

DOI: 10.7667/PSPC162081

基于链路已用率的电力通信网脆弱性分析

尹军¹, 李灵菊², 黄宏光²

(1. 国网新疆电力公司信息通信公司, 新疆 乌鲁木齐 830018; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 对电力通信网的脆弱性作出评估, 找到网络中的薄弱环节, 是保证电力通信网络系统正常可靠运行的重要基础工作。在前人的研究基础上, 提出了基于链路已用率的电力通信网脆弱性的研究方法。首先对电力通信网的拓扑结构脆弱性进行了分析。然后将网络运行时的主要参数归结为数据在链路中的带宽, 对基于链路已用率的网络运行脆弱性进行分析, 找到网络的薄弱点。最后将结构脆弱性和运行脆弱性结合, 求出电力通信网络整体的脆弱性。并且通过对一个14节点网络的分析, 得到每个节点的脆弱性以及网络整体的脆弱性, 从而对基于链路已用率的电力通信网脆弱性研究方法进行了验证。

关键词: 电力通信网; 拓扑结构; 带宽; 链路已用率; 节点介数

Analysis of power telecommunication network vulnerability based on link used rate

YIN Jun¹, LI Guiju², HUANG Hongguang²

(1. State Grid Xinjiang Information & Telecommunication Company, Urumqi 830018, China;

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

Abstract: Assessing the network vulnerability and finding out the weak links of network are the important basic work to keep the normal and reliable operation of power telecommunication network. On the basis of predecessors' research, a method of power telecommunication network vulnerability based on link used rate is proposed. Firstly, the vulnerability of topology structure is analyzed. Then the main parameters of network operation are ascribed to the link bandwidth. And the analysis of network vulnerability based on link used rate is made to find out the network weak spot. Finally, the topology structural vulnerability is combined with the operational vulnerability to calculate the vulnerability of power telecommunication network as a whole. And through the analysis of a network with 14 nodes, it can get the nodes fragility and the whole vulnerability of network. Then the research method of power telecommunication network vulnerability based on link used rate is verified.

This work is supported by Science and Technology Support Project of Sichuan Province (No. 2017GZ0349).

Key words: power telecommunication network; topology structure; bandwidth; link used rate; node betweenness

0 引言

从计算机的发明到互联网络的出现, 通信系统网络变得越来越复杂, 同时也与更多的其他系统关联在了一起, 通信网一般会作为其他系统的支撑网络而被使用, 比如电力网络、交通网络等。当综合系统中的通信网络部分发生故障时, 很容易会造成信息交互的缺失和中断, 进而会影响所支撑系统的正常工作。网络中的故障往往是由于一部分元器件首先发生故障, 然后运行的业务会进行重新分配,

可能会引发其他的网络组成部分也发生故障, 即发生连锁故障^[1], 甚至会对生产造成严重的后果。近年来, 由于电力系统通信的故障已经引起了几次事故。比如继电保护设备发生传动系统故障引起异常的高延迟; 2003年在伦敦南部由错误报警数据引起的停电; 2003年8月在美国和加拿大由于通信中断, 对社会以及人民生活造成了一系列影响。因此, 研究电力通信网的脆弱性具有重要的实际意义。

对于简单系统网络, 在20世纪50年代, 提出最多的是使用概率论等基础数学理论对可靠性进行分析, 到20世纪70年代, 通过对网络的研究, 出现了图论的分析方法, 并且开始了对于网络生存性和脆弱性等问题的研究^[2]。20世纪80年代, 通过利用概

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)

率论和图论中的原理对这一问题进行了分析简化,从而有了FACTORING算法的提出。因为各种复杂网络以及专用网络的出现,运行环境和影响因素也变得多种多样,所以提出了综合网络可靠性的概念和可靠性参数^[3]等指标,例如,可靠度、平均故障间隔时间、平均修复时间、生存性以及抗毁性等^[4],在王同文^[5]等人的文章中利用可靠性框图的方法,对继电保护系统可靠性进行了分析,刘小丽^[6]等人提出综合介数指标识别网络中的脆弱线路。这些指标的提出使研究变得更加实质化。

