

基于电网影响因子的电力通信网关键节点识别

曾 瑛¹, 朱文红¹, 邓博仁¹, 罗 云²

(1. 广东电网电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 四川创立信息科技有限责任公司, 四川 成都 610093)

摘要: 作为电力系统的通信专网, 电力通信网具有明显的行业特点。为准确识别网络关键节点, 从电力通信网与电网的特殊关系分析节点的重要性, 提出电网影响因子的概念。根据节点所处的站点在电网中的地位及作用, 即站点类别因素和负荷因素两方面评价节点权重。然后利用电网影响因子, 并结合所定义的聚合系数指标, 分析电力通信网中重要节点的分布密集状况, 得到各节点在网络拓扑中的相对重要性。仿真表明, 相对于现有其他算法, 该算法能够更好地结合电力通信网的应用特点区分网络拓扑中节点位置相似的节点的重要性, 在电力通信网运行风险分析中具有较大的参考价值。

关键词: 电力通信网; 关键节点; 电网影响因子; 聚合系数

Crucial node decision algorithm based on power network impact factor in electric power communication network

ZENG Ying¹, ZHU Wenhong¹, DENG Boren¹, LUO Yun²

(1. Power Dispatch and Control Center of Guangdong Power Grid Corp, Guangzhou 510600, China;

2. Sichuan Enrising Information Technology Co., Ltd., Chengdu 610093, China)

Abstract: As the exclusive communication network for power system, the electric power communication network has obvious characteristics of the electric power industry. In order to identify the crucial nodes of network accurately, the index of power network impact factor is proposed based on the special relationship between power system and power communication network. The nodes weights are evaluated on the basis of the category factor and the load factor, namely the position and function in the station where the nodes belong. Meanwhile, combining with a new definition for coefficient polymerization indexes, it analyzes the distribution state of the critical nodes. The simulation results show that the proposed algorithms can distinguish the importance degree of the nodes with similar topological positions by combining the application characteristics of power communication network, and has great reference value in power communication network operational risk analysis.

Key words: electric power communication network; critical nodes; power network impact factor; coefficient polymerization

中图分类号: TM73

文章编号: 1674-3415(2016)02-0102-07

0 引言

随着智能电网建设的推进, 作为电力系统通信专网的电力通信网承载的业务不断增多, 网络结构随之越加复杂化。网络关键节点识别在电力通信网运行管理中具有很高的指导意义, 研究表明, 无标度网络 5%~10%的关键节点受到攻击并失效后, 整个网络将会全面崩溃^[1-2]。通过保护或备份关键节点, 能够提高电力通信网抵抗攻击的能力, 增强网络抗毁性, 加强网络防护能力, 从而降低网络运行风险。

节点重要性是识别网络关键节点的主要依据, 现有节点重要性评估研究本质上均是基于图论展开的^[3-12], 主要分为两类方法: 第一类方法侧重于分

析节点区别于其他节点的显著性特征, 利用节点的某些属性作为区分节点重要性的测度指标, 如节点的度、介数、特征向量等, 其中介数法通过计算网络节点间最短路径经过节点的数目, 即用节点介数评价节点重要性, 但其计算复杂程度较高, 并不适用于识别复杂网络关键节点; 第二类方法通过分析删除节点后对网络整体的影响程度衡量节点重要性, 如节点收缩法^[1]通过分析节点收缩前后网络凝聚度的变化评估节点重要性, 以最短路径为基础, 综合考虑节点的连接度和节点在网络中的位置, 较介数法更为直观有效; 文献[9]在此基础上提出的改进节点收缩法考虑了节点间相互作用的强弱程度, 利用加权网络刻画节点间的作用细节, 但是节点收

