



研究与开发

一种基于力学模型的电力通信网脆弱性评估方法

王耀升, 张英敏, 王畅

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了合理评价电力通信网链路的脆弱性, 提出一种基于力学模型的电力通信网脆弱性评估方法, 将业务在链路上来往所占用的带宽容量与节点间业务相互来往的数目统称为节点间的相关性, 并将链路业务间的往来相关程度视为一种关联的广义业务力。在业务统计过程中采用均分时隙的最大似然估计, 以泊松 (Poisson) 过程为统计背景进行对业务的参数估计。将链路间的业务数目以及占用带宽变化视为广义业务力做功, 通过引力公式得到节点间的链路逻辑距离, 并以逻辑距离变化区间来度量通信网络的脆弱性。最后, 利用 MATLAB 建立模型进行仿真计算, 验证了该方法能够实时、准确地分析以及评价电力通信网业务链路的脆弱性。

关键词: 脆弱性; 通信网; 拓扑结构; 链路业务; 力学模型

中图分类号: TN915.85

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019023

A method of vulnerability assessment for power communication network based on mechanical model

WANG Yaosheng, ZHANG Yingmin, WANG Chang

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

Abstract: In order to reasonably evaluate the vulnerability of the power communication network link, a vulnerability assessment method based on the mechanical model was proposed. The bandwidth capacity occupied by the traffic on the link and the number of inter-node services were collectively referred to as nodes. The correlation between the links and the degree of correlation between the link services was regarded as an associated generalized business force. In the process of business statistics, the maximum likelihood estimation of the time-slotted time slot was adopted, and the parameters of the service were estimated by using the Poisson process as a statistical background. The number of services between links and the occupied bandwidth were regarded as work of generalized service. The logical distance of the links between nodes was obtained by the gravitational formula, and the vulnerability of the communication network was measured by the interval of logical distance. Finally, MATLAB was used to establish a model for simulation calculation, it is verified that the method can analyze and evaluate the vulnerability of the service link of the power communication network in real time and accurately.

Key words: vulnerability, communication network, topological structure, link service, mechanical model

收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2019-01-10

通信作者: 张英敏, 284110192@qq.com

1 引言

随着电力系统智能化的快速发展和电网规模的扩大,电网的可靠运行和稳定控制更加依赖于电力通信网络^[1-4]。因此,研究电力通信网络的脆弱性具有重要的意义。

电力通信网的脆弱性可能导致电力通信系统物理硬件损坏。目前,在电力通信网中的脆弱性评价方式较多,信息熵^[5]的方法中,网络中业务的脆弱性有比较客观的评价,但业务重要度的非线性转化关系敏感度问题未有讨论,存在一定的主观性。参考文献[6]中,基于业务讨论了网络的脆弱性,提出了较优化的改进方案,但视重要度为一个固定值,具有统计学意义,实时脆弱性分析可能存在不准确的问题。参考文献[7]通过贝叶斯以及网络的拓扑结构变换提出了基于贝叶斯攻击图的网络脆弱性评估,但是贝叶斯网络需要先验概率,如果网络中拓扑变化或者设备更换,先验概率可能存在波动,对网络的脆弱性分析产生影响。参考文献[8]从单一业务的角度出发,对通信网络的脆弱性进行了分析。相对地,参考文献[9-10]从多业务角度对网络的脆弱性进行了分析,并用模糊层次分析法计算业务重要度。参考文献[11]针对网络的结构脆弱性,提出高度数节点保护策略与低度数节点加边策略以改善网络脆弱性,并分别对其有效性进行了定量评估,但所提策略需要改变通信网络拓扑,产生了额外的成本。

现有的电力业务脆弱性较多地利用了专家评分环节,有较强的主观性,本文提出一种基于力学模型的电力通信网脆弱性评估方法,把通信网络节点间的相互作用关系看作广义的力的相互作用,把链路上业务数目的变化以及占用带宽资源的波动视为广义力做功的结果,并借助力学公式,定义了逻辑距离、链路脆弱性以及节点对重要性。由于链路的通信业务数目可以实时统计,这里不失一般性地认为业务数目服从泊松(Poisson)分

布,不服从Poisson分布的可以采用核密度估计进行参数估计,这也让算法具备对网络脆弱性的实时检测和分析能力。

2 业务相关性

在传统电力业务重要度以及脆弱性的评价计算中引入了具有较强主观性的专家评分环节,可能导致业务脆弱性的评价结果不一致,使最终的电力业务缺乏统一性和准确性^[6]。根据电力通信网络节点间存在的业务联系,本文将有链路直连的节点间的业务数目和带宽占用量等效地视为节点间的相关性。

