

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190803

# 基于多属性决策的电力通信网的节点重要度计算方法

樊冰, 郑陈熹, 唐良瑞, 吴润泽

(华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 随着电网规模不断扩大, 作为电网的支撑网络, 电力通信网络的结构变得更加复杂且脆弱。预先识别和保护电力通信网中的重要节点是降低网络脆弱性的有效方法。为了全面地分析电力通信网中的节点, 从网络中节点的局部信息、全局信息以及节点承载的业务重要度量化节点的重要性, 提出一种基于多属性决策的电力通信网节点重要性计算方法。该算法首先根据各节点指标计算指标熵值以及指标之间的肯德尔系数, 确定指标权重, 结合多属性决策方法得到节点指标贴近度, 进而得到各节点的实际重要度。最后根据不同节点重要度计算方法, 分别攻击小型电力通信网、传统复杂网络、市级电力通信网中的节点, 分析对网络指标的影响, 证实该方法的合理性。  
**关键词:** 电力通信网; 脆弱性; 节点重要度; 业务重要度; 多属性决策

## Node importance evaluation method of electric power communication network based on multi-attributes decision making

FAN Bing, ZHENG Chenxi, TANG Liangrui, WU Runze

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** With the continuous expansion of power grid, as the support network of the grid, the structure of power communication network becomes more complex and fragile. Pre-identification and pre-protection of important nodes in power communication network is an effective way to reduce network vulnerability. In order to comprehensively analyze the nodes in the power communication networks, the local information of the nodes in the network, the global information, and the services importance carried by the nodes are chosen to quantify the nodes importance. At the same time, a method of calculating the importance of nodes in power communication network based on multi-attribute decision-making is proposed. Firstly, the algorithm calculates the index entropy values and the Kendall's coefficient according to the attributes of each node, determines the index closeness degree of each node through multi-attribute decision-making method, and then obtains the actual importance degree of each node. Finally, according to different node importance calculation methods, it attacks the nodes in small power communication network, traditional complex network and municipal power communication network respectively. The rationality of the method is verified by analyzing the impact on network indicators.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677065).

**Key words:** power communication networks; vulnerability; node importance; services importance; multi-attributes decision making

## 0 引言

随着智能电网的进一步发展, 电力系统对电力通信网的可靠性<sup>[1-3]</sup>、抗毁性和安全性<sup>[4-5]</sup>提出了更高的要求。在电力通信网中, 节点故障将导致具有高业务级别的业务中断或不可接受的延迟, 中断或

延迟将对电网系统(例如, 生产控制系统和状况监测系统)产生显著影响。因此, 有必要识别重要节点并保护重要节点, 以降低网络的脆弱性<sup>[6-8]</sup>或风险<sup>[9-11]</sup>。

现有的识别重要节点的方法主要基于网络物理拓扑结构, 例如节点中心性<sup>[12-13]</sup>、K-shell<sup>[14]</sup>、结构洞<sup>[15]</sup>、PageRank<sup>[16]</sup>。文献[12]介绍了几种节点中心性, 如度中心性、紧密中心性、介数中心性和特征向量中心性。多样的中心性指标能够从不同角度量

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677065)

化节点在物理拓扑的重要性, 若仅使用单一的中心性指标刻画节点重要性会有一定局限, 不能全面地分析节点。文献[14]提出了 K-shell 算法, 从网络的边缘节点开始向网络中心为每一个节点赋值, 越靠近中心 K-shell 的值越大。同时, 节点的影响力和传播性能也将随着该值增加。文献[15]提出了基于结构洞的 E-Burt 算法, 该算法将边的权重设为该边连接的两个节点度的乘积, 信息熵中的概率被替换成节点各条直连边的权重与总直连边权重的比值, 计算出各节点的熵度。将结构洞中节点度替换为各节点的熵度, 得到评价节点重要性的参数。文献[16]考虑到网络中的信息传输路由不是完全遵循最短路径, 因此其核心思想是通过随机游走介数中心性量化网络中节点的重要性。而该中心性中使用的节点度不能有效地辨识节点在拓扑中的地位, 为此作者使用 PageRank 算法获得节点权重替换中心性中的节点度矩阵, 通过改进后的中心性确定网络中节点的重要程度。

若仅使用一项节点重要度指标来量化电力通信网中节点的重要性, 将无法反映节点故障对网络拓扑造成的整体影响。文献[13]中分析节点的邻居节点构成网络, 得到节点的局部指标。使用各节点到网络剩余节点距离的倒数和作为节点的全局指标。同时结合移除节点对网络拓扑造成的影响大小作为节点的应急指标。然而对三个指标进行融合时仅将三个指标相乘, 未考虑不同量纲带来的影响。文献[17]通过考虑指标之间的相关性计算各指标权重, 加权求和得到节点的重要性。文献[18]中使用聚类系数以及节点度构成一种节点影响力评价指标, 该指标需要节点的局部信息, 不易辨识出网络中的边界节点, 导致节点重要度计算准确性较低。文献[19]使用度中心性、紧密中心度以及中介中心性量化节点重要性, 结合加权 TOPSIS 的方法得到各节点的贴适度作为节点重要度。其中度中心性是局部信息指标, 紧密中心度以及中介中心性为全局指标, 该方法综合了节点的局部信息以及全局信息, 对节点重要性进行评价。