缩法及其改进方法均无法区分环网中位置条件相同节点的重要性。

电力通信网具有明显的行业特点,在评价电力通信网节点重要度时,现有评价方法仅在通信网络层面考虑问题,很少从电力通信网与电网的特殊关系来分析节点的重要性,并未考虑网络节点自身地位和作用的区别,不能够全面、有效地反映出网络节点在拓扑层的重要性。在电力通信网中,各节点的地位及作用存在明显差别,省级电力通信骨干网中的重要节点如省级调度中心和 500 kV 变电站的地位及作用大于其他节点,通过图论评价节点重要性时,此类重要节点应具有区别于其他次要节点的权重值。

本文考虑电力通信网行业背景,结合网络节点所在站点在电网中的影响分析,利用电网影响因子作为通信网节点权重的评价指标,并定义节点聚合系数,将节点权重和节点紧密程度相结合,全面分析网络节点在网络拓扑中的重要性,作为识别网络关键节点的依据,为加强电力通信网风险管理与控制提供参考。

1 电网影响因子

作为电力系统的通信专网,电力通信网具有较强的行业特点,通信网节点与电网站点高度重合。从通信网络角度来看,电网的各类站点如调度中心、变电站或电厂仅仅是通信节点,但实际上这些节点所处的电网站点在电网中的地位及作用存在较大区别。定义电网影响因子,用于分析电力通信网节点在电网所处地位和影响力。

电力通信网络节点所在站点中有不同类别,如调度中心、变电站、电厂等,这些站点在电网中存在电压等级或管理等级以及规模大小的区别,其等级的高低能直接反映站点在电网的影响程度;另外,站点负荷因素,包括站点或其服务范围内的负荷等级和负荷大小,能间接衡量站点在电网的影响程度。因此从类别因素和负荷因素两个方面分析节点的电网影响因子,电网影响因子评价体系如图1所示。其中,本文将电力通信网节点所处场所统称为“站点”,包括:调度中心、变电站和电厂等类型。

1.1 站点类别

电力通信网节点所在站点包括调度中心、变电站以及电厂等类型,同类站点还区分电压等级或管理等级,如500 kV 变电站比220 kV 变电站等级高,影响力大,500 kV 变电站属于网调(区域电网调度中心)管辖,220 kV 变电站则受中调(省级电网调度中心)管辖,站点等级是站点在电网中的地位的直接反映;另外,站点规模同样影响节点地位,如变电

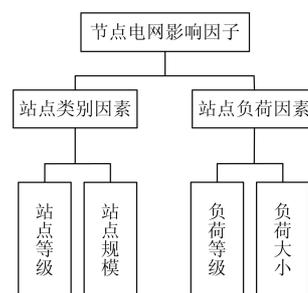


图 1 节点电网影响因子评价体系

Fig. 1 Evaluation system of power network impact factor

站以规模大小分为枢纽站、区域站与终端站,不同规模的变电站功能与作用不同,相应的地位也不同,同时,调度中心所管辖站点规模大小也能区分调度中心的影响程度。因此,从站点等级、站点规模两个因素评价节点所在站点类别因素。

为客观评价站点类别因素,根据电力企业生产管理相关规定^[13],建立电力通信网节点所处站点类别因素评价准则,如表1所示。

表 1 站点类别指标评价准则

Table 1 Evaluation criteria of the station category index

站点类别因素		因素评价准则
电力通信网节点所处站点类别因素评价准则	站点等级	根据厂/站(电厂/变电站)的电压等级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。
	站点规模	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

(1) 负荷等级

对于直接服务电力用户的变电站或者间接服务电力用户的调度节点、省级生产单位以及省直调电厂等节点,所服务的用户重要程度对于节点的影响力具有较大影响,因此根据电力负荷所服务的电力用户等级区分站点负荷等级。