2.1 业务时序向量

这里将具有链路直连拓扑结构的任意两个网络节点*i*、*j*作为研究对象,那么,这两个节点之间一般会存在业务关联。在电力通信网运行过程中,将运行过程的时间分为等间隔的时间段(测量周期),按照时间的先后顺序对节点间的业务数目进行统计。那么,从统计开始的第*n*个时段中,由*i*节点到*j*节点的业务数目为 $U_{ij}(n)$ 。由此,这里可以得到两个时间序列:

$$\{U_{ij}(n)\}, \{U_{ji}(n)\} \quad (1)$$

考虑节点间的业务具有一定的时序相关性,这种相关性仅与当前值和前*N*个值有关(忽略因时间久远而相关性较小的时段)。这里可以得到业务时序向量:

$$\begin{cases} \alpha_{ij} = [U_{ij}(n-N), U_{ij}(n-N+1), \dots, U_{ij}(n)]^T \\ \alpha_{ji} = [U_{ji}(n-N), U_{ji}(n-N+1), \dots, U_{ji}(n)]^T \end{cases} \quad (2)$$

其中, α_{ij} 表示*i*节点到*j*节点的业务时序向量。

2.2 节点间业务相关性计算

非线性动力学认为产生蝴蝶效应的系统一定是非线性系统^[12]。而这里的线性相关运算,认为节点间的业务数目统计时间越长,对当前值的影响越小。这里取权函数为 $\omega(n)$,那么权函数具有如下特性:



$$\begin{cases} \omega(k) \geq \omega(m), k > m \\ \sum_{k=0}^N \omega(k) = 1 \\ \omega(k) > 0, k = 0, 1, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

于是存在正定对角矩阵:

$$D = \text{diag}\{\omega(0), \omega(1), \dots, \omega(N)\} \quad (4)$$

进而, 可以定义内积公式:

$$\langle \alpha_{ij}, \alpha_{ji} \rangle = \alpha_{ji}^T D \alpha_{ij} \quad (5)$$

由此, 节点 i 和节点 j 之间的业务相关性 P 用向量余弦相似度定义, 以体现节点对之间的相互影响:

$$P = \frac{\langle \alpha_{ij}, \alpha_{ji} \rangle}{\sqrt{\langle \alpha_{ij}, \alpha_{ij} \rangle \langle \alpha_{ji}, \alpha_{ji} \rangle}} \quad (6)$$

3 电力通信网广义力学模型

3.1 节点间广义作用力

电力通信网络的任意两个节点 i, j 之间具有业务的相关性, 将这种业务的相关性视为两个节点间的一种特殊的作用力, 即业务力, 记作 F_{ij} 。业务力越大, 说明两节点间的联系越牢固、越稳定。业务力 F_{ij} 的计算式为:

$$\begin{cases} \hat{F}_{ij} = \sqrt{U_{ij}(n) \cdot P \cdot U_{ji}(n)} \\ F_{ij} = \theta_{ij} \cdot \hat{F}_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

其中, θ_{ij} 为修正系数。

节点与节点间存在逻辑距离, 记作 r_{ij} , 其逻辑距离表述了链路的业务与带宽相互关联的紧密程度。同时, 定义两个网络节点的广义质量为 m_i, m_j , 广义质量由节点所处的位置、处理业务的能力等因素决定, 可以反映两个直连节点所构成的链路的重要程度, 两节点的广义质量越大, 则连接该节点对的链路越重要, 具体链路重要度指标会在下文给出。参考万有引力定律, 可以得到:

$$\begin{cases} G_{ij} \frac{m_i m_j}{r_{ij}^2} = \hat{F}_{ij} \\ G_{ij} = \frac{G}{\theta_{ij}} \end{cases} \quad (8)$$

这里类比牛顿万有引力公式, 定义节点与业务力之间的关系, G 表示作用力系数。可以注意到, 节点的广义质量大小反映了节点在网络中的重要度。特别地, 两个节点之间的链路物理距离和式 (8) 中的逻辑距离, 并无直接联系, 但逻辑距离可在一定程度上体现链路的物理距离。