上述算法仅考虑节点对网络物理拓扑的影响, 而在电力通信网中分析节点重要度时还应考虑网络中传输的电力业务。电力通信网中承载着不同类型的电力业务, 既包括了厂站数据采集、主站间计算机通信等实时控制区业务, 也包括了行政电话、雷电检测系统等管理信息区业务。为此, 通常使用业务重要度量化电力通信网中业务的重要程度。若仅从物理拓扑分析得到的重要节点可能承载的业务重要度较低, 此时这些重要节点失效对网络连通度等

网络拓扑指标影响较大, 但对于电网业务影响较小。因此需要综合网络拓扑以及业务分布等因素, 全面地评估电力通信网中节点的重要性。文献[20]使用节点收缩法作为节点静态重要性, 并根据节点承载的业务数量和种类计算节点承载业务的重要度, 最后通过 AHP 算法确定两个节点重要性指标的权重, 得到最终的节点重要度。节点收缩法是一种计算节点全局信息的方法, 即该方法综合考虑了节点全局信息与节点承载的业务重要度大小, 但是忽略节点在局部连接的重要性。同时, AHP 算法的引入具有较强的主观性。

综上所述, 为了全面、客观地计算电力通信网中节点重要度, 本文从节点的局部、全局信息以及承载的业务重要度分析节点在电力通信网中的地位, 从三个指标量化节点重要性。本文提出一种基于多属性决策的电力通信网节点重要度计算方法, 该方法分别使用熵权法以及肯德尔系数计算不同指标权重, 结合多属性决策分析方法融合多个指标, 通过融合得到的贴适度大小确定节点实际重要度。最后在传统网络、现实电力通信网进行仿真分析, 验证算法的合理性。

## 1 节点重要度指标计算

电力通信网特有的拓扑结构与其他类型的无标度网络有一定区别, 若仅考虑节点的局部拓扑, 会忽略边界节点在网络拓扑中的关键位置。同时仅从网络拓扑分析得到的重要节点可能承载的业务重要度较低, 拓扑中的关键节点失效对于电网业务影响较小。因此, 本节将从三个节点重要度指标综合考虑节点在电力通信网中的地位, 分别为局部信息  $L$ 、全局信息  $GT$  以及节点承载的业务重要度  $SI$ 。

本文中的电力通信网拓扑结构表示为  $G = \{V, E\}$ , 其中  $V = \{v_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。  $N$  为网络中节点数;  $E$  表示网络中的边集。电力业务矩阵  $B$  为  $N \times K$  矩阵,  $K$  表示网络中业务类型总数。

### 1.1 局部信息指标

一个节点的局部信息通常指的是节点的邻域、二级邻域等为该节点重要性提供的信息。本文选用节点关键度<sup>[21]</sup>及节点度来量化节点的局部信息, 得到量化后指标  $L$ 。节点关键度定义为邻居节点间最短路径经过该节点的路径数与总路径数的比值, 对于一个链式拓扑结构而言, 除了末梢节点以外, 每一个节点都只有两个邻居节点, 此时节点的关键度达到最大值 1。对于星形耦合拓扑而言, 中心节点连接着数个邻居节点同时邻居节点间没有连接, 此时中心节点的关键度为 1。虽然两种节点的关键度

都达到了最大值,但是链式结构主要存在于网络的末梢或是连接网络不同社区的边界节点,而星形耦合拓扑会随着邻居节点的个数而增加这类节点的局部信息。为了区分星形耦合和链式拓扑结构两种极端情况,本文引入节点度来反映邻居节点的规模。定义节点  $i$  的局部信息为  $L(i)$ ,可表示为

$$L(i) = \frac{Kc(i)}{\max(Kc)} \quad (1)$$

其中,

$$Kc(i) = \frac{P(i)}{C(i)} + \frac{D(i)}{\max(D)} \quad (2)$$

式中:  $P(i)/C(i)$  表示节点  $i$  的节点局部关键度;  $P(i)$  表示在节点  $i$  的邻域中,任意节点对之间的最短路径中,经过节点  $i$  的路径数;  $C(i)$  表示在节点  $i$  的邻域中,任意节点对之间的最短路径数总和;  $D(i)$  为网络中节点  $i$  的度数,所有节点的度数组成向量  $D$ ;  $Kc$  为所有节点经过式(2)计算得到的向量。

### 1.2 全局信息指标

电力通信网的物理拓扑中存在较多的末梢节点与边界节点,仅从局部信息指标不能辨识出两类节点重要度的差异,并且两类节点的重要度有较大的差别。末梢节点在网络中具有少量连接,移除末梢节点对网络的连通性影响不大;边界节点连接着网络中各个区块,移除边界节点将会断开区块间的通信,将网络裂解为数个子网。为此,本文引入全局信息  $GT(i)$  量化节点位置的重要性,同时区分开末梢节点与边界节点。

$$GT(i) = \frac{BC(i)}{\max(BC)} \quad (3)$$

式中:  $BC$  为点介数向量;  $BC(i)$  表示节点  $i$  的点介数。点介数的大小取决于整个网络中经过该节点的最短路径数。两个不同区块间节点对的最短路径都需要通过边界节点,导致边界节点的点介数较大,而末梢节点则相反。所以使用点介数作为全局信息指标能够区分开主干路节点和边界节点。

