

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180921

相依网络理论下电力通信网节点重要度评价

李灵菊, 黄宏光, 舒勤

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 智能电网中电力系统与通信系统的紧密结合, 使得电力通信网络在双网相依系统中愈加重要。通信网络中节点发生故障, 尤其是高重要度节点, 不仅会影响自身网络系统还会影响与其相依的网络, 导致连锁故障的发生。因此, 对智能电网中电力通信网络节点重要性进行评价具有重要意义。将电力物理-信息相依网络中单侧网络提取出来, 以链路已用率和电力线阻抗值作为边权参数建立有权网络模型。根据有权网络节点重要度评价方法, 分别对两子网进行分析。然后根据电力网依存于信息通信网的依存边矩阵, 计算相依网络中电力通信网络节点的重要度指标, 找出重要度大的节点。以 IEEE30 节点系统为例进行了仿真实验, 证明了该方法指标的可行性和实用性。
关键词: 相依网络; 有权网络; 节点收缩法; 凝聚度; 节点重要度

Evaluation method for node importance in power telecommunication network based on interdependent network theory

LI Guiju, HUANG Hongguang, SHU Qin

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The close combination of power system and communication system in smart grid makes the power communication network more important in the system of interdependent network. The failure of nodes in the communication network, especially the important nodes, will not only affect their own network but also affect its dependent network, leading to the occurrence of chain failure. Therefore, it is of great significance to evaluate the importance of power communication network nodes in smart grid. In this paper, the single side network is extracted from the power physics-information network, and the subnet models are established with the link-used rate and power line impedance value as the edge weight parameter. According to the importance evaluation method of the weighted network node, the two subnets are analyzed separately. Then, on the basis of the dependent edge matrix of electric power subnet depending on the information communication subnet, it calculates the important index of power communication network nodes in dependent network and finds the important nodes. The IEEE30 node system is used as an example to demonstrate the feasibility and practicability of the 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: interdependent network; weighted network; nodal contraction; condensation degree; node importance

0 引言

随着社会的进步, 电网朝着大规模^[1]、高复杂性不断发展。为了对电网进行真实有效调控, 先进信息通信技术在电网系统中广泛应用, 加深了通信信息系统和电力物理网络融合^[2-4], 形成智能电网中

的电力信息-物理相依系统(CPPS)^[5-6]。

相依网络^[7]是指由若干网络彼此依赖而耦合成的网络。由定义可知, 首先要有多个网络, 其次这些网络间需存在依赖与被依赖的关系。

电网主要由各种电力设备以及电力线组成; 而通信网络可以实现远距离信息传输, 主要由通信线路将主机联系起来构成通信网络。为保证智能电网可靠稳定地运行, 电网中各级站点均需要进行有效调控, 调度与控制指令的安全可靠传输必须通过通

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

信网来实现。因此电力设备通过数据线与通信节点相连接,即实现电力网依存于电力通信网络。通信网运行需要有电能的支持,智能电网中的通信设备部署在电力站点上,可直接由电力站点为通信节点提供能量驱动,即电力通信网需要依存于电力网络。根据相依网络的定义,电力网与通信网相互融合形成电力信息-物理相依系统^[5-6]。

当 CPPS 中通信网络部分发生故障时,如通信链路^[8]等,会造成信息交互的缺失和中断,进而影响电力系统正常工作,而电力节点故障也会对通信网络造成影响。即不仅会发生单个网络的级联故障,而且故障会通过耦合连接传递到另一侧网络,在网间产生交互传播的级联故障^[9],加大故障范围。因此节点重要程度应不仅依据于单侧网络,还与其耦合网络有关。由于通信网络对电力网络的重要作用,使得电力通信网的安全可靠运行至关重要。因此分析出智能电网中电力通信网节点的重要性,对重要性较高的节点加强保护,减少和避免故障的发生,对智能电网正常运行具有重要现实意义。

