

# 相依网络下加权电力通信网节点重要度评估

袁闽杰<sup>1</sup>, 谢军<sup>2</sup>, 林志勇<sup>3</sup>, 陈骏星<sup>4</sup>, 陈圣晟<sup>5</sup>, 李超<sup>6</sup>

(1. 国网湖南省后勤中心, 湖南长沙 410006; 2. 国网邵阳供电公司, 湖南邵阳 422000; 3. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南长沙 430103; 4. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南长沙 410006; 5. 湖南省湘电试验研究院有限公司, 湖南长沙 410004; 6. 湖南大学电气与工程学院, 湖南长沙, 410082)

**摘要:**随着信息通信技术在电力系统中的大量应用,使得电力系统更加依赖于通信系统的稳定运行。当通信节点遭到攻击失效时,通信节点故障在电力—通信网间传播会最终导致电力信息物理系统的大规模连锁故障。因此,建立符合实际的相依网络模型,评估通信网节点的重要性并对关键节点进行保护是保障相依网络可靠运行的关键。首先,对相依网络中的两单侧网络建立考虑电力线路电抗和信息链路已用率的加权网络模型;然后,根据加权网络节点重要度评估方法,对两单侧网络节点的重要度进行评估;最后,考虑相依电力网节点重要度的影响,依据网间耦合关联矩阵建立的网间依赖度,评估相依网络下通信节点的重要性。以 IEEE 14 节点系统为例构建相依网络并对通信网节点重要度进行评估,结果表明所提评估方法具有可行性,在实际工程中有一定的应用价值。

**关键词:**相依网络;信息通信网;加权网络;网间依赖度;节点重要度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.016 中图分类号:TM08 文章编号:1673-9140(2021)05-0129-08

## Evaluation of node importance in weighted power telecommunication network based on interdependent network

YUAN Minjie<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>2</sup>, LIN Zhiyong<sup>3</sup>, CHEN Junxing<sup>4</sup>, CHEN Shengsheng<sup>5</sup>, LI Chao<sup>6</sup>

(1. State Grid Hunan Logistics Center, Changsha 410006, China; 2. State Grid Shaoyang Power Supply Company, Shaoyang 422000, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Economic and Technical Research Institute, Changsha 430103, China; 4. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Changsha 410006; 5. Hunan Xiangdian Research Institute Co., Ltd., Changsha 410004, China; 6. Hunan University College of Electrical and Engineering, Changsha 410082, China)

**Abstract:** With the extensive application of information and communication technology in power system, power system relies more heavily on the stable operation of communication system. When a communication node is attacked and fails, the propagation of communication node failures across the power-communication network will eventually lead to a cascading failure of the power information-physical system. Therefore, it is the necessary to to establish practical interdependent networks model, evaluating the importance of the communication network nodes and protecting the key nodes. Firstly, a weighted network model considering the reactance of the power line and the used rate of the in-

收稿日期:2021-06-01;修回日期:2021-07-16

基金项目:国家自然科学基金(521071147);国家电网公司科技项目(5216A020005S)

通信作者:陈骏星(1990-),男,博士,高级工程师,主要从事开关电器和电接触技术研究;E-mail:15335909923@163.com

formation link is established for the unilateral networks in the interdependent networks. Then, the importance of two unilateral network nodes is evaluated according to the weighted network node importance evaluation method. Finally, considering the importance of communication nodes, the importance of the inter-network nodes is evaluated based on the inter-network coupling incidence matrix. An IEEE14 bus system is taken as an example to construct a dependent network and evaluate the importance of the communication nodes. The results show that the proposed method is feasible and can be utilized in practical engineering.

**Key words:** interdependent network; information communication network; weighted network; inter-network dependence; node importance

随着智能电网的快速发展,先进信息通信技术在电力系统中大量应用,使得电力系统的稳定运行无时无刻不依赖于可靠的通信系统<sup>[1-2]</sup>。虽然通信系统为电力系统提供了技术保障,但通信系统失效所诱发的后果也将会十分严重<sup>[2-3]</sup>。因此,评估通信网络中节点的重要性,辨识和保护其中的关键节点,对保障电力系统的稳定可靠运行具有重要的现实意义。