### 1.3 节点承载的业务重要度

在电力通信网中传输的电力业务存在着明显的重要度差别,部分重要度较高的电力业务是否正常传输决定了电网能否安全稳定运行,但通常这部分业务传输所需流量较小。相反地,重要度较低的电力业务通常包括企业管理、视频监控等类型,不直接参与电力生产或控制,传输所需流量较大。如安全分区 I 和 II 中的业务包含继电保护、广域向量测量、安稳系统等与电力生产、控制相关联的业务,这类业务具有较高的业务重要度,但承载业务的流

量不大。相反地,安全分区 III 和 IV 中的业务包含了视频监控、视频会议、变电站视频监控等,业务不会影响电力生产、控制,所以该类型业务重要度不高,却需要传输大量的流量。

业务重要度通常是由层次分析法计算得到。层次分析法中专家判断业务重要程度具有各自的考虑因素,专家的个人经验会影响层次分析法中判决矩阵的建立,进而影响业务重要度计算结果的准确性。不同电力业务对同一传输性能指标(如时延、误码率)的要求存在差异性。越重要的业务要求通信系统提供更高的优先级以满足业务传输需求,从而确保电力生产能够安全稳定运行。业务越重要,对时延、误码率等传输性能指标要求越严苛。定义节点承载的业务重要度归一化后为  $SI(i)$ ,  $i \in [1, N]$ 。

$$SI(i) = \frac{l(i)}{\max(l)} \quad (4)$$

其中,

$$l(i) = \sum_{s=1}^N \sum_{d=1}^N \sum_{k=1}^K \tau_{s,d}(i) \times b(s,d,k) \times I(k) \quad (5)$$

$$\tau_{s,d}(i) = \begin{cases} 1, & \text{if } i \in \text{path}(s,d) \\ 0, & \text{if } i \notin \text{path}(s,d) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $SI(i)$  表示经过归一化处理后节点  $i$  承载的业务重要度;  $l(i)$  表示节点  $i$  实际承载的业务重要度;  $K$  表示业务类型总数;  $I$  表示业务重要度向量,  $I(k)$  表示第  $k$  类业务的单位流量;  $b(s,d,k)$  表示节点  $s$  与节点  $d$  之间存在第  $k$  类业务的数量;  $\text{path}(s,d)$  表示业务从节点  $s$  到节点  $d$  的传输路径;  $\tau_{s,d}(i)$  为一个二值函数,当节点  $i$  位于业务源宿节点分别为  $s$  和  $d$  的传输路径上时,说明该业务经过节点  $i$ ,  $\tau_{s,d}(i)=1$ ,相反地,  $\tau_{s,d}(i)=0$ 。节点生成、接收、转发的业务量大或业务重要度越高,对应的  $SI$  值越大。

## 2 电力通信网节点重要度计算方法

为了全面刻画电力通信网中节点的重要性,应从多个指标综合量化节点的重要性并进行评价。本文提出一种基于多属性决策分析的电力通信网节点重要度计算方法,该方法综合考虑各指标提供的信息量大小以及指标之间的相关性,得到客观的指标权重。其中,本文使用信息熵计算各个指标提供的信息量,即指标内部的差异性,得到指标的信息熵权重;指标与指标之间的相关性使用肯德尔相关系数进行计算,用于评价指标与指标之间的关联程度,得到指标的肯德尔系数权重。最后本文使用各指标权重对指标矩阵进行加权,结合 TOPSIS<sup>[13]</sup> 完成对多项指标融合,得到节点到理想解的贴近度,进而

得到各节点的实际重要度。

设电力通信网中共有  $N$  个节点, 需要融合  $m$  个节点重要度指标, 获得各节点的实际重要度。其中, 第  $i$  个节点的第  $j$  个指标值记为  $a_{ij}$ , 通过第 2 节点重要度指标分别计算各节点对应的多个指标值, 得到节点指标矩阵  $A$ 。设第  $j$  个指标的权重为  $w_j (j=1, \dots, M, \sum w_j=1)$ 。

### 2.1 信息熵权重

熵权法是一种传统的指标权重计算方法, 使用指标内数据差异性大小衡量指标提供信息量多少。当数据差异性越大, 表明该指标能够清晰地量化节点重要性。因此, 本文通过熵权法计算各指标的信息熵权重, 步骤如下。

(1) 计算第  $i$  个节点在第  $j$  个指标下的比重  $g_{ij}$ , 见式(7)。

$$g_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^N a_{ij}} \quad (7)$$

(2) 计算第  $j$  个指标的熵值  $e_j$ , 见式(8)。

$$e_j = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N g_{ij} \ln g_{ij} \quad (8)$$