近年来,电力系统中因通信系统故障引发的事件已经出现多次^[10]。2003年的北美大停电事故^[11],由于通信系统软件的故障,加大了停电的规模。2005年通信光纤中断造成了中国华中电网电力系统事故^[12]。2012年印度的大停电事故,是由于运行控制智能化的缺乏^[12]。2015年乌克兰和美国也由于遭受网络攻击而造成了严重的电力系统事故。

目前,评价网络中节点重要性程度的指标主要有:节点度、中心度、点介数、PageRank、特征向量^[13]等。经典的分析网络重要性的方法有 TOPSIS 算法^[14]、节点删除法^[15]、节点收缩法^[16]以及基于业务流量^[17-18]等的分析方法。文献[16]中验证了节点收缩法对于评价网络节点重要度的可行性。节点重要度的研究,开始主要从无权网络拓扑结构的角度出发,而现在的网络都有特有属性和参数,并且多为耦合相依网络^[19]。一般节点重要度的分析只考虑自身所在网络,并没有将其相依网络的影响考虑进去。所以本文将电网看作有权网络^[20],以站点级为基本研究单位,综合考虑智能电网中电力通信网与电力网组成的双层相依系统,主要研究思路是首先将 CPPS 网络中单侧网络提取出来,并且分别以链路已用率^[21]和电力线电抗值^[20]作为边权参数建立有权网络模型,根据有权网络基于节点收缩法以及凝聚度的节点重要度评价方法,分别对两子网进行分析,然后根据双网的依存关系,计算相依网络中电力通信网络节点的综合重要度指标。

1 有权网络节点重要度评估

1.1 有权网络

无权网络在表示复杂网络时,由于其无标度特性,仅能描述网络节点间是否存在连接,并不能表示连接的强弱程度,因此,出现了可以将复杂网络的结构表示的更加完整的有权网络模型。

研究目的不同,权的选择不同,比如本文在电网中选择电力线阻抗值,通信网中选择链路中带宽的已用程度即链路已用率^[21]作为边权值。在无权网络模型的基础上,通常可以用图 $G = (V, E)$ 以及边权邻接矩阵 W 表示有权网络的数学模型,表示为

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, w_{ij} 为网络的边权值,等于0表示节点本身,大于0表示两节点直接相连,无穷大表示该边不存在。

1.2 加权平均路径长度

研究网络时,一般定义两节点间的距离为连接这两个节点的最短路径的边的数目,因此定义平均路径长度^[22]为网络节点间距离的平均值,通常用于无权网络中的计算。

本文中电力信息-物理相依网络为有权网络。为了衡量有权网络的传输性能和效率,在原有的平均路径长度的基础上,将链路的权值作为参数,定义了加权平均路径长度^[20] (WAPL)。定义式为

$$L_{WAPL} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in V} L_{ij} \quad (2)$$

式中: n 为有权网络节点的节点个数; L_{ij} 为有权网络中,节点 i 和 j 之间边权重之和最小的路径所含的边数。

1.3 带权重网络凝聚度

节点收缩理论^[23]: 节点 v_i 收缩是指将网络中与 v_i 直接连接的节点与其融合成一个新节点。若节点 v_i 在网络中是一个“核心节点”,则收缩后,网络凝聚程度将会增强。所以,考察节点对网络的影响程度时,可以用节点收缩后网络的凝聚度^[23]来表示。定义带权重网络凝聚度^[20]为

$$\alpha(G) = \frac{1}{nL_{WAPL}(G)} = \frac{n-1}{\sum_{i \neq j \in V} L_{ij}} \quad (3)$$

式中: n 为节点数; $L_{WAPL}(G)$ 为网络 G 的加权平均路径长度。式(3)表明了 $\alpha(G)$ 的两个影响参数,网

络的节点数 n 和可以表示网络中各节点间的连通能力的连接边的权值。

1.4 基于凝聚度的节点重要度评估

因电力信息-物理相依系统中的网络有自己相应的指标参数, 为有权网络。为了更好地分析网络性能, 本文采用了在有权网络模型基础上的带权重网络凝聚度指标^[20], 以及在此基础上的节点重要度指标的评价方法。

