

DOI: 10.7667/PSPC162033

基于 TOPSIS 算法的电力通信网关键节点识别

耿子惠¹, 崔力民^{2,3}, 舒勤¹, 张玮³

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206;
3. 国网新疆电力公司信息通信公司, 新疆 乌鲁木齐 830018)

摘要: 电力通信网某些关键节点对于网络安全可靠运行有着重要意义。为识别关键节点, 提出一种基于 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)算法识别电力通信网关键节点的方法。首先构建节点重要度评价体系, 将每个节点看作一个方案, 将评价指标看作方案属性, 将主观赋权法中的层次分析法和客观赋权法中的熵权法相结合, 求得综合权重。然后给每个评价指标赋权。最后采用多属性决策的方法求得节点重要度, 根据重要度值的大小识别出关键节点。采用某省实际电网进行检验, 仿真证明, 相对于现有其他算法, 该算法能更准确地识别关键节点, 验证了该方法的实用性和有效性。

关键词: 电力通信网; 多属性决策; 赋权法; 关键节点; 节点重要度

Crucial node decision algorithm based on TOPSIS algorithm in electric power communication network

GENG Zihui¹, CUI Limin^{2,3}, SHU Qin¹, ZHANG Wei³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. College of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
3. Information & Telecommunication Company, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830018, China)

Abstract: Some crucial nodes of the electric power communication network have important significance to the safe and reliable operation of the network. To identify the key nodes, a method based on Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) algorithm is proposed. First, it builds the evaluation system of the nodes, and considers each node as a solution and each evaluation index as a property. Then, it combines the subjective method of analytic hierarchy process with objective method of entropy weight method to calculate the comprehensive weight, and the comprehensive weight is added to each index. Finally, the multiple attribute decision making method is used to calculate the important degree of each node, and the key node is identified according to the important degree. The actual power grid of one province is used to test the theory. Simulation results show that this method can recognize the key node more accurately than other existing methods, proving the practicability and validity of this method.

This work is supported by Science and Technology Support Project of Sichuan Province (No. 2017GZ0349) and Science and Technology Project of State Grid Xinjiang Electric Power Company (No. SGXJXT00TJS1600206).

Key words: electric power communication network; multi-attribute decision making; weighting method; critical nodes; node importance

0 引言

随着智能电网的提出和发展, 在电网大规模互联的趋势下, 电力通信网作为电网的支撑网络, 其在维护电力系统安全、可靠、稳定运行中起着越来越

越重要的作用^[1-4]。因此, 对电力通信网脆弱性的研究也具有越来越重要的意义。而电力通信网络中节点的重要程度表征了通信网络中的节点在可能的故障情况下对网络性能影响的大小^[5-6]。因此, 识别出网络中的重要节点, 并加以保护, 对电力通信网的可靠运行有着重要作用。

现有对节点重要度的研究有很多方法: 基于节点收缩的方法^[7], 把收缩后节点的凝聚度作为评

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2017GZ0349); 国网新疆电力公司科技项目(SGXJXT00TJS1600206)

价指标, 但该方法收缩的范围不易控制; 基于节点删除的评价方法^[8], 通过删除某些节点后, 用网络的连通性指标评价节点重要度, 然而对删除后不连通的网路无法做出评价; 基于复杂网路的方法^[9], 从网路拓扑方面入手评估节点的重要度, 如介数法, 这种方法比较片面, 没有考虑到网路节点的行业特点^[10]。而现有对电力通信网的研究, 一般多是在通信层面考虑问题^[11], 很少考虑电力通信网与电网的特殊关系, 因此不能对通信节点做出全面、有效的评价。

TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)算法是一种多属性决策综合评价方法, 其根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序, 能够在现有的对象中进行相对优劣的评价。网路拓扑是通信网最直观、本质的属性, 只有在可靠的物理网路基础上, 通信业务才能得到有效的传输。此外, 由于是电力系统的专用网路, 电力通信网本身的行业属性也影响着节点的重要度。本文基于 TOPSIS 算法, 提出一种新的评价节点重要度的方案^[12], 将电力通信网的拓扑结构和节点行业特点结合起来, 能更准确地识别电力通信网中的关键节点。