评估网络节点重要度的指标是辨识网络关键节点并采取保护措施进行保护的前提。目前,对网络节点重要度的排序方法大致可以分为基于节点临近的排序方法、基于路径的排序方法、基于特征向量的排序方法、基于节点移除和收缩的排序方法、含权网络的节点中心性等<sup>[4]</sup>。其中节点收缩法的提出适用于无权网络<sup>[5]</sup>,对有权网络节点重要性进行评估时,不宜直接采用节点收缩法计算。因此,相关研究者提出了加权网络节点收缩和评估方法<sup>[6]</sup>,将有权网络退化为无权网络,利用节点收缩法对退化的无权网络节点重要度进行评估,同时,还考虑了收缩节点连接边权的影响。使用网络节点度的推广形式,定义了节点强度为节点的权值。文献<sup>[7]</sup>通过对 Google 公司提出的 PageRank 算法进行改进,提出基于 PS-NodeRank 算法的电网关键节点辨识方法。该方法选取电网关键节点的重要评价指标,建立电力系统有向加权网络模型。但现有网络多为具有特有属性和参数的相依网络<sup>[8]</sup>,其由电力网与信息网通过相依边紧密耦合而成,两者相互协作、交互影响<sup>[9-12]</sup>。一般对相依网络节点重要度评估时,仅关注单一电力网或信息网自身特性对节点重要度的影响,将两网割裂研究,并未计及相依网络带来的影响<sup>[13-15]</sup>。因此,对相依网络中的信息通信节点重要度进行评估时,在考虑单一电力网或信息网自身结构特性对

网络节点重要性影响的情况下,还计及通过相依边进行数据交互的相依网络特性对信息通信节点重要度的影响。

该文首先考虑电力网电力线路的电抗特性以及信息网信息链路的传输特性,对相依网络中的两单侧网络建立加权网络模型;然后引入加权网络节点重要度评估方法,评估相依网络中的两单侧网络的节点重要度;最后,基于网间耦合关联矩阵,建立考虑相依电力节点重要度的电力网与信息网网间依赖度,评估通信节点重要性。

## 1 相依网络模型

相依网络是由电力网(P)与信息网(C)通过相依边耦合成的双层复杂网络<sup>[16-17]</sup>。为降低模型的复杂度,可借鉴电力系统“外网等值”的思路,使用图论工具,将网络中的元件抽象为节点,元件之间进行数据传输与处理的环节等效为支路,相依网络可抽象为由节点与支路构成的集合,即

$$G = (V, E, L) \quad (1)$$

式中  $V$  为网络的节点集; $E$  为网络的连接支路集; $L$  为网络的连接支路权重集。

对相依网络建模时,首先基于复杂网络理论,从相依网络中的电力网与信息网实际结构特性出发,分别提取电力网及信息网的拓扑,考虑电力线路电抗与信息通信节点间的链路已用率,将其表示为无向有权的图  $G_P, G_C$ 。

其次,建立电力节点与信息通信节点之间的依存关系,即

$$E_D = \{E_{C-P}, E_{P-C}\} \quad (2)$$

式中  $E_{P-C}, E_{C-P}$  均为电力网依存于信息网的依存支路集,将独立的单侧网络建模为相依网络。写出

邻接矩阵表示所建相依网络的数学模型,即

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \cdots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \cdots & \omega_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{n1} & \omega_{n2} & \cdots & \omega_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $n$  为相依网络节点数;  $\omega_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的支路权重。

## 2 加权网络节点重要度评估

在复杂网络中,针对无权网络提出了用于节点重要度评估的节点收缩法<sup>[5]</sup>。假设网络中节点  $v_i$  ( $v_i \in V$ ) 与  $k_i$  个节点相连,将节点  $v_i$  收缩是指将节点  $v_i$  与相连的  $k_i$  节点融合为一个新节点  $v'_i$ ,原来与  $k_i$  个节点相关联的节点都与新融合节点相连。节点收缩示意图参见文献<sup>[5,17]</sup>。对网络中节点进行融合得到新节点后,通过比较节点融合前后凝聚度的变化率衡量其重要性。

对于无权网络其凝聚度首先取决于网络中各节点之间的连通能力。其次,还取决于网络中节点的数目<sup>[5]</sup>。节点之间的连通能力采用复杂网络节点之间的平均路径进行衡量,所有节点对之间最短路径平均值为

$$L_{\text{WAPL}} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in V} d_{ij} \quad (4)$$