定义有权网络中节点 v_i 的重要度为

$$I(v_i) = 1 - \frac{\alpha(G)}{\alpha(G'(v_i))} \quad (4)$$

将式(3)代入得到

$$I(v_i) = 1 - \frac{1}{\frac{nL_{WAPL}(G)}{1}} \quad (5)$$

$$\frac{1}{(n - k_i)L_{WAPL}(G'(v_i))}$$

式中: $\alpha(G'(v_i))$ 表示收缩 v_i 后形成的新的网络图 $G'(v_i)$ 的带权重网络凝聚度, 因收缩后加权平均路径长度^[20]是减小的, 所以 $\alpha(G'(v_i))$ 大于 $\alpha(G)$; k_i 为与节点 v_i 存在直接相连的节点个数。

文中为均衡节点重要度评价结果存在的差异, 对所得节点重要度指标归一化时进行线性化处理:

$$I'_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}(1 - X) + X \quad (6)$$

为了体现出不同节点重要度的差异, 而且差异值也不宜过大, 现将重要度最大差异设定为10倍, 取 $X = 0.1$, 把重要度值映射到 $[X, 1]$ 上。

有权网络模型中基于凝聚度的节点重要度指标的评价方法, 可以很好地反映出节点在网络拓扑结构中的分布特性。同时, 这种节点重要度指标的评价方法也适用于其他有权网络模型。因此可以分别用于计算电力通信单侧网络和电力单侧网络节点的重要度指标。

2 CPPS 网络中电力通信网节点重要度评价

2.1 电力信息-物理相依网络

智能电网中电力网络与通信网络的相互融合形成电力信息-物理相依网络^[24]。根据其网间连接的不同, CPPS 网络模型可以分为^[12]: “一一对应”相依网络模型、部分相互依存网络模型、多重依存相依网络模型、一对多相依网络模型、多对多相依网络模型和考虑节点异质性的电力信息-物理相依网络模型等。上述大多模型都是基于理论和假设提出的, 未得到实际的验证, 所以并不符合现实中的

中国电力系统。

通过对国内某省电网的分析以及参考文献[5]中所指明的中国 CPPS 模型, 在中国实际电力系统中, 为了对各电力站点进行有效监测与控制, 各电力站点都部署有数据采集与监视控制系统等信息节点。信息通信网络中还存在着中继节点以及各级调度中心, 但由于它们的重要作用, 会配备有完备的备用发电机组, 可使其成为自治节点。即每个电力节点有且只有一个信息节点与之对应, 而通信网中却存在独立节点, 但其他通信节点也与电力节点一一对应。所以, 考虑到中国实际的电力系统情况, 我国的 CPPS 网络可以表示为“部分一一对应^[5]”关系, 其模型如图 1 所示。

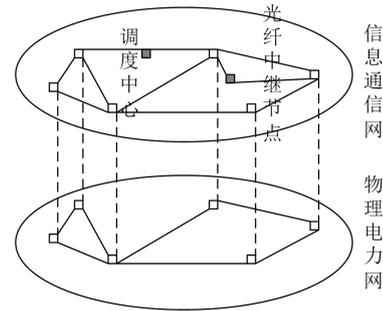


图 1 部分一一对应相依网络模型^[13]

Fig. 1 Partial one-to-one dependent network model

2.2 CPPS 网络中单侧网络节点重要度

本文中采用信息单侧网、电力单侧网及其依存关系的集合来表示电力信息-物理相依网络。

在研究电力通信网络时, 本文将拓扑中的路由器等通信设备视为节点, 将链路视为无向的单线边, 并且将链路的已用率^[21]作为边权值写出电力通信单侧网边权值矩阵 W_c 。通过式(1)、式(3)和式(4)的计算, 并经过式(6)进行线性归一化, 可以得到电力信息通信单侧网络节点重要度向量 I_{oc} 。