1 电力通信网节点重要度水平评价体系的构建

电力通信网是电网调度自动化、电网运营市场化和电网管理信息化的基础^[13], 影响其节点重要度的因素较多。从电网影响方面考虑, 多数通信节点位于变电站、电厂等站点, 这些站点在电网中的重要度对通信节点重要度有着很大的影响。从通信网方面考虑, 通信节点在通信网中的拓扑位置也影响着节点的重要度。综合考虑电网影响因素和电力通信网拓扑因素, 构建电力通信网节点重要度评价体系如图 1 所示。

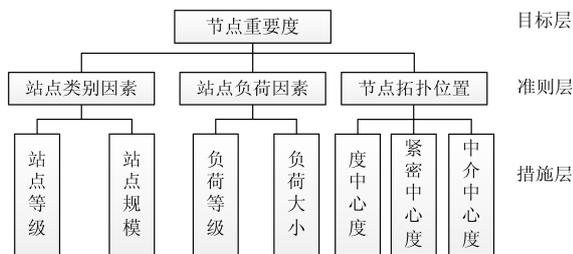


图 1 电力通信网节点重要度评价体系

Fig. 1 Evaluation system of node importance in electric power communication network

1.1 站点类别因素

将电力通信网节点所处的调度中心、电厂、地

级供电公司及电厂等称为“站点”^[14]。站点用来描述电网因素对通信节点重要度的影响。站点类别因素细分为站点等级、站点规模两个指标。同类站点等级不同, 地位不同, 如 500 kV 变电站与 220 kV 变电站重要度不同。此外, 站点规模大小不同, 地位也不同, 如枢纽站和区域站重要度也不同。站点类别指标评价标准如表 1 所示。

表 1 站点类别因素指标评价标准

Table 1 Evaluation standard of the site category factor index

站点类别因素	因素评价标准
电力通信网节点所处站点类别因素评价准则	根据厂/站或调度中心所管辖厂/站的电压等级确定节点所处站点等级并赋予相应的影响力值。
	根据厂/站的规模或调度中心所管辖厂/站的规模确定节点所处站点规模并赋予相应的影响力值。

1.2 站点负荷因素

站点负荷因素细分为负荷等级、负荷大小两个指标。由于不同用户中断供电造成的影响不同, 因此, 根据国家相关规定, 根据对供电可靠性的要求及中断供电在政治、经济上所造成的损失或影响的程度对负荷服务的用户进行分级, 重要用户等级划分标准如表 2 所示。

表 2 重要用户等级划分标准

Table 2 Standard of important electrical customers

用户分类	用户范围	等级认定
政府机关	省级及以上党、政机关	特级
	省高级人民法院、省检察院, 地市级党、政机关	一级
	地市级法院、检察院	二级
重要基础设施	重要防汛防洪等水利设施	一级
	污水处理设施	二级
	供水、供油(气)、供热等设施	二级
通信枢纽	省级及以上通信企业、通信枢纽站	一级
	地市级通信企业、通信枢纽站	二级
金融机构	省级人民银行、重要证券交易机构(深交所)	一级
	地市级人民银行、省级商业银行	二级
医疗卫生机构	三级甲等医院	一级
	二级及以上带有手术抢、救重症监护等涉及生命安全设施的医疗机构	二级
	省级疾病预防控制中心	二级

站点负荷大小是随时间变化的值, 本文采用相对负荷大小来衡量站点负荷大小因素^[15]。即用站点及辖区不对外供电时, 电网实际负荷减少量作为评价值。站点负荷因素评价标准如表 3 所示。

表 3 站点负荷因素指标评价标准

Table 3 Evaluation standard of the station load factor index		
站点负荷因素	因素评价标准	
电力通信网节点所处站点负荷因素评价准则	负荷等级	根据站点服务的电力用户等级相关标准确定站点负荷等级, 并赋予相应影响力值。
	负荷大小	根据厂/站完全故障或调度中心管辖范围内厂/站全部故障造成电网减供负荷等级确定负荷大小并赋予相应影响力值。

1.3 节点拓扑位置

基于图论的方法, 构建电力通信网络拓扑图。设 $G=(V, E)$ 为网络的拓扑结构, 其中, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 是网络节点集, $|V|=N$, $E=\{e_1, e_2, \dots, e_K\}$ 是网络无向链路集, $|E|=K$ 。本文使用度中心度、紧密中心度和中介中心度 3 个指标评判节点拓扑位置重要度。

