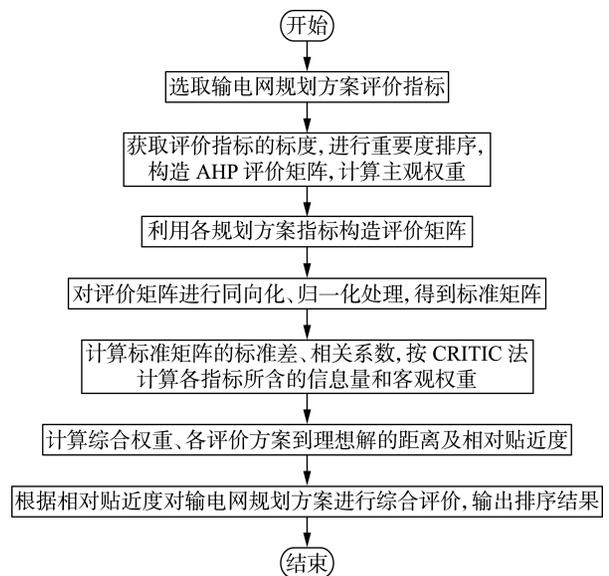


图 1 输电网规划方案的综合评价流程

Fig.1 Flowchart of comprehensive evaluation for transmission network planning scheme

3.2 算例分析

本文以在输电网规划中广泛使用的经典 IEEE Garver-6 节点系统^[17] 为算例, 其原始网络图见图 2,

节点 1 处安装了 4 台发电机,容量分别为 30 MW、30 MW、30 MW、60 MW;节点 3 处安装了 4 台发电机,容量分别为 60 MW、60 MW、120 MW、120 MW;节点 6 处安装了 3 台发电机,容量分别为 120 MW、240 MW、240 MW;各节点处的负荷数据见图 2。

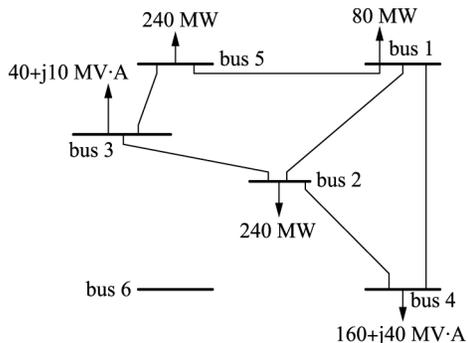


图 2 IEEE Garver-6 节点系统的原始网络图

Fig.2 Original network diagram of IEEE Garver-6-bus system

整个电网的电压等级为 110 kV,基准功率为 100 MW。5 节点系统的发电机容量为 510 MW,为了满足 $760+j50 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 的负荷需求,将节点 6 与 5 节点系统相连接。由图 2 及附录 B 中表 B1 所示线路走廊参数可知,节点 2、4 的负荷较大,且与节点 6 的距离最近,所以优先考虑将节点 2 与节点 6、节点 4 与节点 6 连接。连接线路之后,在考虑损耗情况下的潮流分布(标么值)如图 3 所示(图中方框中的数值为相应母线的电压(标么值),后同)。

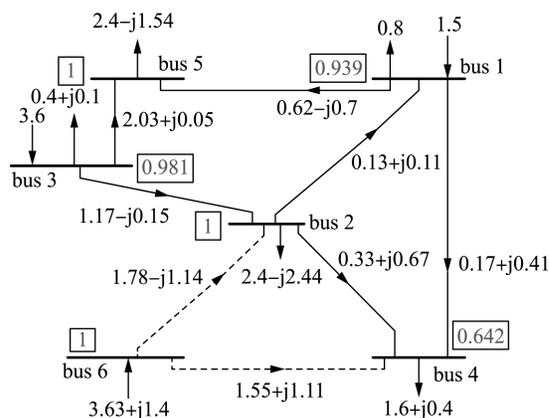
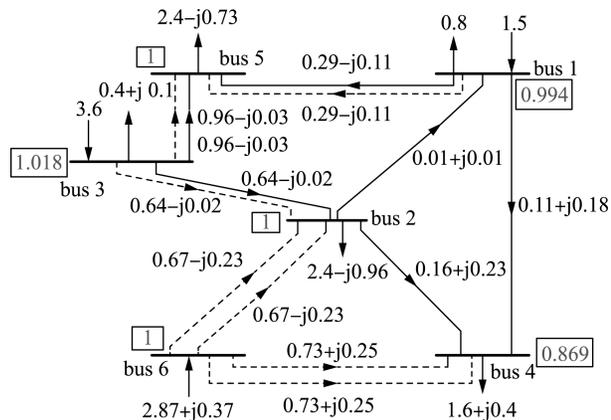