3.2 节点间作用能量

如果节点之间没有业务关联, 那么业务力为 0, 这里可以视为节点之间的逻辑距离无穷大所产生的影响。那么, 将从节点间的业务力为 0 到具有业务力的整个过程视为业务力做功所产生的效果, 可以计算出节点间业务力作用所消耗能量 E_{ij} :

$$E_{ij} = - \int_{+\infty}^{r_{ij}} G_{ij} \frac{m_i m_j}{r_{ij}^2} dr = G_{ij} \frac{m_i m_j}{r_{ij}} \quad (9)$$

其中, 负号表示作用力方向和参考正方向相反。

在网络信息传输过程中, 业务通过节点间的链路带宽进行传输, 在本文的广义力学模型中, 认为链路带宽承载着业务力做功所产生的能量。节点与节点之间的业务来往, 一般认为业务的数目 k 服从参数为 λ 的泊松分布。而在一段研究时间 $[t_0, t)$ 内, 节点有 k 个业务的概率为:

$$P_k(t_0, t) = \frac{[\lambda(t-t_0)]^k}{k!} e^{-\lambda(t-t_0)}, t > t_0, k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

由于在实际过程中, λ 并不可知, 因此这里先对 λ 进行最大似然估计^[14]。在区间 $[t_0, t)$ 内, 由于泊松过程满足平稳增量过程以及独立增量过程, 这里记区间内时间段为 T :

$$T = t - t_0 \quad (11)$$

在电力通信网运行中, 泊松过程的参数可能产生变化, 为了减小这种变化的影响, 在一个周

期内对 λ 进行估计。将一个周期的时间段 T 等分为 N 个不重叠的时间片段 ΔT , 若统计每个时间段业务数目为 k_i , 那么有估计函数:

$$L = \prod_{i=1}^N \frac{(\lambda \Delta T)^{k_i}}{k_i} e^{-\lambda \Delta T} \quad (12)$$

对式 (12) 两端求对数并对 λ 求偏导, 可以得到泊松分布参数的估计值 $\hat{\lambda}$:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N k_i \quad (13)$$

可知该时间段内的功率谱密度:

$$S(\omega) = 2\pi \hat{\lambda}^2 \delta(\omega) + \hat{\lambda} \quad (14)$$

其中, $\delta(\omega)$ 为脉冲信号, 那么可以得到该时间段内的能量关系:

$$E = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \rho(\omega) S(\omega) d\omega \quad (15)$$

其中, $\rho(\omega)$ 为各频率下的业务占用通信带宽密度函数:

$$\begin{cases} \rho(0) = 0, \omega = 0 \\ \rho(\omega) \neq 0, \omega \neq 0 \end{cases} \quad (16)$$

由于在业务发生频数为 0 时没有业务往来关系, 则通信带宽占用率几乎为 0, 因此密度函数的值也为 0。进而可以得到:

$$E = \hat{\lambda} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \rho(\omega) d\omega \quad (17)$$

在 $[t_0, t]$ 区间内, 记累积带宽使用为 B_x , 等于各频率下的业务占用通信带宽密度函数的总和, 则有:

$$B_x = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \rho(\omega) d\omega = \frac{E}{\hat{\lambda}} \quad (18)$$

在通信过程中, 业务并不是连续传输的, 即 $\rho(\omega)$ 不是连续函数。以 $\bar{B}_i$ 表示第 i 个业务的平均占用带宽, $\Delta \tau_i$ 表示第 i 个业务占用的时间。因此可以得到实际情况下累积带宽离散计算式:

$$B_x = \sum_{i=1}^k \bar{B}_i \Delta \tau_i \quad (19)$$

若记两个节点之间链路的最大逻辑距离为 r_s , 最小逻辑距离为 r_1 , 当前逻辑距离为 r_x , 用 B_m 表示最大的链路累积占用带宽, F 为节点间业务力, 那么可以得到:

$$\begin{cases} r_s = \text{Sup} \left\{ \frac{\hat{\lambda} B_x}{F} \mid B_x \in [0, B_m] \right\} \\ r_1 = \text{Inf} \left\{ \frac{\hat{\lambda} B_x}{F} \mid B_x \in [0, B_m] \right\} \end{cases} \quad (20)$$

3.3 链路脆弱性与攻击模型

实际上, 在两个确定的节点链路上, 逻辑距离越近则业务关联越大、业务力越大, 因此定义节点间的链路脆弱性为:

$$Q_a = \frac{r_x - r_1}{r_s - r_1} \quad (21)$$

参考文献[13]在已有的电力通信网络单元中建立了链路失效模型, 并将失效模型分为蓄意攻击失效模型和随机失效模型。本文在广义力学模型的基础上, 根据链路动力学与力学原理, 将攻击分为冲击型、能量型以及混合型 3 类。