1) 度中心度

度中心度测量网络中某节点与所有其他节点相联系的程度, 度中心度越高, 节点越重要^[16]。定义节点 i 与其他节点直接相关联的边数为 k_i , N 为网络中节点数目, 则节点 i 的度中心度 C_{Di} 可表示为

$$C_{Di} = k_i / (N - 1) \quad (1)$$

2) 紧密中心度

紧密中心度反映网络中某节点与其他节点之间的接近程度, 紧密中心度越大, 表明节点越处于网络的中心位置, 节点越重要。定义节点 i 到节点 j 的最短路径中包含边的数量为 d_{ij} , 则节点 i 的紧密中心度 C_{Ci} 可表示为

$$C_{Ci} = (N - 1) / \sum_{j=1}^N d_{ij} \quad (2)$$

3) 中介中心度

中介中心度是以经过网络中某个节点的最短路径数目刻画节点重要性的指标^[17]。网络中其他节点对通信时经过该节点的次数越多, 则该节点越重要。因此, 中介中心度越高, 则节点越重要。定义网络中任意两节点 j 和 k 之间最短路径总数为 g_{jk} , 其中, 经过节点 i 的最短路径条数为 $g_{jk}(i)$, 则节点 i 的中介中心度 C_{Bi} 可表示为

$$C_{Bi} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j \neq i, k \in V} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}} \quad (3)$$

2 基于 TOPSIS 算法的电力通信网节点重要度评价方法

TOPSIS 算法是一种多属性决策方法, 根据有

限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序, 适用于多项指标对多个方案进行比较选择。将电力通信网中每个节点看作一个方案, 将每个评价指标看作方案的属性, 即将节点重要性评价转换为多属性决策问题。

基于 TOPSIS 算法的电力通信网节点重要度评价流程如图 2 所示。

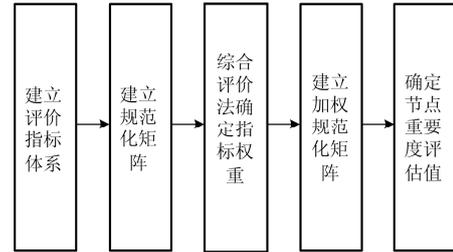


图 2 基于 TOPSIS 算法的电力通信网节点重要度评价流程

Fig. 2 Evaluation process of node importance in electric power communication network based on TOPSIS algorithm

设电力通信网节点重要度水平评价体系中, 总共有 N 个节点, a 表示准则层的第 a 项指标(例如: 站点类别因素), 准则层每项指标下有 m 个分类细化指标(例如: 站点等级、站点规模), i 、 j 分别表示第 i 个节点和第 j 个分类细化指标。

1) 构造规范化矩阵

构造第 a 项指标的决策矩阵 $X_a = (x_{ij})_{N \times m}$ 。

$$X_a = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{Nm} \end{bmatrix}$$

式中, x_{ij} 为第 i 个节点的第 j 个分类细化指标的值。由于指标体系下各个分类细化指标的类型和量纲不同, 为了消除这些影响, 需要对决策矩阵 X_a 进行标准化处理, 构成规范决策矩阵 $R_a = (r_{ij})_{N \times m}$ 。

$$\text{对于效益型指标: } r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (4)$$

$$\text{对于成本型指标: } r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (5)$$

式中: $x_j^{\max} = \max\{x_{ij} | 1 \leq i \leq N\}$; $x_j^{\min} = \min\{x_{ij} | 1 \leq i \leq N\}$ 。

2) 计算权重 W_a 向量

本文在权重确定方面, 采用将熵权法和层次分析法相结合的综合权重确定方法。

层次分析法采用专家打分的方法, 将除目标层

以外的各层次指标与同层其他指标的重要性进行两两比较^[18], 本文中, 将准则层第 a 项指标下的各个分类细化指标两两比较, 构造出比较判断矩阵 A 。

判断矩阵元素的值反映了对各因素相对重要性的认识, 一般采用 1~9 及其倒数的标度方法, 如表 4 所示。

表 4 判断矩阵标度表

Table 4 Scale table of the judgment matrix

标度	含义
1	具有同样重要性
3	一个因素比另一个因素稍微重要
5	一个因素比另一个因素明显重要
7	一个因素比另一个因素强烈重要
9	一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	介于以上相邻判断的中值