按照国家相关规定,电力用户分为重要电力用户和其他电力用户。重要电力用户是指在国家或者一个地区(城市)的社会、政治、经济生活中占有重要地位,对其中断供电将可能造成人身伤亡、较大环境污染、较大政治影响、较大经济损失、社会公共秩序严重混乱的用电单位或对供电可靠性有特殊要求的用电场所。重要电力用户名单由供电企业根据地方人民政府有关部门确定的重要电力用户的行业范围及用电负荷特性提出,经县级以上地方人民政府有关部门批准后,报电力监管机构备案。根据供电可靠性的要求及中断供电危害程度,重要用户可以分为特级、一级、二级重要电力用户和临时性

重要电力用户。

特级重要用户是指在管理国家事务中具有特别重要作用，中断供电将可能危害国家安全的电力用户；一级重要用户是指中断供电将可能产生重大影响或损失的电力用户；二级重要用户是指中断供电将可能产生较大影响及损失的电力用户；临时性重要电力用户，是指需要临时特殊供电保障的电力用户(大型水利枢纽、隧道施工、重大活动临时保电用户)。

根据电力用户用电管理相关文件规定^[14]，部分重要用户等级划分标准如表 2 所示。

表 2 重要用户等级划分参照标准

Table 2 Reference 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

(2) 负荷大小

站点负荷的大小是站点影响程度的重要参考指标。电网中站点的负荷大小并非固定值，其随着电网负荷变化而变化，但是站点在电网中的负荷相对大小则是相对稳定的，因此利用站点在电网所占负荷比例评价站点负荷大小。站点或其管辖范围完全故障并对外停电将会产生电网减供负荷，即电网在事故发生期间的实际负荷最大减少量。

根据节点所在站点或其管辖范围完全故障并对外停电造成的电网减供负荷事故等级^[15]差别作为评价节点负荷大小因素的评价标准，综合负荷等级因素，得到节点负荷因素评价准则如表 3 所示。

1.3 电网影响因子

按照电力通信网节点电网影响因子评价体系及各因素评价准则，计算节点电网影响因子。

选取因素指标集 $\mathbf{K} = \{k_n\}$, $n = 1, 2, \dots, N$ ，其中 N 等于 4， k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别指代站点等级、站点规模、负荷等级和负荷大小四个因素指标。根据节点集 $\mathbf{V} = \{v_i\}$, $i = 1, 2, \dots, I$ 对因素指标的不同要求，按

表 3 站点负荷因素评价准则

Table 3 Evaluation criteria of the station load index

负荷因素	因素评价准则
电力通信网节点所处站点负荷因素评价准则	按照站点所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的影响力值。
负荷大小	按照厂/站完全故障或调度中心管辖范围内的厂/站全部故障造成的电网减供负荷事故等级确定负荷大小并赋予相应的影响力值。

照节点电网影响因子评价准则确定节点集的影响力评分值 $\{s_i(k_n)\}$, $s_i(k_n) \in \{1, 2, \dots, S_{k_n}\}$, $s_i(k_n)$ 表示节点 v_i 所在站点在因素指标 k_n 下的影响力评分，取值根据指标评价准则确定。其数值表示节点在指标 k_n 的相对影响程度评分。通过节点影响力评分计算因素指标 k_n 下的节点相对影响力矩阵 $\mathbf{A}^{(k_n)}$ ：

$$\mathbf{A}^{(k_n)} = \begin{pmatrix} a_{11}^{(k_n)} & a_{12}^{(k_n)} & \dots & a_{1I}^{(k_n)} \\ a_{21}^{(k_n)} & a_{22}^{(k_n)} & \dots & a_{2I}^{(k_n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I1}^{(k_n)} & a_{I2}^{(k_n)} & \dots & a_{II}^{(k_n)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， $a_{ij}^{(k_n)}$ 表示节点 v_i 和 v_j 在因素指标 k_n 下的相对影响值。当 $i=j$ 时， $a_{ii}^{(k_n)}$ 不具有实际意义，应对对结果无影响的数值，这里令 $a_{ii}^{(k_n)} = 0$ 。当 $i \neq j$ 时

$$a_{ij}^{(k_n)} = \begin{cases} 1 & s_i(k_n) / s_j(k_n) > 1 \\ 0.5 & s_i(k_n) / s_j(k_n) = 1 \\ 0 & s_i(k_n) / s_j(k_n) < 1 \end{cases} \quad (2)$$