式中  $d_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间最短路径经过连接边的数目。

已知  $n$  和  $L_{\text{WAPL}}$ ,两者乘积的倒数为无权网络的凝聚度<sup>[1]</sup>,即

$$\partial(G) = \frac{1}{n \cdot L_{\text{WAPL}}} = \frac{n-1}{\sum_{i \neq j \in V} d_{ij}} \quad (5)$$

采用无权网络节点收缩法,将节点  $v_i$  进行收缩,得到新融合节点凝聚度为

$$\partial(G * v_i) = \frac{1}{(n-k_i) \cdot L_{\text{WAPL}}(G * v_i)} \quad (6)$$

由节点融合前后的凝聚度可得节点重要度为

$$I_{\text{MC}}(v_i) = 1 - \frac{\partial(G)}{\partial(G * v_i)} \quad (7)$$

以上节点收缩法的提出适用于无权复杂网络求解节点重要度。在加权网络中,由于节点间连接支路权值存在差异,对节点重要度进行评估时,该方法

将不再适用<sup>[19]</sup>。

文献<sup>[6]</sup>对加权复杂网络节点重要度评估概念进行了重新定义。加权复杂网络节点收缩的原理与无权复杂网络节点收缩原理相同,不同点在于加权网络考虑了边权对节点收缩的影响,将边权视为节点重要度评估的影响因素。在加权网络中,与节点相连接支路的点权是无权网络度  $k_i$  的自然推广<sup>[6]</sup>,其定义为

$$s_i = \sum_{j \in N_i} \frac{1}{\omega_{ij}} \quad (8)$$

式中  $N_i$  为与节点  $i$  相连的节点集合。

各节点连接支路的点权平均值之和为

$$s = \sum_i \frac{1}{N_i} \sum_{j \in N_i} \frac{1}{\omega_{ij}} \quad (9)$$

考虑到节点连接边权的影响,加权网络节点凝聚度为

$$\begin{aligned} \partial(G_w) &= \frac{1}{n \cdot s \cdot L_{\text{WAPL}}(G)} \\ \partial(G_w) &= \frac{1}{\sum_i \frac{1}{N_i} \sum_{i,j \in N_i} \frac{1}{\omega_{ij}} \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in V} d_{ij}} \end{aligned} \quad (10)$$

对应无权网络的加权网络节点  $v_i$  的重要度为

$$I_{\text{MC1}}(v_i) = 1 - \frac{\partial(G_w)}{\partial(G_w * v_i)} \quad (11)$$

综上所述,相较于无权网络,加权网络中由改进节点收缩法计算的节点重要度,不仅考虑了无权网络拓扑结构特性的影响,还考虑了节点连接支路权重的影响,更加符合实际网络的本质特性。

## 3 相依网络信息通信节点重要度评估

相依网络是由电力网与信息网通过相依边耦合而成<sup>[16]</sup>。在相依网络中,节点的重要性不仅与单侧网络特性有关,也会受到与其相依另一侧网络的影响。因此,对相依网络中的信息通信节点进行重要度评估时,不仅要考虑信息网自身节点的重要度,也要考虑与其相依电力侧节点重要度的影响。

### 3.1 单侧电力网节点重要度

建立合理的电力网络模型是进行节点重要度评估的基础,为了能够建立反映单侧电力系统特性的

网络模型,将电力线路电抗引入作为电力网权重<sup>[20]</sup>,从而评估加权电力网络节点的重要度。在实际电力网络中,由于网络中各站点存在不同等级,在设备类型及部署等方面都存在差异,等级不同的站点其重要度会不同,将其表示为电力站点电压等级重要度<sup>[8]</sup>。如文献[21]通过专家评分得到电力站点的等级重要度表。考虑电力站点等级、规模不同,在网络中的重要性有所不同<sup>[22]</sup>。在已知单侧电力网各节点重要度的情况下,同时考虑电力网各节点电压等级重要度的影响,进而得到带有电力站点等级的电力节点重要度为

$$I_{PD}(v_i) = I_{MC}(v_i) \times I_D(v_i) \quad (12)$$

式中  $I_D(v_i)$  为节点  $v_i$  的电压等级重要度。

### 3.2 相依网络信息通信节点重要度

在求解相依网络信息通信节点的重要度时,可以先分别提取两单侧网络的权重模型,利用加权网络节点重要度评估方法求解两单侧网络的  $I_{PD}(v_i)$  和  $I_{CX}(v_i)$ 。然后,依据两网相依关系得到考虑电力节点重要度影响的信息通信节点重要度。其中相依网络中两网相依关系耦合关联矩阵为

$$W_{P-C}(\omega_{ij}) = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \cdots & \omega_{1m} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \cdots & \omega_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{r1} & \omega_{r2} & \cdots & \omega_{rm} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中  $r$  为耦合网络中电力节点数; $m$  为耦合网中信息通信节点数; $\omega_{ij}$  为电力节点与信息通信节点之间的连接关系。当节点  $i$  与节点  $j$  之间存在连接时, $\omega_{ij} = 1$ ; 否则  $\omega_{ij} = 0$ 。