而为了反映电力单侧网络本质特性, 文献[20]和文献[25]等在研究有权电力网络时, 网络中的电能仅考虑有功功率且按照基尔霍夫定律分配, 采用了电抗值作为线路的权值, 所以本文亦将电力连接线的电抗值^[20,25]作为边权值, 并将链路视为无向的单线边, 得到电力单侧网边权值矩阵 W_p 。通过式(2)、式(3)和式(4)的计算, 可以得到无等级物理电力单侧网络节点重要度向量 I_p 。

电力系统中站点存在不同等级, 并且在设备类型以及部署方式等方面存在差异, 所以等级不同的站点重要度也会有所不同, 并将其表示为电力节点电压等级重要度。在已有方法中, 部分学者分析电

力系统时就是将其分为了不同层次等级进行分析的,而对于电压节点的等级重要度,已有利用业务的重要度进行分析计算^[20]的方法以及本文中采用的通过专家评分得到等级重要度的方法,电压等级重要度如表1所示。

表 1 电压等级重要度专家打分表

变电站等级/kV	750	500	220
重要度专家打分	1	0.9	0.75

通过等级重要度表,可以得到电力节点的等级重要度向量 I_G ,进而可以得到有等级的电力节点重要度为

$$I_{GP}(v_i) = I_p(v_i) + I_G(v_i) - I_p(v_i) \times I_G(v_i) \quad (7)$$

经过式(6)进行线性归一化,得到电力物理单侧网络节点重要度向量 I_{OP} 。

2.3 相依电力信息系统中电力通信网节点重要度

相依系统中节点的重要性不仅依据于单侧网络还与其耦合网络有关。因此在研究电力通信网节点重要度时,可以先从信息-物理相依耦合系统中分别提取出单侧网络,利用有权网络节点重要度评价方法对单侧网络节点进行评价,最终再根据网络的耦合关系可以得到相依系统中电力通信网节点的重要度。

电力节点跟通信节点间存在联系,可以用双网关联矩阵加以表示。

$$F(f_{ij}) = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: n 表示信息通信节点数量; m 表示物理电力节点数量;当通信节点 i 与电力节点 j 有直接联系时, f_{ij} 记为1,没有直接联系时记为0。

信息物理相依系统的两侧网络是相互依存的,可以建立网间依赖关系。 F_{C-P} 表示信息网依存于电力网的依存边矩阵, F_{P-C} 表示电力网依存于信息通信网的依存边矩阵,若 $F_{P-C}(u, v) = 1$,则表示电力节点 u 的正常运行需要信息节点 v 的调控或会在该通信节点上产生业务数据,否则若无依存关系则值为0。因文章主要分析物理信息相依系统中电力通信网络的节点重要度,就只需要分析信息通信网络对物理电力网络侧的影响,即通信节点对电力节点的影响程度,所以本文只需要写出 F_{P-C} 。

本文定义依存度为:与该电力节点 u 相依的通信网节点 v 因为该电力节点而产生或通过的业务量

t_{uv} 占全网业务总量 T 的比例,即该通信节点通过网间的依存边对电力网络的影响程度。

$$d(u, v) = \frac{t_{uv}}{T} \quad (9)$$

网络节点 v 对应于与其相连的电力节点,可以是一个或多个。因此将依存边的权值依存度代入可以得到有权相依矩阵 F_{RP-C} 。

CPPS系统中,对于电力通信网节点重要性的评价,最重要的是要将电力侧的重要度映射到通信网侧,因此本文将电力网依存于通信网的依存度作为映射参数,采用线性映射函数,将电力通信网节点重要度定义为

$$I_C(v_i) = I_{OC}(v_i) + \sum_{j=1}^n F_{RP-C}(v_i, u_j) \times I_{GP}(u_j) \quad (10)$$

根据式(6)进行线性归一化处理,得到相依电力信息系统中电力通信网节点重要度。

3 实例分析

本文电力物理网络拓扑以IEEE30网络模型为例,拓扑如图2所示。信息通信网络是在电力物理网络的基础上搭建的,而符合中国实际情况的相依网络模型为“部分一一对应模型”^[5]。