对同一指标 k_n 下的节点相对影响力矩阵的行向量元素进行求和，得到因素指标 k_n 下节点相对影响力矩阵 $\mathbf{a}_i^{(k_n)} = \sum_{j=1}^I a_{ij}^{(k_n)}$ ，该矩阵衡量在一个指标下各节点的相对影响力。

节点相对影响力矩阵仅仅描述了节点在一个评价指标下的相对影响力，为综合不同指标下的节点相对影响力，将相对影响力进行相加求和，得到节点综合相对影响力矩阵 $\mathbf{a}_i^{sum} = \sum_{n=1}^N \mathbf{a}_i^{(k_n)}$ ，该矩阵是节点在不同指标下相对影响力的融合，反映了节点在不同因素指标下的综合相对影响力大小。

为避免节点影响力评价结果之间的差异过大或过小，本文采用基于隶属度的归一化方法对综合相对影响力矩阵进行处理，得到节点电网影响因子值。采用的高斯隶属函数表达式为

$$y = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

设定式(3)中参数 c 和 σ 就可得到隶属函数曲

线的形状和位置。

将高斯型隶属函数的参数 c 和 σ 定义为

$$c = (1 + \varepsilon) a_{\max}^{sum} \quad (4)$$

$$\sigma = \left(\frac{1}{2} + \varepsilon \right) a_{\max}^{sum} - \frac{a_{\min}^{sum}}{2} \quad (5)$$

式中: $a_{\max}^{sum} = \text{MAX}(a_1^{sum}, a_2^{sum}, \dots, a_i^{sum}, \dots, a_l^{sum})$, $a_{\min}^{sum} = \text{MIN}(a_1^{sum}, a_2^{sum}, \dots, a_i^{sum}, \dots, a_l^{sum})$; ε 为归一化参数, 取值范围为 $\varepsilon \in (0, 1)$ 。

将上述参数的定义代入式(3), 得到节点 v_i 的电网影响因子值:

$$W_i = e^{-\frac{(a_i^{sum} - c)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

2 网络关键节点识别

在电力通信网中, 重要节点与网络中的其他重要节点连接的紧密程度越高, 网络拓扑结构越合理, 网络相对越可靠。传统方法往往缺乏考虑网络应用背景, 忽略节点自身在网络应用环境中的影响程度, 如电力通信网节点所处的电网站点在电网中的地位及作用。

定义节点聚合系数, 表示一个节点距离其他节点并考虑节点权重的加权平均最短距离。网络节点权重是描述节点脱离于网络环境的自身地位和作用属性的指标。考虑电力通信网的应用背景, 将电网影响因子作为节点权重的评价指标。

网络中节点之间的最短路径描述节点之间距离, 网络平均最短距离反映网络节点之间的紧密程度, 可用于衡量网络整体连接可靠性。但是, 平均最短距离仅仅从拓扑角度考虑, 忽略了节点之间的权重区别。聚合系数考虑节点之间的区别, 能用于衡量节点与不同权重节点之间的平均距离, 权重值大的重要节点在该节点周边的分布越密集, 则该节点的聚合系数越高。聚合系数的性质在电力通信网中具有实际的应用价值, 如调度中心承担着电力系统的监视与控制任务, 需处理大量电力业务信息, 重要节点在调度中心周边的分布越密集, 电力通信网络拓扑相对越合理, 网络可靠性越高, 运行风险越低。因此, 节点聚合系数为

$$\bar{L}_k = \sum_{z \neq k \in V} \left(\frac{W_z}{\sum_{i \neq k \in V} W_i} \times \frac{1}{d(k, z)} \right) \quad (7)$$