已知两单侧网络的节点重要度和两网之间的关联矩阵,求信息通信节点的重要度时,如何将电力网侧节点的重要度映射到信息网侧是计算的关键。在相依网络中信息网与电力网通过耦合网进行信息交互,网间耦合方式有多种<sup>[1]</sup>。在现有研究中多为一对一的耦合模型,但实际电力信息物理相依网络中并不是完全的一对一耦合<sup>[23]</sup>。文献[24]指出相依网络中一个信息通信节点可能会对对应多个电力节点,一个电力节点也可能会对对应多个信息通信节点。因此,为建立更加真实的相依网络模型,该文参考文献[23]增加相依边的方法思路进行建模。

首先,建立一对一所有电力节点与信息节点相

连的基础相依网络模型。然后,任意选取电力网中  $a$  个节点和信息网中  $b$  个节点,将选取的节点进行随机一对一连接。随着选取节点数的增加耦合边个数也会随之增加,信息通信节点对应的电力节点数目也会越多,控制中心能够掌握的信息也就越多,从而对电力网络的稳定控制也就越强。该文主要分析的是相依网络下信息通信节点的重要度,只需分析信息通信节点对电力节点的影响<sup>[8]</sup>。在已知两网相依关系的情况下,将单个信息通信节点通过相依边与电力节点进行信息交互的相依边数占总相依边的比作为信息通信节点对电力节点的影响程度。信息通信节点对电力节点的影响越大,说明电力节点对信息节点的依赖也就越强。

信息节点对电力节点的影响程度为

$$F_{P-C} = \frac{\sum_i^r \omega_{ij}}{\sum_j^m \sum_i^r \omega_{ij}} \quad (14)$$

在已知相依网络中两单侧网络节点重要度和两网之间影响程度的情况下,该文将电力节点依赖于信息通信节点的调控程度作为映射函数的参数,采用线性映射函数将电力节点重要度映射到与之相连的相应信息通信节点上,信息通信节点的重要度定义为

$$I_C(v_i) = I_{CX}(v_i) + F_{P-C} \cdot I_{PD}(v_i) \quad (15)$$

为避免求解得到的信息通信节点重要度之间差异过大,对其进行线性归一化处理,即

$$f(q) = \frac{q - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \quad (16)$$

式中  $q$  为待归一化的元素; $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$  分别为待归一化元素中的最大值和最小值,相应的  $f(q)$  值在区间  $[0, 1]$  上。

将带有权值的信息通信节点重要度带入式(16),即

$$I'_i = f(I_C(v_i)) = \frac{I_C(v_i) - I_C(v_i)_{\min}}{I_C(v_i)_{\max} - I_C(v_i)_{\min}} \quad (17)$$

相依网络下的信息通信节点重要度进行归一化处理后, $I'_i$  最小值为 0。节点的重要度为 0 显然是不合理的,为避免该情况的出现,进行如下处理,即

$$I'_{in} = I'_i(1 - X) + X \quad (18)$$

式中  $X$  值取 0.1,将信息通信节点的重要度映射到  $[0.1, 1]$  上。

## 4 算例分析

该文以某一 14 节点电力通信网为例,建立相依网络模型。信息网的拓扑结构及对应电力网节点电压等级参见文献[21],带有电压等级的信息网拓扑结构如图 1 所示。

图 1 中黑色节点表示对应 750 kV 电力变电站,灰色节点表示对应 500 kV 电力变电站,其余节点表示对应 220 kV 电力变电站。电力网电压等级重要度专家打分如表 1 所示。