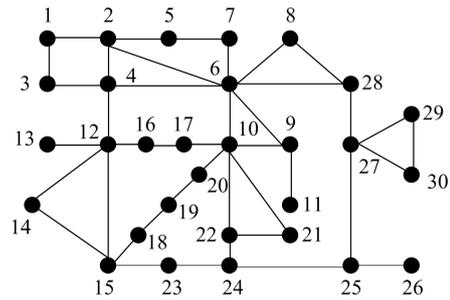


图 2 IEEE30 网络拓扑图

Fig. 2 IEEE30 network topology diagram

因IEEE30相依网络模型较大,本文仅显示部分的相依网络,如图3所示。

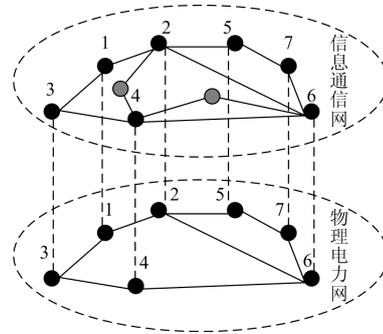


图 3 IEEE30 部分相依网络拓扑图

Fig. 3 Part of the dependent network diagram of IEEE30 network

以IEEE30网线路电抗值作为电力单侧网拓扑模型边权值, 可写出电力边权值矩阵, 信息通信网络侧采用通信线路带宽已用率作为边权值, 其值由

Matlab程序生成, 得到通信边权值矩阵, 列于表2。30个电力节点的电压等级如表3所示。

表 2 网络边权值

Table 2 Edge weight of network

首端节点	末端节点	电抗值	链路已用率	首端节点	末端节点	电抗值	链路已用率
1	2	0.057 5	0.049 654 4	12	13	0.14	0.625 618 6
1	3	0.185 2	0.902 716 1	12	14	0.255 9	0.780 227 4
2	4	0.173 7	0.490 864 1	12	15	0.130 4	0.081 125 8
2	5	0.198 3	0.489 252 6	12	16	0.198 7	0.929 386
2	6	0.176 3	0.337 719 4	14	15	0.199 7	0.435 858 6
3	4	0.037 9	0.369 246 8	15	18	0.218 5	0.508 508 7
4	6	0.041 4	0.389 738 8	15	23	0.202	0.510 771 6
4	12	0.256	0.241 691 3	16	17	0.193 2	0.794 831 4
5	7	0.116	0.096 454 5	18	19	0.129 2	0.532 825 6
6	7	0.082	0.956 134 5	19	20	0.068	0.939 001 6
6	8	0.042	0.575 208 6	21	22	0.023 6	0.587 044 7
6	9	0.208	0.059 779 5	22	24	0.179	0.470 923 3
6	10	0.556	0.234 779 9	23	24	0.27	0.844 308 8
6	28	0.059 9	0.353 158 6	24	25	0.329 2	0.170 708
8	28	0.2	0.168 99	25	26	0.38	0.435 698 7
9	10	0.11	0.731 722 4	25	27	0.208 7	0.311 102 3
9	11	0.208	0.647 746	27	28	0.396	0.184 816 3
10	17	0.084 5	0.296 320 8	27	29	0.415 3	0.904 881
10	20	0.209	0.744 692 8	27	30	0.602 7	0.979 748 4
10	21	0.074 9	0.188 955	29	30	0.453 3	0.594 896 1
10	22	0.149 9	0.686 775 4	—	—	—	—

表 3 电力网节点电压等级表

Table 3 Node voltage level table of grid node

变电站等级/kV	750	500	220
节点编号	6,10,12,24	4,15,22,25,27	其他

根据表3的电压等级, 通过查询表1的内容, 得到网络中30个电力节点的等级重要度向量 I_G 。利用文章中有权网络的节点重要度评估方法, 分别得到表4中的电力单侧网节点重要度和通信单侧网节点重要度。将电力网依存于通信网的依存度作为映射系数, 利用映射函数式(10)得到相依网络理论下的电力通信网节点重要度, 与依存度以及算法中间数据一起列于表4。