(3) 计算第  $j$  个指标的信息熵权重  $ew_j$ , 见式(9)。当节点指标的熵值越小, 指标提供的信息量越大, 权重越大; 同理, 当节点指标的熵值越大, 指标提供的信息量越小, 权重越小。

$$ew_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m 1 - e_i} \quad (9)$$

### 2.2 肯德尔系数权重

肯德尔系数通常用于衡量指标与指标之间的关联性。对于都具有  $N$  个元素的两种节点指标, 假设分别为  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  和  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ 。数据对是指相同节点对应的两个节点重要度指标, 即  $(x_i, y_i)$  或  $(x_j, y_j)$ 。当  $x_i > x_j$  同时  $y_i > y_j$  或者  $x_i < x_j$  同时  $y_i < y_j$  时, 说明  $(x_i, y_i)$  与  $(x_j, y_j)$  这对数据是相关联的, 反之则为不相关。基于此, 两个节点重要度指标的肯德尔相关系数见式(10)。

$$\tau_{x,y} = \frac{n_c - n_d}{\sqrt{\left[ n_0 - \sum_{i=1}^{s_1} \frac{i(i-1)}{2} \right] \times \left[ n_0 - \sum_{i=1}^{s_2} \frac{i(i-1)}{2} \right]}} \quad (10)$$

式中:  $n_c$  和  $n_d$  分别表示相关联和不关联的数据对个数;  $X$  和  $Y$  中相同元素分别组合成小集合;  $s_1$  和  $s_2$  分别表示  $X$  和  $Y$  中拥有的小集合数;  $n_0$  是常量, 见式(11)。

$$n_0 = \frac{N(N-1)}{2} \quad (11)$$

第  $j$  个指标与其他指标的整体肯德尔相关系数可定义为  $\theta_j$ , 见式(12)。

$$\theta_j = \frac{\sum_{i=1}^M \tau_{j,i}}{M} \quad (12)$$

式中,  $M$  为指标总数。

当  $\theta_j$  越大时, 说明该指标与其他指标相关性较大, 对辨识重要节点的贡献越弱。设第  $j$  个指标的肯德尔系数权重为  $kw_j$ , 见式(13)。

$$kw_j = \frac{\theta_j}{\sum_{i=1}^M \theta_i} \quad (13)$$

### 2.3 加权 TOPSIS 融合

通过指标的信息熵权重以及肯德尔系数权重后, 能够客观量化出指标内部信息量以及指标之间的关联性, 基于此得到用于 TOPSIS 加权的客观权重, 见式(14)。

$$w_j = \frac{ew_j}{\sum_{i=1}^M kw_i} \quad (14)$$

由式(14)可知, 当指标  $j$  能够提供较大信息量, 同时指标  $j$  与其他节点重要度指标关联性较小时, 指标  $j$  的权重越大。在得到各指标权重后, 得到加权节点指标矩阵  $Y$ , 见式(15)。

$$Y = (y_{ij}) = \begin{bmatrix} w_1 a_{11} & \cdots & w_m a_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ w_1 a_{N1} & \cdots & w_m a_{Nm} \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据矩阵  $Y$  确定正理想解  $F^+$  和负理想解  $F^-$ , 即

$$\begin{cases} F^+ = \left\{ \max_{i \in [1, N]} (y_{i1}, \dots, y_{im}) \right\} = \{ y_1^{\max}, \dots, y_m^{\max} \} \\ F^- = \left\{ \min_{i \in [1, N]} (y_{i1}, \dots, y_{im}) \right\} = \{ y_1^{\min}, \dots, y_m^{\min} \} \end{cases} \quad (16)$$

确定矩阵  $Y$  的正、负理想解后, 计算每个节点到正、负理想解的距离, 分别为  $D_i^+$  和  $D_i^-$ , 见式(17)。

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^{\max})^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^{\min})^2} \end{cases} \quad (17)$$

得到第  $i$  个节点的贴近度  $Z_i$ , 即为节点  $i$  经过

本文算法融合多个指标后得到的节点重要度值, 见式(18)。

$$Z_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (18)$$

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真参数设置

文献[22]中将电力通信网中运行的业务划分为五类, 使用特征指标评价方法<sup>[23]</sup>求得同类业务的重要度, 得到五类业务重要度向量  $I=[0.98,0.83,0.55,0.33,0.15]$ 。业务总类型数  $K=5$ 。网络中各时刻传输的业务不一定相同, 仿真中业务矩阵  $B$  随机生成, 仅对业务总数进行约束。为了简化仿真, 忽略网络中的边权, 即网络中边权全为 1。

本文选用两种方法来验证节点重要度排序的合理性, 第一种方法是通过计算移除节点对网络物理拓扑的影响来验证, 第二种方法是通过计算移除节点对电力通信网业务的影响来验证。移除节点对网络物理拓扑的影响使用网络效率<sup>[24]</sup> (Network Efficiency, NE)来量化。

$$NE(G) = \frac{1}{N(N-1)} \times \sum_{\substack{i \neq j \\ i, j \in V}} \frac{1}{d_{ij}} \quad (19)$$