IEEE 14 节点相依网络中电力网络支路权重电抗值如表 2 所示,信息网支路权重链路已用率如表 3 所示,其中用于计算信息网链路已用率的链路可用带

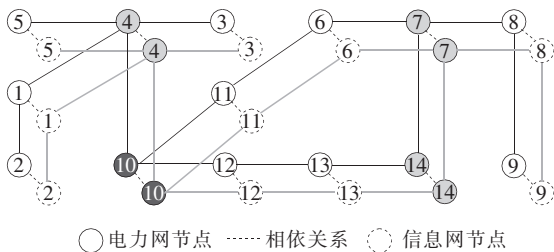


图 1 有电压等级信息网拓扑结构

Figure 1 Topology of information network with voltage level

表 1 电压等级重要度专家打分

Table 1 Voltage level importance scored by experts

不同电压(kV)等级变电站	重要度(专家打分)
750	1.00
500	0.90
220	0.75

宽和链路瓶颈带宽以及相关概念参见文献[21]。

建立 IEEE 14 节点相依网络时,采用增加耦合边的方法建立多对多耦合网络模型,选取电力网与信息网的节点数分别为  $a=7, b=5$ 。建立相依网络模型后,首先,采用加权网络节点凝聚度计算单侧电力网与单侧信息网节点重要度,其中,电力节点重要度考虑电压等级的影响。之后,依据相依网络中耦合网的关联矩阵,计算电力节点依存于信息节点的依赖程度。最后,依据式(15)线性映射函数,考虑电力节点重要度的影响,求解相依网络下的信息通信节点的重要度。为避免相依网络中信息通信节点重要度之间的差异过大,对其进行归一化处理,结果如表 4。将表中的数据表示为折线图的形式,如图 2、3 所示。

从节点重要度分布图可以看出,在考虑电力网电压等级对电力节点重要度影响的情况下,以信息通信节点 4、8 为例,当电力网节点依存于信息通信

表 2 IEEE 14 节点电抗值

Table 2 IEEE 14 bus reactance

首端节点	末端节点	电抗值/ $\Omega$	首端节点	末端节点	电抗值/ $\Omega$	首端节点	末端节点	电抗值/ $\Omega$
1	2	0.059 17	7	8	0.176 15	10	11	0.192 07
2	3	0.019 79	7	9	0.110 01	12	13	0.199 88
2	4	0.176 32	9	10	0.084 50	13	14	0.348 02
1	5	0.223 04	6	11	0.198 90	5	6	0.252 02
2	5	0.173 88	6	12	0.155 81	4	7	0.209 12
3	4	0.171 03	6	13	0.130 27	4	9	0.556 18
4	5	0.042 11	9	14	0.270 38			

表 3 IEEE 14 节点信息网链路已用率

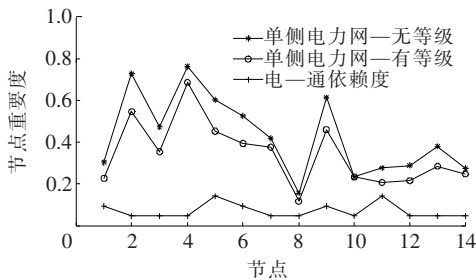
Table 3 IEEE 14 bus information network link used rate

首端节点	末端节点	已用率	首端节点	末端节点	已用率	首端节点	末端节点	已用率
1	2	0.625	10	11	0.800	8	9	0.625
1	4	0.625	10	12	0.500	14	7	0.600
3	4	0.625	11	6	0.600	13	14	0.500
4	5	0.500	6	7	0.500	12	13	0.500
4	10	0.600	7	8	0.625			