以电力通信网中 2、3 节点为例, 在单侧网络计算时, 重要度分别为 0.542 和 0.165, 在电力网依存通信网依存度值差不多的情况下, 考虑相依关系后, 重要度变为 0.531 和 0.173, 说明与其相互依存的网络也会对本网络的节点重要度指标产生影响。而 29 和 30 节点, 因依存度的不同, 最终相依理论下电力通信网节点重要度也存在差异, 如果这两个节点出

现故障, 因 30 节点依存度更高, 则 30 节点造成的影响会比 29 节点的更大。根据表中数据可以看出, 相依理论下电力通信网重要度指标较高的节点有 6、4、12 等, 而重要度指标较低的有 11、13、26 等节点, 即如果网络遭受攻击, 高重要度节点发生故障比低重要度节点造成的影响大, 所以加强对高重要度节点的监控、增加保护措施至关重要。

表4中最后一列为利用普通无权网络节点收缩法得到的节点重要度结果, 传统的无权网络节点收缩法仅体现该节点在拓扑中的位置属性。表4中第三列为不考虑相依网络情况下的一般有权网络节点重要度, 不仅有网络最基本的拓扑结构属性, 还添加了线路参数, 更能反映网络的本质, 但以上两种方法均未考虑实际电力通信网与电力网相依存问题。而经典的TOPSIS算法对于电力通信网中节点的评价与本文方法的侧重点不同, 是利用多属性目标决策的方法, 主要将单个节点看作一个整体, 重点考虑其影响因素为拓扑位置、社会外部因素及所关联电网节点的影响因子, 但与AHP方法均很大比重依

赖于打分制度，且不能考虑到通信网络实际运行时的流量数据问题。而本文是考虑信息物理相依网络中受到电力网侧影响的电力通信网节点重要度的评价方法，且将链路已用率作为线路参数，可以更好

地反映运行的电力通信网属性，通过依存关系将电力侧的影响映射到通信网侧，电力通信网节点重要度评价更加客观全面，也更符合智能电网中双网依存情况下电力通信网的实际状态。

表 4 依存度与节点重要度评估表

Table 4 Degree of dependence and the evaluation result of node importance

编号	电力网依存通信网依存度	通信单侧网节点重要度	电力单侧网节点无等级重要度	电力单侧网节点有等级重要度	相依理论下电力通信网节点重要度	无权复杂网络基于网络凝聚度节点收缩法节点重要度
1	0.023 078	0.165 832	0.224 744	0.806 186	0.168 149	0.168 934
2	0.033 137	0.542 538	0.536 847	0.884 212	0.531 876	0.415 896
3	0.030 822	0.165 832	0.209 615	0.802 404	0.173 902	0.168 934
4	0.036 143	0.649 402	0.610 372	0.961 037	0.637 312	0.552 055
5	0.014 193	0.220 094	0.190 704	0.797 676	0.212 257	0.156 017
6	0.070 431	1	1	1	1	1
7	0.025 506	0.156 257	0.215 288	0.803 822	0.160 94	0.156 017
8	0.018 033	0.119 55	0.156 665	0.789 166	0.120 589	0.217 955
9	0.034 876	0.230 1	0.526 007	0.881 502	0.239 885	0.321 231
10	0.069 867	0.535 119	0.750 052	1	0.562 998	0.705 195
11	0.015 696	0.110 773	0.1	0.775	0.110 407	0.1
12	0.064 41	0.636 834	0.678 366	1	0.653 373	0.560 545
13	0.015 16	0.1	0.127 353	0.781 838	0.1	0.101 289
14	0.029 468	0.180 196	0.300 387	0.825 097	0.186 995	0.211 869
15	0.037 227	0.527 025	0.577 695	0.957 769	0.523 277	0.461 45
16	0.041 781	0.239 246	0.266 347	0.816 587	0.251 641	0.189 405
17	0.026 441	0.215 306	0.243 654	0.810 914	0.217 263	0.189 405
18	0.025 234	0.261 589	0.275 803	0.818 951	0.259 988	0.208 842
19	0.035 665	0.264 781	0.290 931	0.822 733	0.271 132	0.208 842
20	0.040 799	0.264 781	0.294 714	0.823 678	0.275 134	0.208 842
21	0.018 804	0.244 03	0.359 01	0.839 753	0.238 929	0.182 04
22	0.042 279	0.367 657	0.408 178	0.940 818	0.377 518	0.323 002
23	0.032 836	0.271 164	0.364 683	0.841 171	0.275 509	0.268 143
24	0.036 007	0.392 517	0.478 876	1	0.397 32	0.408 137
25	0.022 233	0.397 489	0.502 441	0.950 244	0.388 017	0.379 563
26	0.010 558	0.143 09	0.167 471	0.791 868	0.137 178	0.122 18
27	0.057 685	0.523 578	0.612 415	0.961 241	0.538 626	0.498 08
28	0.017 131	0.490 299	0.488 695	0.872 174	0.469 348	0.413 951
29	0.036 343	0.229 67	0.292 822	0.823 206	0.238 707	0.219 482
30	0.038 157	0.229 67	0.292 822	0.823 206	0.240 109	0.219 482