图 3 原始潮流分布

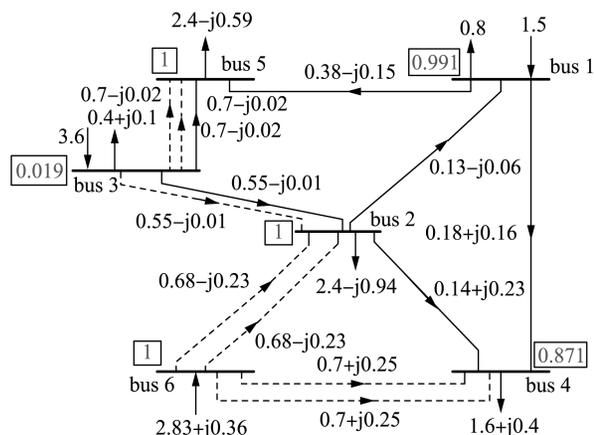
Fig.3 Original power flow distribution

由潮流结果及附录 B 中表 B1 所示线路容量可知,线路 3-5、2-3、2-6、4-6 过载,需扩建线路。图 4 为 2 个备选方案及其潮流分布(标么值),其中实线为已建线路,虚线为待建线路。

考虑到输电网经济性、安全性、可靠性、可扩展性等方面的特点,结合文献[5]中的评价指标,选取表 2 所示指标对 2 个方案进行评价。其中,本文针对运行费用取损耗成本为 0.05 元/(kW·h),最大损耗小时数为 4 000 h/a,维护成本取为总投资的 5%,负载率



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 4 2 个线路扩建备选方案及其潮流分布

Fig.4 Two line expansion alternative schemes and their power flow distribution

高于 90% 为重载线路,110 kV 输电线与建筑物的安全距离取为 2 m,线间安全距离取为 4 m。对于定性指标,本文选取评价集将定性指标转化为定量指标,构造评价集 {1,2,3,4,5,6} 与评价集 {差,较差,稍差,稍好,较好,好} 中的元素一一对应。参考文献[4-6]及专家定性,结合 2 个方案的最大负载率、重载线路数指标可知,方案 1 和方案 2 的安全稳定性^[4-6]评价等级分别为稍差、较好。各指标数据如表 2 所示。

表 2 输电网指标数据

Table 2 Index data of transmission network

评价指标	方案 1	方案 2	评价指标	方案 1	方案 2
建设费用/万元	10 250	10 500	线路有功损耗/MW	36.7	32.9
年运行维护费用/万元	1 246.5	1 183	线路剩余输电容量/MW	524	531
线路最大负载率/%	96	77.8	新建线路走廊占地面积/km ²	4.59	3.68
重载线路数	2	0	安全稳定性等级	3	5

3.2.1 计算主观权重

当输电网规划无特殊约束条件时,参考文献[2,5-6]中的指标评价结果及专家意见,得到的重要性

排序为:安全稳定性>建设费用>线路最大负载率>重载线路数>年运行维护费用>新建线路走廊占地面积>线路剩余输电容量>线路有功损耗。确定指标间的标度值,由专家进行打分评判, $r_{12} = 1.6, r_{23} = 1.2, r_{34} = 1.8, r_{45} = 1, r_{56} = 1.4, r_{67} = 1, r_{78} = 1.8$, 由重要程度的传递性,按前述计算方式,逐步得到矩阵中其他元素的数值。最终由式(1)确定判断矩阵 R , 如附录 B 中式(B1)所示。