式中: V 为网络节点集; W_i 为节点 v_i 的节点权重值。本文中采用电网影响因子节点权重; $d(k, z)$ 为节点

v_k 与 v_z 之间的最短路径值; \bar{L}_k 为节点 v_k 的聚合系数; $\frac{1}{d(k, z)}$ 是节点 v_k 与 v_z 之间的最短路径的倒数,

表示两节点间的紧密度, 节点间距离越短, 其值越大, 节点间紧密度越高。节点紧密度取值范围为 $(0, 1]$, 当紧密度值为 1 时, 两节点直接连接, 此时两节点连接最紧密。

以节点 v_k 为中心, 计算网络中其他节点与该节点之间的紧密度, 同时考虑节点本身的权重, 得到能反映该节点周边节点分布平均紧密程度的指标 \bar{L}_k , 即为节点聚合系数。节点聚合系数越大, 重要节点在其周边的分布越密集, 网络重心距离节点 v_k 越近, 相应地节点在网络拓扑结构上的地位越重要, 该节点在网络中所处位置越关键。

节点聚合系数描述了节点的重要性及其与重要节点的连接状况, 能反映节点在网络拓扑中的地位。节点聚合系数能够结合网络应用背景识别网络的关键节点, 并通过保护或者备份关键节点, 提高电力通信网抵抗攻击的能力, 增强网络抗毁性, 加强网络防护能力, 从而降低网络运行风险。

3 算例分析

根据某省电力通信传输骨干网, 得到仿真网络模型^[16]拓扑结构, 如图 2 所示。

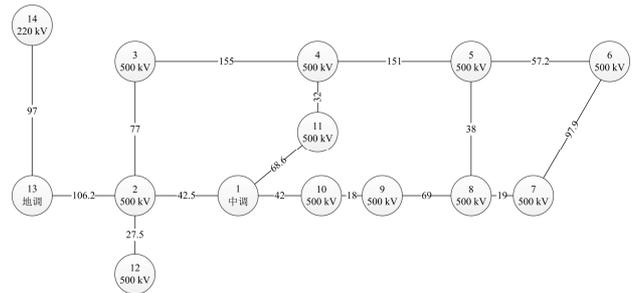


图 2 算法仿真网络模型

Fig. 2 Network model for simulation

图 2 中的网络有 14 个节点、16 条链路, 其中 1 号节点为省级调度中心(中调), 13 号节点为地区调度中心(地调), 14 号节点为 220 kV 变电站, 其余节点均为 500 kV 变电站。节点集为 $v = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}\}$ 。

3.1 电网影响因子计算

对该网络模型的各个节点, 结合电力通信网节点所处站点类别因素评价准则得到网络各节点实际情况, 得到类别指标和负荷指标各指标评价因素内容如表 4 所示。

按照表 4 评价内容对实例网络各节点进行分析得到各节点因素指标及相对影响值如表 5 所示。

表 4 电力通信网节点电网影响因子评价指标因素内容

Table 4 Content of the index of power network impact factor in power communication network

	因素指标	因素内容	因素内容说明
节点所处站点类别因素	站点等级	网调/管辖 500 kV 及以上变电站	厂/站的电压等级或调度中心所管辖厂/站的电压等级
		500 kV 及以上变电站	
		省直调电厂	
		中调/管辖 220 kV 变电站	
		220 kV 变电站	
		省级生产单位	
		地调/管辖 110 kV 及以下变电站	
节点所处站点规模因素	站点规模	(管辖)枢纽站	厂/站的规模或调度中心所管辖厂/站的规模
		(管辖)区域站	
		(管辖)终端站	
节点所处站点负荷因素	负荷等级	特级重要电力用户	厂/站所服务的电力用户等级
		一级重要电力用户	
		二级重要电力用户	
		临时性重要电力用户	
		其他用户	
	负荷大小	40%及以上	厂/站完全故障或调度中心管辖范围内的厂/站全部故障造成的电网减供负荷比例
		16%及以上 40%以下	
		12%及以上 16%以下	
		6%及以上 12%以下	
		4%及以上 6%以下	
2%及以上 4%以下			