目前关于电力通信网脆弱性的研究也逐渐增多,早期的大部分是根据图论和概率论知识,单纯地对网络拓扑结构进行脆弱性评价,现在也有根据AHP方法建立的偏向于主观方面的脆弱性评估模型,还有基于拥塞、延时、业务重要度和元件参数等方面的评估方法,例如曾瑛^[7]等人从电力通信网的行业背景出发,提出电网影响因子的概念。所以本文主要从电力通信网拓扑结构和运行时的数据流量着手分析,计算和比较电力通信网中组件的脆弱性以及整体的脆弱程度。

1 电力通信网脆弱性

电力通信网在电网中的地位显得越来越重要,网络发生故障会影响到电网系统的正常稳定运行,所以为了保证电网的安全可靠就需要分析出电力通信网中的薄弱环节,提前进行预防并且找出解决的办法。

1.1 脆弱性定义

脆弱性^[8]的概念是约瑟夫奈和基欧汉在《权利与相互依赖》书中提出的,并且把它运用于国际政治的分析,它是指改变相互依存的体系所带来的代价。它也可以被看作是违背或改变游戏规则所带来的代价。

后来被运用于系统中的脆弱性,又称弱点或漏洞,是指系统中存在的可能被威胁利用造成损害的薄弱环节,脆弱性一旦被威胁成功利用就可能对系统造成损害。这种弱点可能存在于物理环境、组织、过程、人员、管理、配置、硬件、软件和信息等各个方面。

文献[8]中给出了几种通用的脆弱性的定义,虽然描述不同,但它们的含义是一样的,构成脆弱性的元素主要包括敏感性、抵御能力和承受能力等。

电力通信网脆弱性是指电力通信网抵御异常事件不足的部分以及发生故障时带来的影响程度。进行电力通信网脆弱性评估的目的是找到网络中的薄弱环节,也就是找到在受到同等攻击的条件下,发

生故障时造成整个系统损失最大的关键部位。

1.2 网络中的基本概念

节点 i 的度:与节点 i 直接相连的链路条数,记为 $g(i)$ 。

节点 i 的介数^[9]:通过节点 i 的最短路由数占网络中所有最短路由数的比例。

链路 i 瓶颈带宽^[10]:在链路 i 上,能够传输的最大数据流量,记为 C_i 。

链路 i 已用带宽:指链路 i 上已存在的数据流量,记为 X_i 。

链路 i 可用带宽^[10]:链路 i 上的剩余带宽,即还可以通过的数据速率的大小,记为 B_i 。

则链路 i 上的链路可用带宽 B_i 表示为

$$B_i = C_i - X_i \quad (1)$$

2 网络拓扑脆弱性模型

网络的拓扑结构是在网络设计时就已经确定的,在后期的实施运行中很难做出大的调整和改变。现有固定的通信网络拓扑的脆弱性是一个静态的值。

一般表示网络连通度的指标有链路最小割集^[11]和节点最小割集,但因为很多网络中均存在着度为1或2的节点,则该网络的连通度为1。所以本文采用节点的平均度数来表示网络的连通程度,进而可以作为表示网络脆弱性的一项指标值。

全连通网络具有最强的抗毁性,所以本文将全连通网络的连通度 L_0 看作参考值,而由 n 个节点、 l 条链路(边)组成的实际复杂通信网络 G 的连通度记为 L_1 ,则网络拓扑结构脆弱性可以由连通度抗毁性的余值,即不连通的部分表示为

$$VS = 1 - L_1 / L_0 \quad (2)$$

网络 G 的连接矩阵记为 $A(a_{ij})$,表示为

$$A(a_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

当 i, j 节点间存在直连链路时 $a_{ij} = 1$,不存在直连链路时 $a_{ij} = 0$,当 $i = j$ 时 $a_{ij} = 0$ 。

则以节点的平均度数来表示的拓扑脆弱性指标定义为

$$VS = 1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} / n \cdot (n-1) \quad (4)$$

式中: n 为节点数目; $\sum_{j=1}^n a_{ij}$ 表示 i 节点的度数;

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} / n$ 表示网络节点度数的平均值; $n-1$ 为 n