由判断矩阵 R , 式(2)计算各指标的主观权重, 所求主观权重向量为 $\alpha = [0.072\ 9, 0.139\ 0, 0.220\ 8, 0.194\ 8, 0.171\ 9, 0.108\ 4, 0.068\ 3, 0.023\ 9]^T$, 向量元素依次对应安全稳定性、建设费用、线路最大负载率、重载线路数、年运行维护费用、新建线路走廊占地面积、线路剩余输电容量及线路有功损耗的主观权重。若输电网规划发生在特殊情景下, 则相应指标的重要度排序也应改变。如若在国家支援西部项目中对输电网进行规划, 则建设费用及年运行维护费用的主观权重降低, 其他取值均与无特殊约束条件时相同。故本文求取综合权重的方法也具有很强的灵活性及实用性。

3.2.2 计算客观权重

利用表 2 数据, 根据 CRITIC 法建立评价矩阵, 采用式(4)进行同向化处理, 将建设费用、年运行维护费用、线路最大负载率、重载线路数、线路有功损耗及新建线路走廊占地面积这几项负向指标转化为正项指标, 按照式(5)对矩阵进行无量纲化, 得到标准矩阵 X'' 为:

$$X'' = \begin{bmatrix} 0.711\ 3 & 0.702\ 9 \\ 0.697\ 9 & 0.716\ 2 \\ 0.545\ 4 & 0.838\ 2 \\ 0.455\ 9 & 0.890\ 0 \\ 0.688\ 3 & 0.725\ 4 \\ 0.702\ 4 & 0.711\ 8 \\ 0.659\ 2 & 0.752\ 0 \\ 0.514\ 5 & 0.857\ 5 \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据 CRITIC 法, 采用式(8)、式(9)分别计算各指标的信息量 G_i 及客观权重 β_i , 最终结果如表 3 所示。

表 3 CRITIC 法的计算结果

Table 3 Calculation results of CRITIC method

评价指标	G_i	β_i	评价指标	G_i	β_i
建设费用	0.059 3	0.046 1	线路有功损耗	0.037 0	0.028 8
年运行维护费用	0.018 2	0.014 2	线路剩余输电容量	0.009 4	0.007 3
线路最大负载率	0.292 8	0.227 6	新建线路走廊占地面积	0.092 8	0.072 2
重载线路数	0.434 2	0.337 4	安全稳定性	0.343 0	0.266 6

3.2.3 综合权重及方案决策

由式(11)计算综合权重 ω_i , 综合权重向量 $\omega =$

$[0.069\ 7, 0.053\ 4, 0.269\ 6, 0.308\ 3, 0.084\ 6, 0.033\ 8, 0.084\ 5, 0.096\ 0]^T$ 。此结果为改进 AHP、CRITIC 法相结合求得的各评价指标的最终权重值。

根据此权重值与标准矩阵 X'' , 由式(12)得到加权评价矩阵 Z 的各行向量, 最终得到矩阵 Z 为:

$$Z = \begin{bmatrix} 0.049\ 6 & 0.049\ 0 \\ 0.037\ 3 & 0.038\ 3 \\ 0.147\ 0 & 0.226\ 0 \\ 0.140\ 6 & 0.274\ 4 \\ 0.058\ 2 & 0.061\ 4 \\ 0.023\ 8 & 0.024\ 1 \\ 0.055\ 7 & 0.063\ 5 \\ 0.049\ 4 & 0.082\ 3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

由式(13)、(14)进一步得到正理想解为 $Z^+ = \{0.049\ 6, 0.038\ 3, 0.226\ 0, 0.274\ 4, 0.061\ 4, 0.024\ 1, 0.063\ 5, 0.082\ 3\}$, 负理想解为 $Z^- = \{0.049\ 0, 0.037\ 3, 0.147\ 0, 0.140\ 6, 0.058\ 2, 0.023\ 8, 0.055\ 7, 0.049\ 4\}$ 。