计算比较判断矩阵 A 满足等式 $A\mathbf{w}_1 = \lambda_{\max} \mathbf{w}_1$ 的最大特征根 λ_{\max} 和对应的特征向量 \mathbf{w}_1 , \mathbf{w}_1 即是单排序权重。

进行一致性检验, 计算一致性指标 $C_I = \frac{\lambda_{\max} - q}{q - 1}$, 其中 q 为比较判断矩阵的阶数。计算一致性比率 $C_R = \frac{C_I}{R_I}$, 其中 R_I 为平均随机一致性

指标, 可通过查表 5 得到。

表 5 平均随机一致性指标

Table 5 Average random consistency index

q	1	2	3	4	5
R_I	0	0	0.52	0.89	1.12
q	6	7	8	9	10
R_I	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

一般而言, C_R 越小说明比较判断矩阵的一致性越好。通常认为 $C_R < 0.1$ 时, 判断矩阵具有满意的一致性。将 \mathbf{w}_1 归一化, 得到每项分类细化指标的主观权重 w_{1aj} 。

熵权法是根据各指标所包含的信息量的大小来确定指标权重的客观赋权法^[19]。

计算第 a 项分类指标下的第 j 个分类细化指标的熵值 e_{aj} 。

$$P_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^N r_{ij} \quad (6)$$

$$e_{aj} = -k \sum_{i=1}^N P_{ij} \ln P_{ij} \quad (7)$$

式中: $k = 1/\ln N$, N 为节点数目; r_{ij} 为规范决策矩阵 \mathbf{R}_a 中的值; P_{ij} 是中间变量。最后得到熵权法权

重 w_{2aj} 的计算公式如式(8)。

$$w_{2aj} = \frac{1 - e_{aj}}{\sum_{j=1}^m (1 - e_{aj})} \quad (8)$$

确定第 j 项分类细化指标的综合权重为

$$w_{aj} = \frac{w_{1aj} w_{2aj}}{\sum_{j=1}^m w_{1aj} w_{2aj}} \quad (9)$$

式中, w_{aj} 满足 $0 \leq w_{aj} \leq 1$, $\sum_{j=1}^m w_{aj} = 1$ 。则权重向量

$$\mathbf{W}_a = [w_{a1}, \dots, w_{aj}, \dots, w_{am}]。$$

3) 构造加权规范化矩阵 \mathbf{Y}_a

将权重向量与规范化矩阵结合, 构造加权规范化矩阵 \mathbf{Y}_a 。

$$\mathbf{Y}_a = (y_{ij}) =$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \cdots & r_{Nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{a1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{a2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & w_{aj} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{am} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_a = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i1} & \cdots & y_{ij} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{Nm} \end{bmatrix}$$

4) 计算相对贴近度

基于加权规范化矩阵 \mathbf{Y}_a , 确定第 j 项分类细化指标的正负理想解。所谓的正理想解就是某一个指标中的最优值, 反之就是负理想解。

正理想解:

$$F_{aj}^+ = \left\{ \max_{i \in L} (y_{i1}, \dots, y_{im}) \right\} = \{y_1^{\max}, \dots, y_m^{\max}\} \quad (10)$$

负理想解:

$$F_{aj}^- = \left\{ \min_{i \in L} (y_{i1}, \dots, y_{im}) \right\} = \{y_1^{\min}, \dots, y_m^{\min}\} \quad (11)$$

式中, $L = \{1, \dots, N\}$ 。

计算每个节点到正、负理想解的距离。

到正理想解的距离为

$$D_{ai}^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^{\max})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

到负理想解的距离为

$$D_{ai}^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^{\min})^2}, \quad i=1,2,\dots,N \quad (13)$$

得到第 i 个节点第 a 项指标的相对贴近度为

$$Z_{ai} = D_{ai}^- / (D_{ai}^+ + D_{ai}^-), \quad i=1,2,\dots,N \quad (14)$$

至此, 可得到每个节点准则层各指标的相对贴近度, 分别计算出每个节点准则层站点类别因素相对贴近度 $Z_1 = [Z_{11}, \dots, Z_{1i}, \dots, Z_{1N}]^T$, 站点负荷因素相对贴近度 $Z_2 = [Z_{21}, \dots, Z_{2i}, \dots, Z_{2N}]^T$, 节点拓扑位置相对贴近度 $Z_3 = [Z_{31}, \dots, Z_{3i}, \dots, Z_{3N}]^T$, 并以此作为节点重要度的指标值, 组成新的决策矩阵 X 。

$$X = [Z_1, Z_2, Z_3]$$

根据式(4)和式(5)进行规范化处理, 得到规范化决策矩阵 R , 根据式(6)一式(9)计算权重向量 W , 得到加权规范化矩阵 Y , 最后根据式(10)一式(14)计算出每个节点对相对贴近度 Z_i , 从而可以得出节点重要度排序, 识别出关键节点。