阶全连通网络的连通度。

3 基于复杂网络链路已用率的电力通信网运行脆弱性模型

在网络系统中, 因为流量负荷的分布不均衡, 可能会出现在某些链路发生拥塞, 而另外一些链路处于空闲状态的情况。因此, 如果网络中出现突发的数据流, 就可能导致网络的崩溃。根据负荷所经过的路由不同来研究网络的脆弱性, 可以找出网络中的薄弱点, 并且可以通过对负荷流量进行重新选路^[12], 提高抵抗冲击的能力。

3.1 链路和路径已用率

由 n 个节点、 l 条链路(边)组成的复杂通信网络 G , 在每条链路上的瓶颈带宽和可用带宽可以利用文献[10]的方法得到, 进而可以求解出每条链路的链路已用率。

一条路径通常会由多条链路组成, 每条链路的可用带宽不同, 而所能通过的最大容量即路径中的瓶颈也不尽相同, 则含有 y 条链路的路径的可用带宽和路径容量定义为

$$B = \min\{B_i\}, i = 1, 2, \dots, y \quad (5)$$

$$C = \min\{C_i\}, i = 1, 2, \dots, y \quad (6)$$

第 i 条链路的链路容量为 C_i , 可用带宽为 B_i , 根据式(1), 可以计算得到该条链路上负荷流量已占用的链路带宽 X_i 。

则第 i 条链路的带宽已用率 u_i 可以定义为

$$u_i = X_i / C_i \quad (7)$$

3.2 网络中两点间的路由集

求解 i 、 j 两点间的网络利用率, 需要先求出 i 、 j 这两点间的路由集。对于 n 个节点的网络, 按照文献[13]中的方法进行矩阵运算, 虽然只需要经过 n 次重复的循环运算就能得出含有网络全部路由的矩阵, 但文献中的方法是直接进行矩阵运算的, 在节点数比较多时, 运算量就会很大。

所以本文采用深度优先搜寻的算法^[14], 根据网络节点的关联矩阵, 利用算法编写的 Matlab 程序可以求出任意两点间的全部路由以及经过的节点和链路数。

网络中的信息进行传输时, 会按照一定的选路规则进行数据传输, 经过的链路越少, 传输的可能性越大, 所以根据深度优先搜索计算得到的两点间的路由集以及每条路径经过的链路条数, 可以确定

走第 k 条路径的概率 p_k 。

假设 i 、 j 两节点间的路由集合为 s_{ij} , 其中共有 y 条路径, 而每条路径由 z 条链路组成, 则 i 、 j 两点间进行通信, 负荷走第 k 条路径的概率为

$$p_k = \frac{\frac{1}{z_k}}{\sum_{i=1}^y \frac{1}{z_i}}, k = 1, 2, \dots, y \quad (8)$$

且满足条件: $\sum_{k=1}^y p_k = 1$ 。

例如假设 i 和 j 两点间的路由集为 s_{ij} , 有 3 条路径, 可以表示为 $s_{ij} = X_1 + X_2X_3 + X_2X_4X_5$, 经过的链路数分别为 1、2、3, 则走这 3 条路径的概率分别为 1/2、1/3、1/6。

3.3 基于路径已用率的两点间脆弱性

拥有 n 个节点的连通网络, 每条链路都有其自己的容量和可用带宽, 因此由式(7)可以计算出每条链路的已用率, 可以写出以链路已用率作为边权值^[15]的网络链路已用率邻接矩阵 $D(d_{ij})$ 。

$$D(d_{ij}) = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{pmatrix} \quad (9)$$

两个节点间的多条链路组成连接两个节点的一条路径(路由), 根据第一部分关于路径的可用带宽和容量可以定义路径的已用率, 则 i 、 j 两点间第 k 条路径的已用率为

$$u_{ijk} = 1 - \frac{B}{C} \quad (10)$$

将求出的两点间路由集与路径的已用率结合, 假设 i 、 j 节点间有 y 条路径, 可以写出节点间路径已用率向量 $U_{ij} = [u_{ij1}, u_{ij2}, \dots, u_{ijy}]$ 和节点间路径概率向量 $P_{ij} = [p_{ij1}, p_{ij2}, \dots, p_{ijy}]^T$ 。

则定义两点间的脆弱性为

$$v_{ij} = E[U_{ij}(s_{ij})] = \sum_{k=1}^y u_{ijk}(s_{ij}) \times p_{ijk} \quad (11)$$