根据式(15)、式(16)便可分别计算得到评价方案到正、负理想解的相对距离为:

$$d^+ = \{0.159\ 1, 0.000\ 6\}$$

$$d^- = \{0.000\ 6, 0.159\ 1\}$$

最后, 根据式(17)计算各规划方案的相对贴近度 C_j , 方案 1 的相对贴近度为 0.003 7, 方案 2 的相对贴近度为 0.996 3。

C_j 值越大, 表明该方案越优秀, 则最终的评价结果为: 方案 2 优于方案 1。方案 1 虽具有经济性优势, 但其安全稳定性比方案 2 差, 且有负载率过高、线路损耗大的不足, 故其评价较低。算例中选择方案 2 符合实际情况, 由此可证明本文所提方法较追求经济性最优的评价方法更具有实用性、准确性。

运用熵权法和灰关联分析法对算例实施评价, 评价结果为: 方案 1 的关联度为 0.870 3, 方案 2 的关联度为 0.909 5, 方案 2 略优于方案 1。该方法只采用客观权重对评价矩阵进行加权, 结果表明, 方案 2 的关联度虽然仍优于方案 1, 但数值相差无几, 若在追求经济性的工程中, 由于方案 1 的经济性更优, 往往会选用方案 1 作为规划方案, 这使得工程实施的安全性难以得到保证。因此, 通过这 2 种评价结果的对比, 也证明了本文所提评价方法的实用性及准确性。

4 结论

本文针对输电网规划方案评估, 提出了基于主客观权重、TOPSIS 的综合评价方法, 并利用该方法分析 IEEE Garver-6 节点输电网的规划方案, 所得结论如下:

a. 分别利用改进 AHP、CRITIC 法求取主、客观权重, 并基于最小信息鉴别原理将主、客观权重相融

合,使客观、主观因素的影响作用均被考量在内,求解的指标权重更加合理;

b. 将综合权重融入 TOPSIS,通过逼近理想解计算各评价对象指标与参考点的距离,利用所得距离计算指标样本点到理想样本的相对贴进度,进而可通过相对贴进度排序实现输电网规划方案的有效综合评价;

c. 通过算例验证了本文所提输电网规划方案综合评价方法的有效性,算例结果表明,与现有的评价方法相比,该方法既能对各输电网方案进行综合的整体评价,又能反映方案中各指标与理想方案之间的整体贴进程度,是一种有效的综合评价方法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 薛振宇,胡航海,宋毅,等. 基于大数据分析的县公司综合评价策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):199-204.
XUE Zhenyu, HU Hanghai, SONG Yi, et al. Comprehensive evaluation based on big data analysis for county electric power company [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 199-204.
- [2] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.
DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.
- [3] 刘自发,韦涛,李梦渔,等. 基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):60-66,78.
LIU Zifa, WEI Tao, LI Mengyu, et al. Comprehensive evaluation based on improved analytic hierarchy process for AC/DC microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 60-66, 78.
- [4] 聂宏展,聂耸,乔怡,等. 基于主成分分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术,2010,34(6):134-138.
NIE Hongzhan, NIE Song, QIAO Yi, et al. Comprehensive decision-making of alternative transmission network planning based on principal component analysis [J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 134-138.
- [5] 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 network planning based on entropy weight and grey relational analysis [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- [6] 周建平,林韩,温步瀛. 基于层次分析法与灰关联理论的输电网规划方案综合决策[J]. 电网与清洁能源,2011,27(9):66-70.
ZHOU Jianping, LIN Han, WEN Buying. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on AHP-GRA [J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(9): 66-70.
- [7] 国连玉,李可军,梁永亮,等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):161-167.
GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.
- [8] 赵书强,李勇,王春丽. 基于集对层次分析法的输电网规划动态综合评判[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2009,36(5):17-21.
ZHAO Shuqiang, LI Yong, WANG Chunli. A dynamic comprehensive judgement method for transmission network planning based on SPA and AHP [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2009, 36(5): 17-21.
- [9] 罗志坤,刘潇潇,陈星莺,等. 变电站能效评估指标体系及建模方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):132-138.
LUO Zhikun, LIU Xiaoxiao, CHEN Xingying, et al. Energy efficiency evaluation index system and modeling method for substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 132-138.
- [10] 张立军,张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J]. 统计与决策,2015,22(18):65-68.
ZHANG Lijun, ZHANG Xiao. Weighted clustering method based on improved CRITIC method [J]. Statistics & Decision, 2015, 22(18): 65-68.
- [11] 傅为忠,刘芳芳. 基于改进 CRITIC-GRAP 模型的“互联网+工业”融合发展评价研究[J]. 工业技术经济,2016,35(10):21-29.
FU Weizhong, LIU Fangfang. Research on the evaluation of “internet plus industry” convergence based on improved CRITIC-GRAP model [J]. Journal of Industrial Technological & Economics, 2016, 35(10): 21-29.
- [12] 李磊,徐宗学,于伟东,等. 基于模糊优选和 CRITIC 法的流域初始水权分配;以漳卫南子流域为例[J]. 水利水电技术,2012,43(7):32-35.
LI Lei, XU Zongxue, YU Weidong, et al. Fuzzy optimization and CRITIC method based initial water right allocation of river basin: a case of Zhangweinan Canal Sub-basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(7): 32-35.
- [13] 李娜娜,何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术,2009,33(6):55-61.
LI Nana, HE Zhengyou. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight with objective weight [J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 55-61.
- [14] 付学谦,陈皓勇. 基于理想解法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):26-30.
FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on TOPSIS approach [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 26-30.
- [15] 张文朝,顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术,2014,38(10):2741-2746.
ZHANG Wenchao, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution [J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2741-2746.
- [16] 孙即祥. 现代模式识别[M]. 北京:高等教育出版社,2008:526-538.
- [17] ROMERO R, MONTICELLI A, GARCIA A, et al. Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 27-36.