3 算例分析

图 3 中的网络中有 14 个节点, 16 条链路, 其中 7 号节点是省级调度中心, 13 号节点是地区调度中心, 9、10、11、12、14 号节点是 220 kV 变电站, 其余节点均是 500 kV 变电站。

站点等级、站点规模、负荷等级和负荷大小可

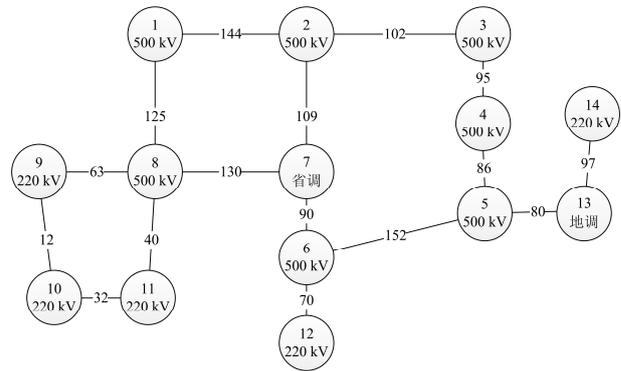


图 3 电力通信网拓扑结构

Fig. 3 Topology of a power communication network

参考上文中评价标准, 得到其相对影响值, 结果如表 6 所示。

度中心度、紧密中心度和中介中心度由上文中公式计算可得, 计算结果如表 7 所示。

由站点等级和站点规模相对影响值, 可以构建站点类别因素决策矩阵 X_1 ; 由负荷等级和负荷大小相对影响值, 可以构建站点负荷因素决策矩阵 X_2 ; 由度中心度、紧密中心度和中介中心度的计算值, 可以构建节点拓扑位置决策矩阵 X_3 。根据决策矩阵, 将矩阵中的值进行去量纲处理, 可计算出规范化决策矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 。

表 6 站点类别因素及站点负荷因素相对影响值

Table 6 Relative influence of site category factors and load factors

节点	节点所在站点类别因素				节点所在站点负荷因素			
	站点等级	等级评分	站点规模	等级评分	负荷等级	等级评分	负荷大小	等级评分
1	500 kV 变电站	8	枢纽站	10	一级	8	16%~40%	8
2	500 kV 变电站	8	区域站	5	一级	8	16%~40%	8
3	500 kV 变电站	8	枢纽站	10	二级	6	16%~40%	8
4	500 kV 变电站	8	区域站	5	二级	6	16%~40%	8
5	500 kV 变电站	8	枢纽站	10	二级	6	16%~40%	8
6	500 kV 变电站	8	区域站	5	二级	6	40%及以上	10
7	省调	7	枢纽站	10	特级	10	40%及以上	10
8	500 kV 变电站	8	枢纽站	10	二级	6	16%~40%	8
9	220 kV 变电站	4	枢纽站	10	其他	4	16%~40%	8
10	220 kV 变电站	4	枢纽站	10	其他	4	12%~16%	6
11	220 kV 变电站	4	区域站	5	一级	8	12%~16%	6
12	220 kV 变电站	4	区域站	5	其他	4	12%~16%	6
13	地调	3	枢纽站	10	二级	6	16%~40%	8
14	220 kV 变电站	4	区域站	5	二级	6	2%~4%	2

表 7 电力通信网各节点拓扑位置参数

Table 7 Topology location parameters in electric power communication network

节点	度中心度	紧密中心度	中介中心度
1	0.1538	0.3421	0.1172
2	0.2308	0.3824	0.3223
3	0.1538	0.3421	0.1685
4	0.1538	0.3250	0.1429
5	0.2308	0.3824	0.5897
6	0.2308	0.4333	0.7106
7	0.2308	0.4643	0.7729
8	0.3077	0.4063	0.7253
9	0.1538	0.3095	0.1209
10	0.1538	0.2500	0.0110
11	0.1538	0.3095	0.1209
12	0.0769	0.3095	0
13	0.1538	0.2955	0.2637
14	0.0769	0.2321	0