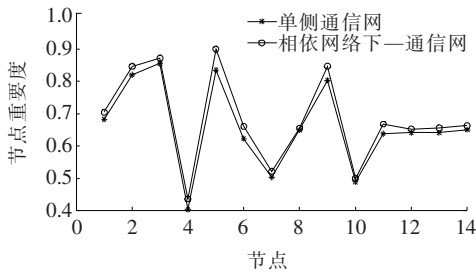
表 4 节点重要度评估值

Table 4 Node importance evaluation value

节点	单侧电力网节点重要度		电力网依存通信网的依赖度	单侧通信网节点重要度	相依网络下通信网节点	
	无等	有等			重要度	重要度归一化
1	0.304 43	0.22832	0.095 24	0.682 78	0.704 52	0.620 23
2	0.730 15	0.547 61	0.047 62	0.820 13	0.846 21	0.895 61
3	0.473 77	0.355 33	0.047 62	0.855 22	0.872 14	0.945 99
4	0.764 08	0.687 67	0.047 62	0.404 11	0.436 85	0.100 00
5	0.604 78	0.453 59	0.142 86	0.835 12	0.899 92	1.000 00
6	0.52694	0.395 20	0.095 24	0.623 53	0.661 16	0.535 96
7	0.420 14	0.378 12	0.047 62	0.503 66	0.521 66	0.264 83
8	0.158 11	0.118 58	0.047 62	0.649 83	0.655 48	0.524 91
9	0.615 31	0.461 48	0.095 24	0.803 33	0.847 28	0.897 69
10	0.234 85	0.234 85	0.047 62	0.489 13	0.500 31	0.223 34
11	0.278 86	0.209 15	0.142 86	0.638 57	0.668 45	0.550 13
12	0.289 86	0.217 39	0.047 62	0.642 47	0.652 82	0.519 74
13	0.381 75	0.286 31	0.047 62	0.642 46	0.656 09	0.526 11
14	0.276 39	0.248 75	0.047 62	0.651 30	0.663 15	0.539 81



(a)单侧电力节点重要度及网间依赖度



(b)单侧信息通信网和相依网络下信息通信网节点重要度

图 2 节点重要度分布

Figure 2 Node importance distribution

节点的依赖度相同时,单侧电力节点有等级重要度的值越大,对相依网络下的信息通信节点重要度影响越大;以信息通信节点 5、9 为例,当单侧有等级重要度的电力节点值基本相同时,电力网依存于信息网的依赖度越大,对相依网络下的信息通信节点重要度影响越大。

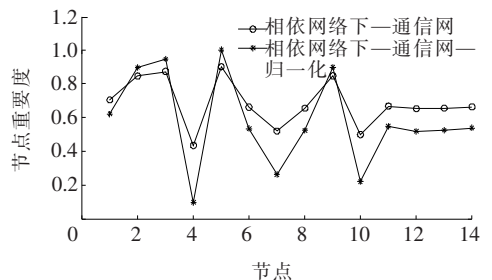


图 3 归一化前后相依网络下信息通信节点重要度分布

Figure 3 Importance distribution of communication nodes in dependent networks before/after normalization

从以上分析可知,在相依网络下的信息通信节点的重要度不仅受与其相依有电压等级电力节点重要度的影响,还受网间依赖度的影响。归一化前后相依网络下的信息通信网节点重要度分布如图 3 所示。由图 3 可知,相依网络下未进行归一化的信息通信节点重要度之间相差不大,大致分布在 0.4 和 0.9 之间。但进行归一化后,相依网络下的信息通信节点重要度在 0.1 和 1 之间均匀分布,更容易区分各通信节点在相依网络中的重要程度。归一化后信息通信节点重要度较高的节点有 2、3、5、9,而重要度较低的节点有 4、7、10。

综上所述,相较于仅考虑单一电力网或信息网节点重要度将两网进行割裂研究的方法,该文在进

行信息通信节点重要度评估时,不仅考虑了单侧信息网络自身拓扑特性和节点连接支路权值的影响,还考虑了相依电力网络通过相依边对通信节点重要度的影响,更加符合实际相依网络的拓扑结构特性。

## 5 结语

在相依网络中,以往对电力节点和信息通信节点的重要度评估大多从单侧网络特性出发,实际并没有考虑两单侧网络之间通过相依边的影响。该文从相依网络的实际运行特性出发,在建立相依网络模型时考虑了电力网络的电气特性和信息网络的传输特性,将电力线路电抗作为电力边的权重,将信息网链路已用率作为信息边的权值。在进行信息通信节点重要度评估时,不仅考虑了单侧信息网自身结构特性对节点重要度的影响,还考虑了通过相依边进行信息交互带有电压等级的相依电力网络节点重要度影响,所提相依网络下通信节点重要度评估方法更加客观和全面,具有一定的实际应用价值。

## 参考文献:

[1] 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.

[2] 郭庆来,辛蜀骏,孙宏斌,等.电力系统信息物理融合建模与综合安全评估:驱动力与研究构想[J].中国电机工程学报,2016,36(6):1481-1489.

GUO Qinglai,XIN Shujun,SUN Hongbin,et al. Power system cyber-physical modelling and security assessment: motivation and ideas [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(6):1481-1489.

[3] 贾惠彬,盖永贺,李保罡,等.基于强化学习的电力通信网故障恢复方法[J].中国电力,2020,53(6):34-40.

JIA Huibin,GAI Yonghe,LI Baogang,et al. Power communication network recovery from large-scale failures based on reinforcement learning [J]. Electric Power,2020,53(6):34-40.