4 结语

电力网与通信网互相融合成为相依系统，电力通信网作为电力网的支撑网络而存在，起到调控和传输数据的作用。若通信网发生故障，故障可通过相依边进行网间传播，造成更严重的网间连锁故障，因此，对智能电网中电力通信网络节点重要性进行评估具有重要的现实意义。

将CPPS作为有权网络分析，电力单侧网以电力线电抗值作为边权值，通信单侧网以链路带宽已用率作为边权值，再根据双网间的相依关系矩阵，根据文中评价模型可以得到相依网络中电力通信网络的节点重要度指标。对重要度高的节点加强保护，可以减少和避免故障的发生，提高系统的可靠性，保证智能电网的正常可靠运行。

参考文献

- [1] 陈波, 王永庆. 电网安全控制与保护技术现状分析及发展趋势研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 67-71.
CHEN Bo, WANG Yongqing. Current situation analysis of power grid security control and protection technology and its development trend[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 67-71.
- [2] 杨国泰, 王宇飞, 罗剑波, 等. 电力 CPS 信息网络脆弱性及其评估方法[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 83-89.
YANG Guotai, WANG Yufei, LUO Jianbo, et al. Electric CPS information network vulnerability and assessment method[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 83-89.
- [3] 袁汉杰, 李更丰, 别朝红. 考虑信息物理融合的配电系统可靠性评估[J]. 智慧电力, 2017, 45(7): 51-57, 82.
YUAN Hanjie, LI Gengfeng, BIE Zhaohong. Distribution system reliability assessment considering cyber-physical integration[J]. Smart Power, 2017, 45(7): 51-57, 82.
- [4] 胡剑锋, 唐浩然, 陈中, 等. 基于 OPNET 考虑延时特性的小干扰稳定仿真研究[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 70-74.
HU Jianfeng, TANG Haoran, CHEN Zhong, et al. Simulation research on small signal stability based on opnet considering delay characteristic[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 70-74.
- [5] 冀星沛, 王波, 刘涤尘, 等. 相依网络理论及其在电力信息-物理系统结构脆弱性分析中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4521-4532.
JI Xingpei, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Review on interdependent networks theory and its applications in the structural vulnerability analysis of electrical cyber-physical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4521-4532.
- [6] 盛成玉, 高海翔, 陈颖, 等. 信息物理电力系统耦合网络仿真综述及展望[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 100-105.
SHENG Chengyu, GAO Haixiang, CHEN Ying, et al. Summary and prospect of cyber physical power system simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 100-105.
- [7] 王曦, 张新刚. 不同耦合方式下相依网络的级联故障评估[J]. 电子技术应用, 2017, 43(4): 112-116.
WANG Xi, ZHANG Xingang. Evaluation of cascading failure of interdependent network under several coupling preferences[J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(4): 112-116.
- [8] 张永棠, 罗海波. 基于 SDN 的智能电网故障恢复策略[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 74-79.
ZHANG Yongtang, LUO Haibo. Fault recovery strategy for smart grid based on SDN[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 74-79.
- [9] 张保健. 复杂大电网中基于级联失效的双网可靠性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHANG Baojian. Reliability analysis of dual-network in complex large power grid based on cascading failure[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [10] 石立宝, 史中英, 姚良忠, 等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 48-54.
SHI Libao, SHI Zhongying, YAO Liangzhong, et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 48-54.
- [11] VESPIGNANI A. Complex networks: the fragility of interdependency[J]. Nature, 2010, 464(7291): 984-985.
- [12] 冀星沛. 基于相互依存网络理论的电力信息-物理系统结构脆弱性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