式中:  $N$  为网络  $G$  的节点个数;  $V$  表示网络  $G$  的节点集合;  $d_{ij}$  表示节点  $i$  与节点  $j$  的距离。选择网络效率作为网络指标时, 最优攻击方法需要从关键节点集合的角度分析, 不能区分集合内节点的关键程度。因此对于给定的节点重要度排序未有针对网络效率的最优攻击方法。

移除节点对电力通信网业务的影响  $R$  由移除节点后网络剩余的业务重要度表示。被移除节点所承载的业务不进行重路由, 即网络中业务的损失只包括移除节点的业务重要度, 不影响其他节点承载的业务及流量。移除节点不影响其他节点承载的业务意味着对于给定的网络结构  $G$  及业务矩阵, 总是存在针对  $R$  的最优攻击方法。本文选用文献[20]提出的算法作为对比算法, 该对比算法也同时考虑节点的拓扑信息及承载的业务重要度。通过比较不同算法在网络效率以及网络剩余业务重要度的下降趋势, 来验证辨识结果的合理性。本文仿真中将移除总点数的 50%, 研究各网络指标的下降趋势。

未移除节点前,  $NE$  和  $R$  的初值都为 1, 表示网络效率、网络中业务未受到影响。当节点被移除时, 两种指标开始下降。下降越快, 表明移除节点对于物理拓扑以及电力业务传输越重要, 排序越合理。

当节点全被移除时,  $NE$  和  $R$  的值为 0。

#### 3.2 仿真结果分析

为了证明本文算法的准确性, 分析不同算法对网络指标的影响, 本文选取三种类型的网络, 分别为小型电力通信网、BA 网络以及市级电力通信网。小型电力通信网节点数较少, 能够清楚定位出各节点所处位置, 易于分析。BA 网络是典型的无标度网络, 基于复杂网络的研究通常会在无标度网络上进行仿真。市级电力通信网独特的拓扑特性与随机生成的无标度网络有着明显区别, 需要与传统的无标度网络区分开。

##### 3.2.1 小型电力通信网仿真

小型电力通信网拓扑如图 1 所示。其中 1 号节点为省级调度中心, 13 号节点为地区调度中心, 14 号节点为 220 kV 变电站, 其余节点均为 500 kV 变电站。

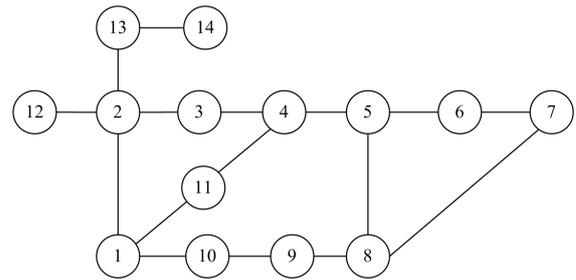


图 1 小型电力通信网拓扑

Fig. 1 Topology of the small power communication network

网络中具体的业务分布情况在文献[22]中给出。

作为中调, 节点 1 需要与除了节点 14 以外的所有节点建立业务连接。同时节点 14 由节点 13 负责调度。中调与地调以及 500 kV 变电站之间业务类型、数量较多, 以管理、调度类业务为主。变电站与变电站之间传输继电保护等生产控制类业务, 类型单一, 数量较少, 然而其中包含重要度最高的业务。根据第 1 节中的节点重要度指标计算得到节点各指标值, 见表 1。

表 1 网络中节点各指标值

Table 1 Indicator values of nodes in the network

节点	$L$	$GT$	$SI$	节点	$L$	$GT$	$SI$
1	0.87	0.57	1	8	0.75	0.38	0.27
2	1	1	0.35	9	0.75	0.27	0.32
3	0.75	0.48	0.10	10	0.75	0.34	0.37
4	0.87	0.70	0.27	11	0.75	0.11	0.31
5	0.75	0.63	0.22	12	0.12	0	0.05
6	0.50	0.10	0.07	13	0.75	0.35	0.18
7	0.50	0.04	0.18	14	0.12	0	0.10

根据表 1, 结合第 2 节提出的多属性决策算法, 计算得到综合节点重要度  $Z$ 。根据  $Z$  进行排序, 与对比算法进行对比, 比较前 50% 节点, 对比结果见表 2。

表 2 不同算法对应的节点排序结果

Table 2 Nodes ranking according to different algorithms

节点排名	本文算法	对比算法
1	1	1
2	2	2
3	4	10
4	5	9
5	10	11
6	8	13
7	9	14

从表 2 中的排序结果能够发现, 节点 1、2 在不同辨识算法下其重要程度排序结果排名前 2。同时节点 1 作为中调, 其重要性应最高, 说明两种算法都具有一定合理性。从图 1 可知, 节点 14 为 220 kV 变电站, 在整个网络拓扑结构中属于边缘节点, 节点 4、5 的电压等级以及拓扑位置明显优于节点 14, 然而对比算法中节点 14 的重要度却高于节点 4、5, 与实际情况不符。

为了更直观地描述移除节点对网络指标的影响, 本文通过依次移除不同算法对应的重要性排序中靠前的节点, 观察各网络指标下降趋势, 见图 2。从图 2(a) 可以看出, 网络效率按照本文算法移除节点下降速度较快, 说明本文算法移除节点对网络物理拓扑影响明显优于对比算法。从图 2(b) 可以看出, 网络剩余业务重要度在两种辨识算法下差别较小, 说明在该业务分布下不同辨识算法移除节点对网络业务影响结果相似。