[4] 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(11):79-83+102.

TAN Yuejin,WU Jun,DENG Zhonghong. Evaluation method for node importance based on node contraction in complex networks[J]. Systems Engineering, Theory & Practice,2006(11):79-83+102.

[5] 朱涛,张水平,郭尧潇,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.

[6] 李灵菊,黄宏光,舒勤.相依网络理论下电力通信网节点重要度评价[J].电力系统保护与控制,2019,47(11):143-150.

LI Jiongju,HUANG Hongguang,SHU Qin. Evaluation method for node importance in power telecommunication network based on interdependent network theory [J]. Power System Protection and Control,2019,47(11):143-150.

[7] 孙志媛,梁水莹,傅裕斌.基于PSNodeRank算法的电力系统关键节点辨识方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):157-162.

SUN Zhiyuan,LIANG Shuiying,FU Yubin. Research on identification method of key nodes of power systems based on PSNodeRank algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(2):157-162.

[8] 王先培,朱国威,贺瑞娟,等.复杂网络理论在电力CPS连锁故障研究中的应用综述[J].电网技术,2017,41(9):2947-2956.

WANG Xianpei,ZHU Guowei,HE Ruijuan,et al. Survey of cascading failures in cyber physical power system based on complex network theory [J]. Power System Technology,2017,41(9):2947-2956.

[9] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等.电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J].电力系统自动化,2011,35(16):1-8.

ZHAO Junhua,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(16):1-8.

- [10] 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.
- [11] 高昆仑,王宇飞,赵婷. 电网信息物理系统运行中信息-物理交互机理探索[J]. 电网技术,2018,42(10):3101-3109.  
GAO Kunlun, WANG Yufei, ZHAO Ting. Exploration of cyber-physical interaction mechanism in power grid cyber-physical systems operation[J]. Power Grid Technology, 2018, 42(10):3101-3109.
- [12] 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.
- [13] 梁德军,宋广宁,赵明. 基于复杂网络分析的通信网络节点重要度评估方法[J]. 通信技术,2019,52(3):674-679.  
LIANG Dejun, SONG Guangning, ZHAO Ming. Evaluation method for node importance of communication network based on complex network analysis[J]. Communication Technology, 2019, 52(3):674-679.
- [14] 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.
- [15] 冀星沛,王波,董朝阳,等. 电力信息—物理相互依存网络脆弱性评估及加边保护策略[J]. 电网技术,2016,40(6):1867-1873.  
JI Xingpei, WANG Bo, DONG Zhaoyang, et al. Vulnerability evaluation and link addition protection strategy research of electrical cyber-physical interdependent networks[J]. Power System Technology,2016,40(6):1867-1873.
- [16] 胡钊,李莉莉,张宝丹,等. 智能电网中交互级联故障传播的影响因素分析[J]. 智慧电力,2021,49(5):69-76.  
HU Po, LI Lili, ZHANG Baodan, et al. Influence analysis of interactive cascading failures in smart grid[J]. Smart Power,2021,49(5):69-76.
- [17] 李锐,李婷. 综合管廊加权复杂网络节点重要度评估方法[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(3):676-683.  
LI Rui, LI Ting. Node importance evaluation of utility tunnel based on weighted complex network[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019, 15(3):676-683.
- [18] 王甲生,吴晓平,廖巍,等. 改进的加权复杂网络节点重要度评估方法[J]. 计算机工程,2012,38(10):74-76.  
WANG Jiasheng, WU Xiaoping, LIAO Wei, et al. Improved method of node importance evaluation in weighted complex networks[J]. Computer Engineering, 2012, 38(10):74-76.
- [19] 丁明,韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):20-25.  
DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(10):20-25.
- [20] 尹军,李昞菊,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.
- [21] 刘垒,谭阳红,金家瑶,等. 电力通信网的关键节点辨识[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(2):28-34.  
LIU Lei, TAN Yanghong, JIN Jiayao, et al. Key node identification of power communication network[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(2):28-34.
- [22] 董政呈,方彦军,田猛. 不同耦合方式和耦合强度对电力—通信耦合网络的影响[J]. 高电压技术,2015,41(10):3464-3469.  
DONG Zhengcheng, FANG Yanjun, TIAN Meng. Influences of various coupled patterns and coupling strength on power-communication coupled networks[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(10):3464-3469.
- [23] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature,2010,464(7291):1025-1028.