作者简介:



赵书强

赵书强(1964—),男,河北景县人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统分析与控制、电力系统规划与可靠性等方面的教学与科研工作(E-mail: zsqdl@163.com);

汤善发(1993—),男,山东潍坊人,硕士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: tsf1993@126.com)。

(下转第162页 continued on page 162)

- [22] 罗志坤,刘潇潇,陈星莺,等. 变电站能效评估指标体系及建模方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):132-138.
LUO Zhikun, LIU Xiaoxiao, CHEN Xingying, et al. Energy efficiency evaluation index system and modeling method for substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 132-138.
- [23] 杨志超,张成龙,葛乐,等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):90-94.
YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, GE Le, et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flash-over pollution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90-94.
- [24] LEFEVRE E, COLOT O, VANNOORENBERGHE P. Belief function combination and conflict management [J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149-162.
- [25] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2): 325-339.
- [26] SHAFER G A. Mathematical theory of evidence [M]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1976: 19-63.

作者简介:



周 来

周 来(1995—),女,湖南湘潭人,博士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性与规划、配电网设备利用率综合评价等 (E-mail: 291666680@qq.com);

叶琳浩(1983—),男,广东清远人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与可靠性分析 (E-mail: yelh@csg.cn);

杨雄平(1978—),男,广东广州人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统运行方式分析计算、电网规划运行管理 (E-mail: hustyp@163.com)。

Influence indicator system for equipment utilization efficiency of active distribution network and its value calculation method

ZHOU Lai¹, YE Linhao², YANG Xiongping², ZHANG Yongjun¹, ZHANG Yao¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Green Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Planning and Development Department, China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low EUEDN (Equipment Utilization Efficiency of Distribution Network) in China, taking the influence of distributed generation into account, a set of influence indicator system for equipment utilization efficiency of active distribution network is established and a value calculation method based on Pignistic probability distance is designed. Firstly, the influence indicators of capacity factor and load rate, which are the indexes reflecting the EUEDN directly, are analyzed, the differences between the influence indicator of active distribution network and passive distribution network are compared, and a set of influence indicator system for equipment utilization efficiency of active distribution network is established from three aspects of load characteristics of equipment, operation time of equipment and equipment parameters. Then, based on the Pignistic probability distance optimal evidence synthesis method, a combined weighting method based on AHP (Analytic Hierarchy Process) and entropy weight method with "deviation discount" feature is proposed, which is used to calculate the values of influence indicators. Finally, the effectiveness of the proposed influence indicator system and value calculation method is verified by case analysis.