### 3.2.2 BA 网络仿真

BA 网络模型是一种传统的复杂网络模型, 其满足的幂律特性广泛存在于现实生活中。本文通过固定网络拓扑结构, 变更网络中传输的业务矩阵来模拟实际网络中业务传输随着时间变化的过程, 观察一段时间内不同排序方法对网络指标的影响。

设置 BA 网络模型中包含 100 个节点, 每一个随机生成的业务矩阵下五类业务的业务总数为 400 个。随机生成 100 个业务矩阵, 每个业务矩阵下使用不同排序方法移除节点, 记录下移除节点对网络指标的影响。累加 100 次网络指标变化情况, 求取均值, 仿真一段时间内网络指标的下降趋势, 其余仿真参数设置同 3.1 节。

如图 3(a)、图 3(b), 用多个随机业务矩阵表示在一段时间内观察不同排序算法对不同网络指标的影响。从图 3(a)、图 3(b) 可以看出, 按照本文算法

移除重要节点对网络物理拓扑以及业务的影响明显大于对比算法。同时图 3(b) 中在移除较少节点时, 网络剩余业务重要度下降较快。在移除一定数量节点后, 网络结构已经发生变化, 甚至解裂为多个子图, 继续移除节点对网络指标的影响将逐渐减少。因此分析不同算法辨识效果时, 应关注移除节点较少时各网络指标的变化。

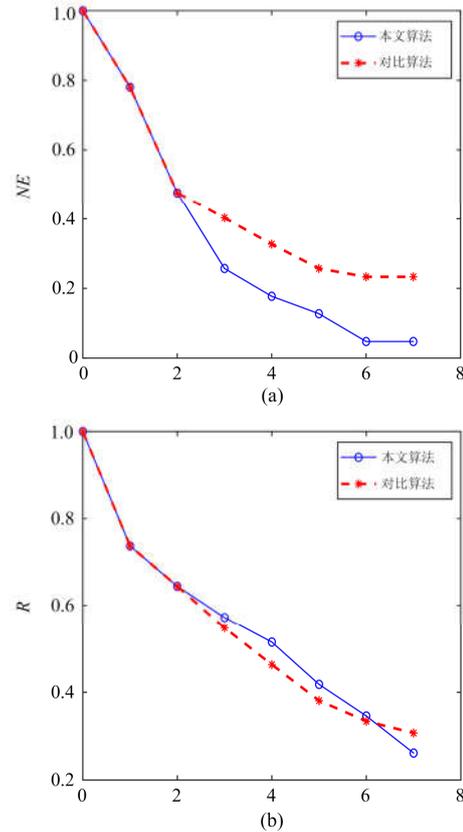
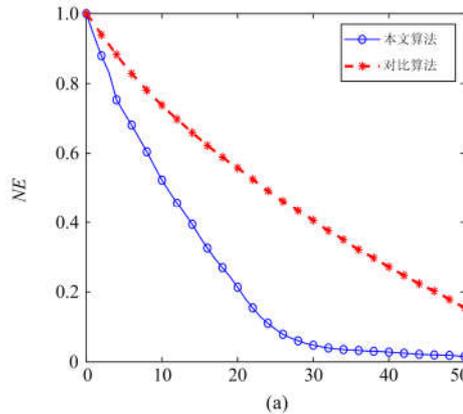


图 2 小型电力通信网中基于不同算法移除节点对网络指标的影响

Fig. 2 Effect of removing nodes based on different algorithms on network indicators in the small power communication network



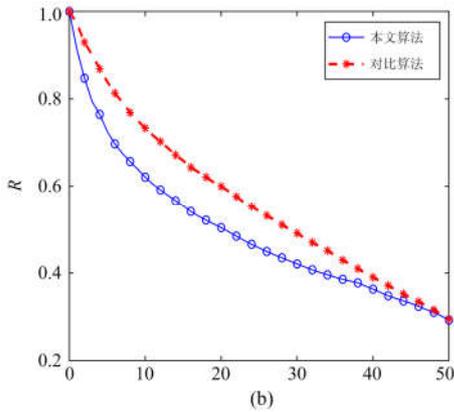


图 3 小型电力通信网中基于不同算法移除节点对网络指标的影响

Fig. 3 Effect of removing nodes based on different algorithms on network indicators in the BA network

### 3.2.3 市级电力通信网仿真

本文使用某市级电力通信网，由电压等级大于 110 kV 的变电站以及调度中心构成，其中包括 5 座 550 kV 变电站。该网络包含 195 个节点、514 条边，网络拓扑如图 4。从图中可以看出网络中区块划分并不明显，并且未出现断开一个节点使得一个区块从网络断开的情况，侧面说明该市电力通信网抗毁性较高。