表 5 网络各节点指标及相对影响值

Table 5 Indicators and relative influence value in the network

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	相对影响值	站点规模	相对影响值	负荷等级	相对影响值	负荷大小	相对影响值
v ₁	中调	3	枢纽站	2	特级	4	40%及以上	5
v ₂	500 kV 变电站	4	枢纽站	2	二级	2	16%~40%	4
v ₃	500 kV 变电站	4	区域站	1	二级	2	12%~16%	3
v ₄	500 kV 变电站	4	枢纽站	2	二级	2	12%~16%	3
v ₅	500 kV 变电站	4	枢纽站	2	其他	1	12%~16%	3
v ₆	500 kV 变电站	4	区域站	1	其他	1	12%~16%	3
v ₇	500 kV 变电站	4	区域站	1	一级	3	12%~16%	3
v ₈	500 kV 变电站	4	枢纽站	2	二级	2	6%~12%	2
v ₉	500 kV 变电站	4	区域站	1	其他	1	12%~16%	3
v ₁₀	500 kV 变电站	4	区域站	1	二级	2	16%~40%	4
v ₁₁	500 kV 变电站	4	区域站	1	一级	3	16%~40%	4
v ₁₂	500 kV 变电站	4	区域站	1	其他	1	6%~12%	2
v ₁₃	地调	1	枢纽站	2	一级	3	12%~16%	3
v ₁₄	220 kV 变电站	2	区域站	1	其他	1	2%~4%	1

将表 5 各节点的指标相对影响值代入式(1)和式(2), 得到节点综合相对影响值矩阵 A : $A^{sum}=[a_1^{sum}, a_2^{sum}, \dots, a_{14}^{sum}]=[49.5, 35.5, 23.5, 30.5, 25.5, 18.5, 27.5, 26, 18.5, 28.5, 32.5, 14, 27.5, 6.5]^T$ 。设定归一化参数

$\varepsilon=0.15$, 对节点综合相对影响值矩阵 A^{sum} 进行归一化运算, 得到网络各节点电网影响因子, 即节点权重值如表 6 所示。

表 6 电力通信网节点权重计算结果

Table 6 Calculation results of the nodes weight in the electric power communication network

节点 v_i	节点所在站点	节点权重值	节点权重排名
v_1	中调	0.967 6	1
v_2	500 kV 变电站	0.760 1	2
v_3	500 kV 变电站	0.512 9	10
v_4	500 kV 变电站	0.658 8	4
v_5	500 kV 变电站	0.554 2	9
v_6	500 kV 变电站	0.413 8	11
v_7	500 kV 变电站	0.596 0	6
v_8	500 kV 变电站	0.564 7	8
v_9	500 kV 变电站	0.413 8	11
v_{10}	500 kV 变电站	0.617 0	5
v_{11}	500 kV 变电站	0.700 1	3
v_{12}	500 kV 变电站	0.332 5	13
v_{13}	地调	0.596 0	6
v_{14}	220 kV 变电站	0.218 8	14

根据表 6 计算结果, 位于中调节点 v_1 的电网影响因子值为 0.967 6, 大于其他节点, 与其在电网中的地位与电网影响因子相符; 而位于 500 kV 变电站节点的电网影响因子值从 0.33 到 0.76 变化, 但均大于 220 kV 变电站 0.218 8 的取值, 与变电站电压等级高低相符合; 位于地调的节点 v_{13} 电网影响因子为 0.596 0, 小于中调节点及部分 500 kV 变电站, 大于 220 kV 变电站, 符合各站点之间的管理关系。