JI Xingpei. Research on the structural vulnerability of electrical cyber-physical system based on interdependent networks theory[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [13] 王兵. 复杂网络的节点重要性度量算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
WANG Bing. The research of important nodes measuring algorithm for complicated networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [14] 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.
- [15] 傅子昊. 电力系统恢复中的网络重构与分区恢复策略[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
FU Zihao. Network reconstruction and partitioning strategies in power system restoration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [16] 靳宁, 肖晓强. 基于节点收缩法的地域通信网抗毁性评价方法[J]. 科技信息, 2009(3): 94-95.
- [17] 孙静月, 崔力民, 李珊君. 基于业务的电力通信网络脆弱性分析评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 138-145.
SUN Jingyue, CUI Limin, LI Shanjun. Vulnerability evaluation method of electric power communication network based on business[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 138-145.
- [18] 汪洋, 高晗星, 周生平, 等. 融合拓扑及业务特性的电

力通信网关键节点识别[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 116-123.

WANG Yang, GAO Hanxing, ZHOU Shengping, et al. Critical node identification for electric power communication network based on characteristics of topology and services[J]. Electric power, 2018, 51(1): 116-123.

[19] 老松杨, 王竣德, 白亮. 相依网络研究综述[J]. 国防科技大学学报, 2016(1): 122-128.

LAO Songyang, WANG Junde, BAI Liang. Review of the interdependent networks[J]. Journal of National University of Defense technology, 2016(1): 122-128.

[20] 谢琼瑶, 邓长虹, 赵红生, 等. 基于有权网络模型的电力网节点重要度评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 21-24.

XIE Qiongyao, DENG Changhong, ZHAO Hongsheng, et al. Evaluation method for node importance of power grid based on the weighted network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 21-24.

[21] 尹军, 李灵菊, 黄宏光. 基于链路已用率的电力通信网脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 31-36.

YIN Jun, LI Guiju, HUANG Hongguang. Analysis of power telecommunication network vulnerability based on link used rate[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 31-36.

[22] 余乃平. 复杂网络理论对 Mesh 网络结构的分析和优化[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.

YU Naiping. Applying complex network theory to analyze and optimize Mesh network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Communications, 2008.

[23] 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.

[24] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7.

ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 1-7.

[25] 郝泽龙. 基于复杂网络理论的电网连锁故障模型研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2015.

HAO Zelong. Analysis of power grid cascading failures model based on complex network theory[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2015.

[26] 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.

收稿日期: 2018-07-21; 修回日期: 2018-12-04

作者简介:

李灵菊(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理; E-mail: 930305339@qq.com

黄宏光(1961—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力通信工程设计与计算机信息系统开发等; E-mail: hhg11@163.com

舒勤(1958—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力通信与电网数据分析处理。E-mail: shuchin@163.com

(编辑 魏小丽)