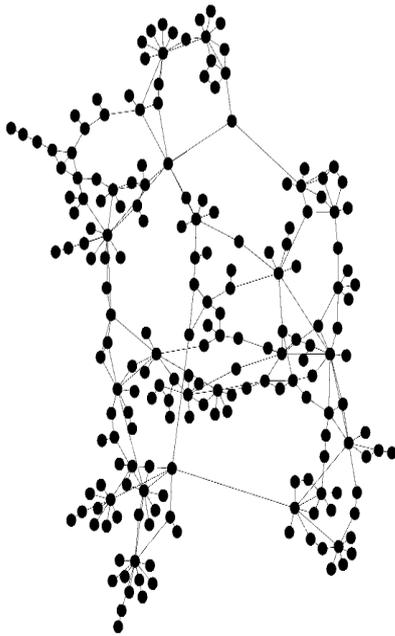


图 4 某市电力通信网拓扑

Fig. 4 Topology of a municipal power communication network

设定单个业务矩阵包含业务总数 800 个，根据不同节点重要度排序算法，移除排序中前 50% 的节

点，随机生成 100 个业务矩阵，其余仿真参数同 3.1 节，观察移除节点对 NE 和 R 的影响，如图 5。

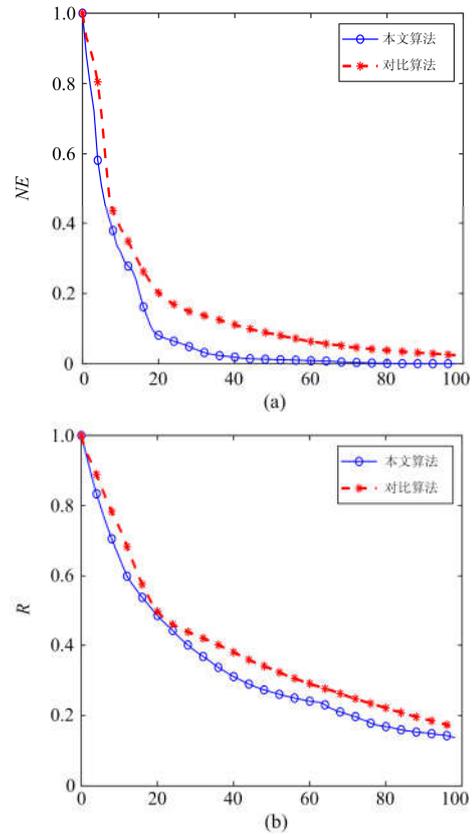


图 5 某市级电力通信网中基于不同算法移除节点对网络指标的影响

Fig. 5 Effect of removing nodes based on different algorithms on network indicators in a municipal power communication network

图 5 的仿真结果显示，本文算法不仅能辨识网络物理拓扑中的重要节点，同时辨识出网络中承载业务量较大的重要节点。与对比算法相比，基于本文算法的重要节点辨识效果更合理。其中节点重要度排名前五的节点包括了 2 个 500 kV 变电站、3 个 220 kV 变电站。使用本文算法计算得到的节点实际重要度来标记拓扑中相应节点，结果如图 6。当实际重要度的值越小时，节点越小；当实际重要度的值增大时，节点越大。从图 6 可以看出，重要节点的分布较分散，但围绕着拓扑中心分布。拓扑中心节点的节点重要度并不高，这是由于电力通信网中传输的大部分电力业务并非必须经过中心节点。同时，连接区块与区块之间的边界节点拓展到 2 个及以上，使得区块之前的电力业务不会集中通过某个边界节点。综上所述，本文算法能够综合节点局部、全局信息以及承载业务的重要度，合理量化电力通

信网中节点的重要性。

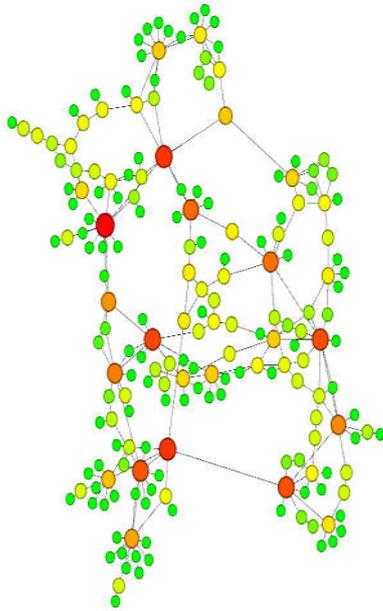


图 6 包含标记的某市级电力通信网拓扑图

Fig. 6 Topology of a municipal power communication network with marks

#### 4 结论

在电力通信网中, 预先识别和保护重要节点是降低网络脆弱性的有效方法, 针对当前电力通信网中节点重要度, 本文从节点的局部信息、全局信息以及承载的业务重要度来量化节点的重要性, 并提出一种多属性决策的电力通信网的节点重要度计算方法。该方法使用熵权法量化指标内数据信息量, 使用肯德尔相关系数量化指标与指标之间的关联性。当指标的信息量越大, 同时该指标与其他重要度指标关联性较弱时, 该指标的客观权重越高。最后结合多属性决策分析方法融合三个指标, 获得各节点贴适度, 从而获得电力通信网中节点的重要度。在小型网络、BA 网络以及市级电力通信网中进行仿真, 验证节点重要度计算方法的合理性, 并在 BA 网络与市级电力通信网随机生成多个业务矩阵来仿真实际中电力业务传输, 观察不同节点重要度排序方法对网络指标的影响。与对比算法相比, 本文提出的基于多属性决策的电力通信网节点重要度计算方法移除重要节点对网络指标影响较大, 充分说明本文算法的合理性及准确性。

#### 参考文献

[1] AL-WAFI E, AL-SUBHI A, AL-MUHAINI M. Reliability assessment of a practical power system using Monte

Carlo simulation[C] // 2015 IEEE Saudi Arabia Smart Grid (SASG), December 7-9, 2015, Jeddah, Saudi Arabia.