3.4 节点脆弱性

由上述的计算公式可以写出节点间脆弱性矩阵 $V(v_{ij})_{n \times n}$ 。则网络节点脆弱性 v_i 可以表示为

$$v_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \times I_j \quad (12)$$

式中, I_j 为节点 j 的节点介数, 可以按照文献[3]中的方法进行求解。

电力节点脆弱性由该节点在电力网络中的重

要程度决定,因为在分析通信节点脆弱性时,已经将节点介数代入,则在分析电力节点脆弱程度时,只考虑该节点的等级,所以可以定义为

$$v_j = A_j \quad (13)$$

式(13)表示电力节点 j 的脆弱性, A_j 表示该节点的等级重要度。

在电力系统中,有时会采用分不同层次等级的分析方法,比如在文献[16]中,将系统分为3层进行分析。而对于电压节点的等级重要度可以利用业务的重要度进行分析计算,例如文献[17]是利用继电保护的参数要求计算不同电压等级重要度,而在本文中是通过专家评分得到等级重要度,如表1所示。

表 1 电压等级专家打分表

Table 1 Expert scoring of voltage grade

变电站等级/kV	750	500	220
专家打分	1	0.9	0.75

电力节点跟通信节点间存在联系,可能是一对一或者多对一,可以写出双网关矩阵为

$$F(f_{ij}) = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & & & f_{2m} \\ \vdots & & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nm} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: n 表示通信节点数量; m 表示电力节点数量; 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 f_{ij} 记为0。

双网关节点的数量跟通信节点数量一致,因此关联节点的脆弱性定义为

$$vd_i = [v_i + \max(f_{ij} \times v_j)] - v_i \times \max(f_{ij} \times v_j) \quad (15)$$

式中: $i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m$; v_i 为通信节点 i 的脆弱性; v_j 为电力节点 j 的脆弱性。

3.5 基于链路已用率的运行脆弱性

根据文章第3部分的内容,计算节点脆弱性时是利用链路已用率作为基础数据计算的,所以基于链路已用率的网络脆弱性指标 VC 可以直接由节点的脆弱性得到,定义为

$$VC = \sum_{i=1}^n vd_i \times I_i \quad (16)$$

式中: I_i 为通信节点 i 的介数, $i=1,2,\dots,n$; n 为网络中的通信节点数量。

4 综合脆弱性指标

文章对电力通信网络拓扑结构和网络运行时基于链路已用率的脆弱性进行了分析,由此可以得

出电力通信网整体的脆弱性,定义如下:

$$V = VS \times VC \quad (17)$$

5 实例分析

本文以 14 个节点的电力通信网为例,因所选取的节点为 220 kV 及以上等级,所以不存在多个边缘电力节点对应一个通信节点的状况。

网络拓扑如图 1 所示,图中深色实心的点对应 750 kV 变电站,浅色实心对应 500 kV 变电站,空心的点对应 220 kV 变电站。

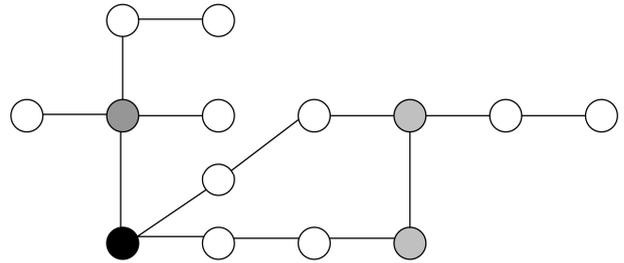


图 1 电力通信网拓扑结构

Fig. 1 Topology of power telecommunication network

首先根据拓扑图,可以写出网络的关联矩阵,按照式(4),计算得到网络的拓扑脆弱性值为

$$VS=0.8462$$

已知每条链路的可用带宽和瓶颈带宽,列于表 2 中。

利用表 2 中的数据 and 式(12)、式(13)可以得到该网络任意两点间的脆弱性矩阵,因计算数据表格较大,则将数据放大一万倍,如表 3 所示,实际数据为表格中数据乘以 10^{-4} 。

以(2, 10)和(7, 10)节点对为例,计算得到的脆弱性值分别为 0.5 和 0.7143,即如果突发数据流,在(7, 10)节点对间传输比在(2, 10)节点对间传输发生故障的概率要高。