(1) 冲击型攻击模型

此模型表示该时段内网络节点间业务来往过多, 而这种冲击在广义力学模型上表现为短时间内业务力的突然下降, 即在时域上叠加了一个负矩形脉冲 $\sigma(t)$ 。由于时间很短, 在一个测量分析周期中, 可以在频域内忽略不计。在脆弱性上表现为:

$$\begin{cases} Q_c = \frac{\frac{\hat{\lambda} B_x}{F - \sigma(t)} - r_1}{r_s - r_1} \\ \sigma(t) = \begin{cases} \theta, t \in [t, t+T) \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \theta > 0 \end{cases} \quad (22)$$

(2) 能量型攻击模型

此模型由于业务繁琐或者业务占用资源大以及蓄意的攻击产生的链路频带占用过高, 导致链



路的脆弱。由于在广义力学模型中频带和链路承载能量相关,因此这里将这种类型的攻击模型称为能量型攻击模型。其脆弱性表现为:

$$Q_n = \frac{\hat{\lambda}(B_x + \Delta B) - r_1 F}{(r_s - r_1) F}, \Delta B > 0 \quad (23)$$

(3) 混合型攻击模型

此模型由于冲击型和能量型两种攻击模型在一个测量周期内均存在。为了刻画链路的脆弱性,这里定义为混合型攻击模型。在混合型攻击模型下,链路的脆弱性为:

$$Q_h = \frac{\hat{\lambda}(B_x + \Delta B) - r_1}{F + \sigma(t)} \quad (24)$$

4 电力通信网脆弱性分析

4.1 电力通信网业务链路的脆弱性

这里以某省的电力通信网为例,仿真分析力学模型下链路的脆弱性,该省电力通信网拓扑结构如图1所示。

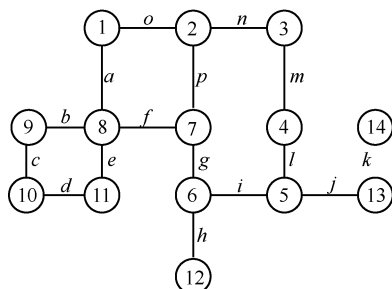


图1 某省电力通信网拓扑结构

根据该省的网络拓扑结构,按如下规则设定节点矩阵:直接连接的节点对为1,其他的为0。各个链路的带宽均为60 Mbit/s,并且各个测量周期的业务数目服从泊松分布。在MATLAB中仿真计算可以得到当前各个链路的脆弱性,见表1。

表1中,通过1000组仿真数据找到对应链路最大逻辑距离 r_s 与最小逻辑距离 r_1 ,并将其近似为逻辑距离的上下确界,进而求得当前时间段下,

表1 当前周期内链路脆弱性

链路	Q_a	链路	Q_a
$a(1-8)$	0.970 7	$i(5-6)$	0.793 0
$b(8-9)$	0.875 3	$j(5-13)$	0.336 2
$c(9-10)$	0.454 1	$k(13-14)$	0.537 6
$d(10-11)$	0.649 5	$l(4-5)$	0.233 4
$e(8-11)$	0.051 7	$m(3-4)$	0.923 3
$f(7-8)$	0.357 1	$n(2-3)$	0.821 4
$g(6-7)$	0.423 0	$o(1-2)$	0.462 7
$h(6-12)$	0.767 2	$p(2-7)$	0.561 7

链路 a 的脆弱性最高,链路 b 的脆弱性也较高,这与节点8所连链路复杂性存在一定的关联。同样,链路 h 、 i 的脆弱性较高,而相应的节点5、6连接的链路复杂度也比较大,符合这一特征。

从表1的仿真数据中可以看出,复杂的网络节点结构往往伴随着较高的脆弱性,但是具有复杂网络连接的节点所在的链路不一定都脆弱,其脆弱性也与实际情况下链路业务数以及业务累计宽带占用量相关。当前周期下服从泊松分布的节点间业务数见表2;宽带占用情况见表3,为了方便对比,这里将宽带占用量转化为宽带占有率。

表2 当前周期内链路业务数

链路	业务数	链路	业务数
$a(1-8)$	102	$i(5-6)$	94
$b(8-9)$	103	$j(5-13)$	98
$c(9-10)$	95	$k(13-14)$	110
$d(10-11)$	108	$l(4-5)$	102
$e(8-11)$	75	$m(3-4)$	108
$f(7-8)$	90	$n(2-3)$	83
$g(6-7)$	113	$o(1-2)$	93
$h(6-12)$	85	$p(2-7)$	98