利用层次分析法计算权重, 站点类别因素各指标重要性比较值如表 8 所示。

表 8 站点类别因素各指标重要性比较值

Table 8 Importance comparison value of each index in site category factors

	站点等级	站点规模
站点等级	1	7/5
站点规模	5/7	1

站点负荷因素各指标重要性比较值如表 9 所示。

表 9 站点负荷因素各指标重要性比较值

Table 9 Importance comparison value of each index in site load factors

	负荷等级	负荷大小
负荷等级	1	7/5
负荷大小	5/7	1

节点拓扑位置各指标重要性比较值如表 10 所示。

表 10 节点拓扑位置各指标重要性比较值

Table 10 Importance comparison value of each index in node topology location

	DC	CC	BC
DC	1	1/2	1/3
CC	2	1	1/2
BC	3	2	1

利用层次分析法进行计算, 得出层次分析法权重, 经一致性检验, 其结果具有满意的一致性。利用熵权法进行计算, 根据式(6)一式(8)计算出熵权法权重, 根据式(9)计算出综合权重, 结果如表 11 所示。

表 11 指标层各指标权重

Table 11 Weight of the indicators in index layer

	层次分析法 权重	熵权法权重	综合权重
DC	0.1635	0.2673	0.1223
CC	0.2969	0.3362	0.2792
BC	0.5396	0.3965	0.5985
站点等级	0.5834	0.4882	0.5719
站点规模	0.4166	0.5118	0.4281
负荷等级	0.5834	0.4811	0.5649
负荷大小	0.4166	0.5189	0.4351

由规范化决策矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 及各指标权重值, 可构建加权规范化矩阵 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 。可计算出在准则层各个指标下, 每个节点相对贴程度, 即为重要度评分。评分结果如表 12 所示。

表 12 各节点准则层计算结果及排序

Table 12 Calculation results and sorting of the nodes in rule layer

节点	站点类别因素	站点负荷因素	节点拓扑位置
1	1.0000/1	0.6962/2	0.2363/9
2	0.5719/3	0.6962/2	0.4663/5
3	1.0000/1	0.4901/5	0.2767/7
4	0.5719/3	0.4901/5	0.2372/8
5	1.0000/1	0.4901/5	0.7372/4
6	0.5719/3	0.5573/4	0.8922/2
7	0.8456/2	1.0000/1	0.9423/1
8	1.0000/1	0.4901/5	0.8857/3
9	0.4920/4	0.3619/6	0.2024/10
10	0.4920/4	0.2644/8	0.0673/12
11	0.1544/6	0.6018/3	0.2024/10
12	0.1544/6	0.2674/7	0.1272/11
13	0.4281/5	0.4901/5	0.3297/6
14	0.1544/6	0.2465/9	0/13

由表 12 可以看出, 站点类别因素各节点重要度排序为 $1=3=5=8>7>2=4=6>9=10>13>11=12=14$ 。其中 1、3、5、8 节点在站点等级和站点规模方面, 均为最高级别, 故重要度值最大。站点负荷因素各节点重要度排序为 $7>1=2>11>6>3=4=5=8=13>9>12>10>14$ 。其中, 节点 7 因负荷等级、负荷大小均为最高级别, 故重要度值最大。节点拓扑位置各节点重要度排序为 $7>6>8>5>2>13>3>4>1>9=11>12>10>14$ 。其中, 节点 7 位于拓扑结构中较为核心的位置, 因此重要度值最大。

由准则层 3 个指标, 即站点类别因素、站点负荷因素和节点拓扑位置的贴程度, 可构建目标层决策矩阵, 根据式(4)和式(5), 经计算可构造出目标层规范化矩阵。

计算准则层各指标权重, 准则层各指标重要性比较值如表 13 所示。

表 13 准则层各指标重要性比较值

Table 13 Importance comparison value of each index in rule layer

	站点类别 因素	站点负荷 因素	节点拓扑 位置
站点类别因素	1	6/5	3/2
站点负荷因素	5/6	1	6/5
节点拓扑位置	2/3	5/6	1

计算出层次分析法权重, 进行一致性检验, 根据式(6)一式(8)计算出熵权法权重, 根据式(9)计算出综合权重, 结果如表 14 所示。

表 14 准则层各指标权重

Table 14 Weight of each index in rule layer

	层次分析法 权重	熵权法 权重	综合权重
站点类别因素	0.4003	0.3178	0.3839
站点负荷因素	0.3291	0.3345	0.3322
节点拓扑位置	0.2706	0.3477	0.2839