综合分析, 节点电网影响因子结果反映节点所处站点在电网中的相对影响力, 可用于刻画电力通信网节点权重。

3.2 节点聚合系数计算

求解图 2 网络各节点之间的最短路径, 并将节点权重值结果代入式(7), 得到网络中各节点聚合系数, 并与介数法^[17]和三角模融合法^[18]进行对比, 仿真结果如表 7 所示。

根据表 7 计算结果, 节点 v_1 与 v_2 的聚合系数值相对最大, 网络中各重要节点与这两个节点的连接紧密程度相近。节点 v_1 的聚合系数值稍大, 为 0.555 5, 选取节点 v_1 作为网络的核心节点, 即中调节点是合理的, 中调节点在网络中所处的位置与其权重地位相匹配。另外, 节点 v_2 和 v_{11} 的权重也很大, 相应的节点聚合系数也较大, 而节点是地调节点, 是区域性的调度中心, 其管辖范围并不大, 其聚合系数相应较小。网络各节点在网络拓扑中的地位基本与各节点权重地位相适应, 网络结构设计比较合理。

介数法根据节点介数值区分节点的相对重要性, 但存在无法区分网络边沿节点重要性的问题。如表 7 中, 节点 v_3 、 v_6 、 v_7 、 v_{12} 与 v_{14} 的介数值均为 0, 但这些节点在网络中的地位与作用仍存在区别, 如节点 v_3 聚合系数为 0.463 8, 比节点 v_6 的聚合系数 0.383 2 大, 即网络各节点与节点 v_3 的连接紧密

表 7 网络节点聚合系数计算结果

Table 7 Calculation results of the polymerization indexes in the electric power communication network

节点 v_i	介数法/排名	三角模融合法/排名	节点聚合系数/排名
v_1	44/1	0.976 4/1	0.555 5/1
v_2	39/2	0.952 5/2	0.555 0/2
v_3	0/10	0.408 3/9	0.463 8/8
v_4	3/9	0.938 5/3	0.529 5/3
v_5	13/6	0.791 3/5	0.459 4/9
v_6	0/10	0.154 9/11	0.383 2/12
v_7	0/10	0.133 9/13	0.356 6/13
v_8	27/5	0.626 0/7	0.477 0/6
v_9	30/4	0.753 0/6	0.471 5/7
v_{10}	34/3	0.798 8/4	0.501 1/5
v_{11}	7/8	0.200 2/10	0.506 0/4
v_{12}	0/10	0.062 3/14	0.402 0/11
v_{13}	12/7	0.451 3/8	0.409 9/10
v_{14}	0/10	0.142 6/12	0.325 8/14

程度更大, 在网络中处于更加关键的位置, 相应具有更大的节点重要性。

相对于三角模融合法, 本算法考虑节点本身的地位与影响, 即节点权重值, 能进一步区分节点在网络拓扑中处于相似位置的节点的相对重要程度, 如节点 v_5 与 v_{10} 在网络中拓扑的重要性相近, 但由表 6, 节点 v_{10} 的权重比节点 v_5 的大, 且节点 v_{10} 附近的重要节点分布更为密集, 对于维持整个网络中权重值大的节点之间的连通性, 节点 v_{10} 的作用更为重要, 即节点 v_{10} 相对于节点 v_5 具有更关键的地位。本算法考虑了节点权重, 能够更加全面地描述节点在网络拓扑中的地位, 准确识别网络关键节点, 以便于加权关键节点的维护与管理, 对于加强网络安全管理, 降低网络风险具有较大意义。因此聚合系数在网络关键节点分析及网络规划中具有广泛的应用前景。