Key words: active distribution network; distributed generation; equipment utilization efficiency; influence indicator system; combination weighting; value calculation; Pignistic probability distance; AHP and entropy weight method

(上接第148页 continued from page 148)

Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS

ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to quantify the subjective and objective weights of each index in transmission network planning, an evaluation method of transmission network planning scheme which combines improved analytic hierarchy process, CRITIC (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation) method and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) is proposed. Firstly, the subjective and objective weights of each index are calculated by the improved analytic hierarchy process and CRITIC method respectively and the comprehensive weights are obtained by combining the two weights. Then, the relative closeness coefficient between each planning scheme and the ideal solution is calculated by using TOPSIS, which is taken as the measurement standard to realize the sorting of planning schemes. This method that comprehensively considers the subjective and objective weights effectively utilizes the objective information of index data and takes full account of the important role of subjective evaluation and decision in the actual network planning. The effectiveness of the proposed evaluation method is verified by the typical IEEE Garver-6-bus system, which is commonly used in the transmission network planning.

Key words: transmission network planning; comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; CRITIC method; TOPSIS; weights

附录 A

构建拉格朗日函数为:

$$L = \sum_{i=1}^n \left[\omega_i \ln \frac{\omega_i}{\alpha_i} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\beta_i} \right] + \lambda \left(\sum_{i=1}^n \omega_i - 1 \right) \quad (\text{A1})$$

求取偏微分得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \omega_i} = 2 \ln \omega_i + 2 - \ln \alpha_i \beta_i + \lambda = 0 & i = 1, 2, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n \omega_i - 1 = 0 \end{cases} \quad (\text{A2})$$

得到综合权重为:

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\alpha_i \beta_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j}} \quad (\text{A3})$$

附录 B

表 1 线路走廊参数

Table 1 Parameters of line corridors

单回支路	交流电阻	交流电抗	线路容量/MW	线路长度/km	投资/万元
1-2	0.12	0.42	90	40	2000
1-4	0.12	0.63	80	60	3000
1-5	0.06	0.22	100	20	1000
2-3	0.06	0.24	90	20	1000
2-4	0.11	0.5	100	50	2500
2-6	0.07	0.32	90	30	1500
3-5	0.06	0.25	100	25	1250
4-6	0.098	0.4	90	40	2000

注: 表中交流电阻、交流电抗均为标么值。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1.6 & 1.92 & 3.456 & 3.456 & 4.8384 & 4.8384 & 8.7091 \\ \frac{1}{1.6} & 1 & 1.2 & 2.16 & 2.16 & 3.024 & 3.024 & 5.4432 \\ \frac{1}{1.92} & \frac{1}{1.2} & 1 & 1.8 & 1.8 & 2.52 & 2.52 & 4.536 \\ \frac{1}{3.456} & \frac{1}{2.16} & \frac{1}{1.8} & 1 & 1 & 1.4 & 1.4 & 2.52 \\ \frac{1}{3.456} & \frac{1}{2.16} & \frac{1}{1.8} & 1 & 1 & 1.4 & 1.4 & 2.52 \\ \frac{1}{4.8384} & \frac{1}{3.024} & \frac{1}{2.52} & \frac{1}{1.4} & \frac{1}{1.4} & 1 & 1 & 1.8 \\ \frac{1}{4.8384} & \frac{1}{3.024} & \frac{1}{2.52} & \frac{1}{1.4} & \frac{1}{1.4} & 1 & 1 & 1.8 \\ \frac{1}{8.7091} & \frac{1}{5.4432} & \frac{1}{4.536} & \frac{1}{2.52} & \frac{1}{2.52} & \frac{1}{1.8} & \frac{1}{1.8} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B1})$$