因此可以根据式(11)一式(15)计算得到每个节点的脆弱性向量为 {0.8805, 0.8850, 0.8852, 0.9528, 0.9048, 0.8995, 0.9571, 0.8842, 0.8935, 1.0000, 0.9067, 0.8982, 0.8994, 0.9609}, 画出 14 个关联节点的脆弱性曲线,如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,电力通信网中的不同节点具有不同的脆弱性值,可以对它们进行排序,脆弱性较大的节点可以采取增加冗余等措施进行管理防范。对于带宽已用率大的链路同样可用采用经常检修和增加冗余等措施进行管理防范。

最后根据式(16)和式(17),计算得到整个网络的脆弱性为 $V=0.7928$ 。

表 2 电力通信网链路的可用带宽 B 和瓶颈带宽 C Table 2 Link available bandwidth B and bottleneck bandwidth C of electric power communication network

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	3/8	0	3/8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3/8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	3/8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3/8	0	3/8	0	5/10	0	0	0	0	4/10	0	0	0	0
5	0	0	0	5/10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	5/10	0	0	0	4/10	0	0	0
7	0	0	0	0	0	5/10	0	3/8	0	0	0	0	0	4/10
8	0	0	0	0	0	0	3/8	0	3/8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	3/8	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	4/10	0	0	0	0	0	0	2/10	5/10	0	0
11	0	0	0	0	0	4/10	0	0	0	2/10	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5/10	0	0	5/10	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5/10	0	5/10
14	0	0	0	0	0	0	4/10	0	0	0	0	0	5/10	0

注：表中数据为节点间链路上的可用带宽与瓶颈带宽，例如节点 1 和节点 2 之间链路 B/C 为 $3/8$ ，表示该链路上可用带宽为 3，瓶颈带宽为 8。

表 3 电力通信网两点间的脆弱性矩阵

Table 3 Vulnerability matrix between two points of electric power communication network

V_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	3750	3750	3750	3750	6591	6364	6346	6333	5000	6818	5682	5909	6136
2	3750	0	3750	3750	3750	6538	6346	6333	6324	5000	6731	5769	5962	6154
3	3750	3750	0	3750	3750	6591	6364	6346	6333	5000	6818	5682	5909	6136
4	3750	3750	3750	0	5000	7333	7111	6364	6346	6000	7556	6444	6667	6889
5	3750	3750	3750	5000	0	7273	7091	6346	6333	6000	7455	6545	6727	6909
6	6591	6538	6591	7333	7273	0	5429	4583	4773	7429	6286	7143	6857	6571
7	6364	6346	6364	7111	7091	5429	0	375	3750	7143	6571	6857	6571	6286
8	6346	6333	6346	6364	6346	4583	3750	0	6250	6389	5833	6111	5833	5556
9	6333	6324	6333	6346	6333	4773	3750	6250	0	6364	5909	6136	5909	5682
10	5000	5000	5000	6000	6000	7429	7143	6389	6364	0	7714	5429	5857	6286
11	6818	6731	6818	7556	7455	6286	6571	5833	5909	7714	0	7429	7143	6857
12	5682	5769	5682	6444	6545	7143	6857	6111	6136	5429	7429	0	5429	5857
13	5909	5962	5909	6667	6727	6857	6571	5833	5909	5857	7143	5429	0	4571
14	6136	6154	6136	6889	6909	6571	6286	5556	5682	6286	6857	5857	4571	0