4 结语

本文从电力通信网的行业背景出发, 提出电网影响因子的概念, 根据电力通信网节点所处的电网站点在电网中的地位及作用分析节点的地位和影响, 即根据节点所在站点的类别因素和负荷因素分析节点权重。结合所定义的聚合系数指标, 分析电力通信网中重要节点的分布密集状况, 得到各节点在网络拓扑中的相对重要性。仿真表明, 算法能够区分网络拓扑中节点位置相似的节点的重要性, 在电力通信网关键节点分析中具有较大的应用价值, 能为网络运行风险分析提供参考。

参考文献

- [1] 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 for node importance based on node contraction in complex networks[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2006, 26(11): 79-83.
- [2] 李俊刚, 张爱民, 张杭, 等. 广域保护系统数据网络可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 344-350.
LI Jungang, ZHANG Aimin, ZHANG Hang, et al. Reliability evaluation of the wide area protect system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 344-350.
- [3] 周璇, 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.
- [4] 徐政勋, 张伟民. 电网脆弱性分析的一种新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 87-90.
XU Zhengxun, ZHANG Weimin. A new method of power system vulnerability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 87-90.
- [5] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [6] 李瑞生. 一种基于虚拟节点网络拓扑结构适用于架空线路主动配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 70-75.
LI Ruisheng. An aerial line active distribution network pilot protection scheme based on topology of virtual node[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 70-75.
- [7] NAN H, WEN-YAN G. Evaluate nodes importance in the network using data field theory[C] // Convergence Information Technology, 2007. International Conference on: IEEE, 2007: 1225-1234.
- [8] 肖雅元, 张磊, 罗毅, 等. 基于回路可靠性贡献指标的电网薄弱点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 54-59.
XIAO Yayuan, ZHANG Lei, LUO Yi, et al. Grid weak point analysis based on loop contribution index of the reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 54-59.
- [9] 朱涛, 张水平, 郭戎潇, 等. 改进的加权复杂网络节点重要度评估的收缩方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1902-1905.
ZHU Tao, ZHANG Shuiping, GUO Rongxiao, et al. Improved evaluation method for node importance based on node contraction in weighted complex networks[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8): 1902-1905.
- [10] HOU Bonan, YAO Yiping, LIAO Dongsheng. Identifying all-around nodes for spreading dynamics in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2012, 391(15): 4012-4017.
- [11] 曾瑛, 汪莹, 董希杰, 等. 电力通信骨干网节点重要度评价方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 65-69.
ZENG Ying, WANG Ying, DONG Xijie, et al. Node importance evaluation strategy on electric power communication backbone network[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2013, 40(5): 65-69.
- [12] 李钰, 黄泽华, 曾业运, 等. 基于信息集成的配电网关键负荷保障[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 481-485.
LI Meng, HUANG Zehua, ZENG Yeyun, et al. The security of the critical load in the distribution network based on information integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 481-485.
- [13] 电监安全[2006]34号, 电力二次系统安全防护总体方案[S]. 2006.
- [14] 穗经贸[2013]8号, 广州市经贸委关于加强广州地区电力用户用电管理的意见[S]. 2013.
- [15] Q/CSG210026-2011, 中国南方电网有限责任公司电力事故(事件)调查规程[S].
- [16] 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.
- [17] KERMARREC A M, MERRER E L, SERCOLA B, et al. Second order centrality: distributed assessment of nodes criticality in complex networks[J]. Computer Communications, 2011, 34(5): 619-628.
- [18] 吴润泽, 胡秀园, 唐良瑞. 电力光纤网中基于三角融合的节点重要性评价方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(4): 28-32.
WU Runze, HU Xiuyuan, TANG Liangrui. Node importance evaluation strategy based on triangle module applying to optical communication network for power grid[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2011, 38(4): 28-32.

收稿日期: 2015-04-06; 修回日期: 2015-06-18

作者简介:

曾瑛(1972-), 女, 工程师, 从事电力通信网系统分析、运行方式管理等工作;

朱文红(1972-), 女, 工程师, 从事电力系统通信网运维和管理的工作;

邓博仁(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为电力系统通信与信息处理. E-mail: dengboren@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)