- [2] DING Ying, LI Chao, JIN Yao, et al. Reliability assessment of power system based on topology logic relation[C] // 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), November 26-29, 2015, Changsha, China.
- [3] CHENG Lin, LIU Manjun, YE Congqi, et al. An extended minimal cut set algorithm applied into overall power system reliability assessment[C] // 2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014), October 20-22, 2014, Chengdu, China.
- [4] JIANG Dairu, TIAN Dan, LIU Xintong, et al. Security analysis of topology structure of electric power communication network[C] // 2016 First IEEE International Conference on Computer Communication & the Internet, October 13-15, 2016, Wuhan, China.
- [5] JIANG Dairu, LI Yiyang, LIU Xintong, et al. The implementation and application of security evaluation system of electric power communication network[C] // 2016 Second IEEE International Conference on Computer & Communications, October 14-17, 2016, Chengdu, China.
- [6] JI Chenchen, YU Peng, LI Wenjing, et al. Comprehensive vulnerability assessment and optimization method for smart grid communication transmission systems[C] // 2017 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management, May 8-12, 2017, Lisbon, Portugal.
- [7] GUO Qingrui, XIE Peng, LI Feng, et al. Research on linkage model of network resource survey and vulnerability detection in power information system[C] // 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), March 15-17, 2019, Chengdu, China.
- [8] WANG Bo, WANG Xunting. Vulnerability assessment method for cyber physical power system considering node heterogeneity[C] // 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), May 22-25, 2018, Singapore, Singapore.
- [9] WANG Zhuoyang, David J. Hill, CHEN Guo, et al. Power system cascading risk assessment based on complex network theory[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2017, 482: 532-543.
- [10] YU Shiwen, HOU Hui, WANG Chengzhi, et al. Review on risk assessment of power system[J]. Procedia Computer Science, 2017, 109: 1200-1205.
- [11] RUSEK K, GUZIK P, CHODA P. Effective risk

- assessment in resilient communication networks[J]. Journal of Network and Systems Management, 2016, 24(3): 491-515.
- [12] LIU Fengzeng, XIAO Bing, LI Hao, et al. Complex network node centrality measurement based on multiple attributes[C] // 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), July 2-4, 2018, Guiyang, China.
- [13] DU Yuxian, GAO Cai, HU Yong, et al. A new method of identifying influential nodes in complex networks based on TOPSIS[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2014, 399: 57-69.
- [14] KITSAK M, GALLOS L K, HAVLIN S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. Nature Physics, 2010, 6(11): 888-893.
- [15] HU P, MEI T. Ranking influential nodes in complex networks with structural holes[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2018, 490: 624-631
- [16] AGRYZKOV T, OLIVER J L, TORTOSA L, et al. A new betweenness centrality measure based on an algorithm for ranking the nodes of a network[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 244: 467-478.
- [17] LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, WANG Huifang, et al. CRITIC-based node importance evaluation in skeleton-network reconfiguration of power grids[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2018, 65(2): 206-210.
- [18] 吴润泽, 吴万旭, 李莉, 等. 基于节点影响力的电力通信网拓扑结构诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 147-155.
- WU Runze, WU Wanxu, LI Li, et al. Topology diagnosis of power communication network based on node influence[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 147-155.
- [19] 耿子惠, 崔力民, 舒勤, 等. 基于 TOPSIS 算法的电力通信网关键节点识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 78-86.
- GENG Zihui, CUI Limin, SHU Qin, et al. Crucial node decision algorithm based on TOPSIS algorithm in electric power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 78-86.
- [20] 王汪兵, 王先培, 尤泽樟, 等. 电力通信网关键节点辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 44-49.
- WANG Wangbing, WANG Xianpei, YOU Zezhang, et al. Research on key node identification method in electric power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 44-49.
- [21] 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.
- [22] 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]. Proceedings of the CSEE, 2014, 36(9): 2138-2144.
- [23] 樊冰, 唐良瑞. 电力通信网脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1191-1197.
- FAN Bing, TANG Liangrui. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1191-1197.
- [24] 梁艳花. 复杂网络中节点重要性排序算法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- LIANG Yanhua. Research on the sequence algorithm of the nodes importance in complex network[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-23

作者简介:

樊冰(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力通信网规划, 电力通信网可靠性、生存性和保密通信; E-mail: fanbing@ncepu.edu.cn

郑陈熹(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力通信网脆弱性分析; E-mail: 3079996990@qq.com

唐良瑞(1966—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力通信、通信与信息技术。E-mail: tangliangrui@163.com

(编辑 许威)