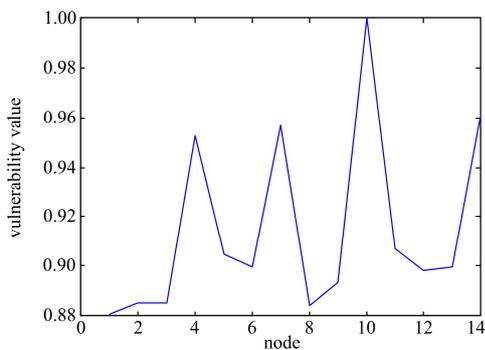


图 2 电力通信网中 14 个节点脆弱性曲线

Fig. 2 14 nodes vulnerability curve of electric power communication network

6 结语

电力通信网运行时可能会受到突然的冲击，研究电力通信网中的薄弱环节对网络的脆弱性进行评价具有重要意义。基于链路已用率的脆弱性评估方法，可以对电力通信网的节点、节点对以及网络拓扑的脆弱性进行分析，因此，可以得出网络组件的脆弱性排序。进而可以通过增加冗余，制定新的路由选择策略，例如学者杨晓琴^[12]和关安礼^[18]的路由选择算法、扩充容量等方法，降低了电力通信网络的脆弱性，提高了工作的可靠性，保证了电力系统的正常可靠运行。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 郑龙, 刘敬军, 罗鹏程, 等. C3I 系统的网络可靠性综述[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(4): 11-13.
ZHENG Long, LIU Jingjun, LUO Pengcheng, et al. Review of network reliability for C3I systems[J]. Computer Technology and Development, 2006, 16(4): 11-13.
- [3] 梁柯, 邓雪波, 温永怡, 等. 现代电力通信网可靠性研究[J]. 数字通信, 2013, 40(5): 31-33.
LIANG Ke, DENG Xuebo, WEN Yongyi, et al. Modern electric power communication network reliability[J]. Digital Communication, 2013, 40(5): 31-33.
- [4] 熊小萍. 电力系统广域通信网络可靠性分析及优化设计[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
XIONG Xiaoping. Reliability analysis and optimal design of wide area communication network in power system[D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [5] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.
- [6] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121.
LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 116-121.
- [7] 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 Bowen, 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.
- [8] 李鹤, 张平宇, 程叶青, 等. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.
LI He, ZHANG Pingyu, CHENG Yeqing, et al. Concepts and assessment methods of vulnerability[J]. Progress in Geography, 2008, 27(2): 18-25.
- [9] 张小娟, 王旭峰. 一种通信网络节点重要性的计算公式[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 663-666.
ZHANG Xiaojuan, WANG Xufeng. Evaluation formula for communication network node importance[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(5): 663-666.
- [10] 李召华. 基于速率的可用带宽测量研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [11] 相晓鹏, 邵玉槐. 基于最小割集法的配电网可靠性评估算法[J]. 电力学报, 2006, 21(2): 149-153.
XIANG Xiaopeng, SHAO Yuhuai. Reliability evaluation of distribution systems based on the minimum cut sets method[J]. Journal of Electric Power, 2006, 21(2): 149-153.
- [12] 杨晓琴, 章丽芳, 曹庆皇, 等. 基于链路带宽利用率的路由选择算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(9): 2422-2425.
YANG Xiaoqin, ZHANG Lifang, CAO Qinghuang, et al. Routing algorithm based on link bandwidth utilization rate[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(9): 2422-2425.
- [13] 戴伏生, 李金鑫, 宋立众. 通信网的总容量归一化加权可靠性指标与算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(5): 614-618.
DAI Fusheng, LI Jinxin, SONG Lizhong. Normalized reliability index weighted by total capacity and its algorithm for a communication network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(5): 614-618.
- [14] 龚建华. 深度优先搜索算法及其改进[J]. 现代电子技术, 2007, 30(22): 90-92.
GONG Jianhua. Depth priority algorithm and its improvement[J]. Modern Electronic Technique, 2007, 30(22): 90-92.
- [15] 程克勤, 李世伟, 周健. 基于边权值的网络抗毁性评估方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(35): 95-96.
CHENG Keqin, LI Shiwei, ZHOU Jian. Evaluation method for network invulnerability based on edge weight[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(35): 95-96.
- [16] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [17] 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.
- [18] 关礼安, 汪斌强, 朱宣勇. 基于下一跳可用带宽和链路利用率的路径选择算法[J]. 电信科学, 2010, 26(8): 30-34.
GUAN Li'an, WANG Binqiang, ZHU Xuanyong. Path selection algorithm based on residual bandwidth and link utilization rate of next hop[J]. Telecommunications Science, 2010, 26(8): 30-34.

收稿日期: 2016-12-20; 修回日期: 2017-03-13

作者简介:

尹军(1968—), 男, 高级工程师, 从事电力信息通信专业管理工作; E-mail: yj@163.com

李灵菊(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为系统监测与网络管理; 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

(编辑 魏小丽)