由规范化决策矩阵 R 及准则层各指标权重值可构建加权规范化矩阵 Y 。计算出每个节点最终相对贴适度 Z_i , 即为各节点重要度评分。与介数法^[20]和节点收缩法^[21]对比, 仿真结果及各节点重要度排序如表 15 所示。

表 15 节点重要度计算结果

Table 15 Calculation results of node importance

节点	TOPSIS 算法/ 排名	介数法/排名	节点收缩法/ 排名
1	0.6353/4	10.67/10	0.2186/10
2	0.5274/7	29.33/5	0.3554/5
3	0.5748/5	15.37/7	0.2655/7
4	0.3856/8	13.00/8	0.2301/8
5	0.6619/3	53.67/4	0.5732/4
6	0.5636/6	64.67/3	0.6651/3
7	0.8847/1	70.33/1	0.7698/1
8	0.6803/2	66.00/2	0.7966/2
9	0.2881/10	11.00/9	0.2239/9
10	0.2449/12	1.00/11	0.1655/11
11	0.2604/11	11.00/9	0.2239/9
12	0.0659/13	0/12	0.1481/12
13	0.3299/9	24.00/6	0.3011/6
14	0/14	0/12	0.1481/12

根据表 15 计算结果, 节点 7 的重要度最大, 这与节点 7 为省调、在电力通信网中处于较为核心的位置的实际情况相匹配。节点 13 是地调, 其重要度值高于其余 220 kV 变电站节点。节点 9、11 在拓扑结构中有相同的重要度, 然而, 综合考虑站点因素后,

节点 9 的重要度要高于节点 11。节点 3、5 在站点因素方面具有相同的重要度, 由于节点 5 处于网络中比较核心的位置, 因此重要度更高。

介数法是采用经过网络中某个节点的最短路径数目刻画节点重要性的指标, 具有一定合理性, 然而评价具有限制性。节点 12、14 由于其处于网络拓扑的边缘位置, 介数值均为 0, 因此无法比较其重要度。而在本文的算法中, 均可对这些节点进行比较。

节点收缩法综合考虑节点的度及经过节点的最短路径, 用网络凝聚度作为评价指标, 该方法不能考虑到电力通信网的影响因素, 因而具有一定的局限性。节点 9、11 在该方法的评价中具有相同的重要度, 而在本文算法中即可区分。

4 结语

本文采用 TOPSIS 算法, 将电力通信网的拓扑结构与电网影响因子结合起来, 得到一个电力通信网节点重要度的评价方法。

相对于以往的评价方法, 该方法既考虑了复杂网络的拓扑结构, 又考虑了通信节点所在站点因素^[22], 能够更准确地识别电力通信网中重要的节点。同时, 该方法具有很好的扩展性, 不局限于文中几个评价指标, 可以采用多种指标评价节点重要度^[23]。本文提出的方法具有较大的应用价值, 为电力通信网提供关键节点的保护, 为提高电力通信网的可靠性提供了重要依据。下一步还可以用该方法评价链路的重要性, 为电力通信网可靠性评估提供了新的依据。

参考文献

- [1] 姚致清. 通信规约实现与系统可靠性、安全性[J]. 继电器, 2008, 36(6): 68-70.
YAO Zhiqing. The relationship between communication protocol and system reliability and safety[J]. Relay, 2008, 36(6): 68-70.
- [2] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [3] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.

- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [4] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid connected inverter based on quasi synchronization principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [5] 刘涤尘, 冀星沛, 王波, 等. 基于复杂网络理论的电力通信网拓扑脆弱性分析及对策[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3615-3621.
- LIU Dichen, JI Xingpei, WANG Bo, et al. Topological vulnerability analysis and countermeasures of electrical communication network based on complex network theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3615-3621.
- [6] 姜志鹏, 张多林, 王乐, 等. 多维约束下指挥网络节点重要度的评估方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(3): 294-298.
- JIANG Zhipeng, ZHANG Duolin, WANG Le, et al. Evaluation method for node importance of command network with multiple constraints[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 16(3): 294-298.
- [7] 王班, 马润年, 王刚, 等. 加权网络节点重要性评估的改进节点收缩法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(7): 2122-2124.
- WANG Ban, MA Runnian, WANG Gang, et al. Evaluation method for node importance based on improved node contraction in weighted networks[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(7): 2122-2124.
- [8] 周遵仁, 黄遵国. 基于删除法的节点重要性分析及 OPNET 仿真[J]. 电脑知识与技术, 2013(4): 759-763.
- ZHOU Zunren, HUANG Zunguo. Analysis and OPNET based on the node the importance of the delete method simulation[J]. Computer Knowledge and Technology, 2013(4): 759-763.
- [9] 郭静, 王东蕊. 基于复杂网络理论的电力通信网脆弱性分析[J]. 电力系统通信, 2009, 30(9): 6-10.
- GUO Jing, WANG Dongrui. Vulnerability analysis on power communication network based on complex network theory[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(9): 6-10.
- [10] 周漩, 张凤鸣, 李克武, 等. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 1-7.
- ZHOU Xuan, ZHANG Fengming, LI Kewu, et al. Finding vital node by node importance evaluation matrix in complex networks[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 1-7.
- [11] 樊冰, 曾瑛, 唐良瑞. 基于信息熵的电力通信网脆弱性评价方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2138-2144.
- FAN Bing, ZENG Ying, TANG Liangrui. Vulnerability assessment of power communication network based on information entropy[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(9): 2138-2144.
- [12] PATIL S K, KANT R. A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of knowledge management adoption in supply chain to overcome its barriers[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(2): 679-693.
- [13] 娄云永. 电力通信网可靠性评价指标体系的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
- LOU Yunyong. The reliability evaluation index system research of electric power communication network[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [14] 曾瑛, 朱文红, 邓博仁, 等. 基于电网影响因子的电力通信网关键节点识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 102-108.
- ZENG Ying, ZHU Wenhong, DENG Boren, et al. Crucial node decision algorithm based on power network impact factor in electric power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 102-108.
- [15] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [16] 程晓荣, 张兰, 岳娇, 等. 基于粗糙集属性约简的评估模型在电力通信网风险评估中的应用及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 44-48.
- CHENG Xiaorong, ZHANG Lan, YUE Jiao, et al. Application and implementation of the assessment model based on rough set attribute reduction in power communication network risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 44-48.
- [17] 狄立, 郑征, 夏旻, 等. 基于快速密度聚类的电力通信网节点重要性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 90-95.
- DI Li, ZHENG Zheng, XIA Min, et al. Node importance

- evaluation of electric power communication network based on fast density clustering[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(13): 90-95.
- [18] VIDAL L A, MARLE F, BOCQUET J C. Using a Delphi process and the analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the complexity of projects[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(5): 5388-5405.
- [19] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(7): 1225-1228.
CHENG Qiyue. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2010, 30(7): 1225-1228.
- [20] CHEN D, LÜ L, SHANG M S, et al. Identifying influential nodes in complex networks[J]. *Physical A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2012, 391(4): 1777-1787.
- [21] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(11): 79-83.
TAN Yuejin, WU Jun, DENG Hongzhong. Evaluation method of node importance based on node contraction in complex networks[J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2006, 26(11): 79-83.
- [22] 胡莹莹, 吴黎军, 孙毅. 最大熵方法下的纯稳健信度估计[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(1): 15-20.
HU Yingying, WU Lijun, SUN Yi. The pure robust reliability estimation under the maximum entropy method[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(1): 15-20.
- [23] 史旭栋, 高岳林, 韩俊茹. 基于模糊推理的粒子群优化算法[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(2): 108-118.
SHI Xudong, GAO Yuelin, HAN Junru. Particle swarm optimization algorithm based on fuzzy reasoning[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(2): 108-118.

收稿日期: 2016-12-11; 修回日期: 2017-02-13

作者简介:

耿子惠(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理; E-mail: gzh400@163.com

崔力民(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力通信网评估; E-mail: clm2929639@163.com

舒勤(1958—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能电网与现代信号处理。E-mail: shuchin@163.com

(编辑 魏小丽)