对比表1~表3中的仿真数据可以看出,节点7-8、8-11间业务数较少、宽带占用率较小,故链路 e 、 f 的脆弱性较低;相对地,节点1-8、3-4间业务数较多,宽带占用率较大,故链路 a 、 m 的脆弱性较高,但由于链路 a 复杂性高,故脆弱性较

表3 当前周期内链路宽带占用率

链路	宽带占用率	链路	宽带占用率
<i>a</i> (1-8)	0.750 0	<i>i</i> (5-6)	0.786 7
<i>b</i> (8-9)	0.761 8	<i>j</i> (5-13)	0.609 3
<i>c</i> (9-10)	0.654 1	<i>k</i> (13-14)	0.656 3
<i>d</i> (10-11)	0.680 8	<i>l</i> (4-5)	0.627 3
<i>e</i> (8-11)	0.612 4	<i>m</i> (3-4)	0.861 4
<i>f</i> (7-8)	0.662 2	<i>n</i> (2-3)	0.743 9
<i>g</i> (6-7)	0.613 3	<i>o</i> (1-2)	0.668 7
<i>h</i> (6-12)	0.842 3	<i>p</i> (2-7)	0.684 2

链路 *m* 高; 对于节点对 6-7, 其业务数较大, 但宽带占有率较小, 故链路 *g* 脆弱性较低; 链路 *i* 与之相反, 节点 5-6 间业务数较小, 但由于宽带占用率大, 其脆弱性较高。其他节点也有相似规律。

为了进一步验证该模型的正确性, 针对参考文献[4]中所用的 IEEE30 节点系统的电力通信网进行仿真计算, 脆弱性排序前 10 的链路仿真结果见表 4。

表4 当前周期内链路业务数

链路	业务数	宽带占有率	脆弱性
10-12	113	0.858 0	0.774 6
20-24	101	0.884 1	0.771 2
4-12	106	0.840 1	0.767 2
5-7	103	0.786 6	0.660 8
9-10	113	0.756 1	0.641 8
4-25	97	0.854 1	0.618 6
6-8	107	0.740 3	0.616 9
23-24	101	0.723 9	0.598 8

通过对业务数、宽带占有率和脆弱性的对比分析, 能够得到相同的结论, 即网络结构越复杂、链路业务数越多、链路宽带占有率越大, 其脆弱性也就越强, 符合实际工程中的链路脆弱性特征。

4.2 节点对的重要度

在链路脆弱性的广义力学模型中引入了广义质量的概念。这里认为节点的广义质量反映了链

路或者节点对的重要度, 即相连的两节点的节点重要度越大, 节点间业务来往一般会更多, 业务力也会越强。因此这里定义节点对 *i-j* 间链路的重要度为:

$$W(i, j) = G_{ij} m_i m_j = \hat{F}_{ij} r_{ij}^2 \quad (25)$$

由于节点间的业务往来存在变动, 因此这里的链路重要度具有一定的时效性, 并不是一个不变的结果。这里对网络运行状态中的 1 000 个周期进行仿真, 那么可以得到当前 (即第 1 000 个) 周期内各节点对间链路的重要度, 见表 5。

表5 当前周期内链路重要度

链路	<i>W</i>	链路	<i>W</i>
<i>a</i> (1-8)	7.947 6	<i>i</i> (5-6)	7.223 1
<i>b</i> (8-9)	7.963 0	<i>j</i> (5-13)	4.912 1
<i>c</i> (9-10)	5.304 4	<i>k</i> (13-14)	6.537 9
<i>d</i> (10-11)	6.863 2	<i>l</i> (4-5)	5.069 2
<i>e</i> (8-11)	3.267 2	<i>m</i> (3-4)	9.713 8
<i>f</i> (7-8)	4.924 2	<i>n</i> (2-3)	6.092 1
<i>g</i> (6-7)	5.742 6	<i>o</i> (1-2)	5.351 7
<i>h</i> (6-12)	7.105 3	<i>p</i> (2-7)	6.050 7

4.3 各攻击模型下脆弱性对比

在图 1 的拓扑结构中, 链路数目比较多, 由于文章篇幅有限, 不失一般性地, 根据表 4 选择当前重要度最高的链路 *m* 进行讨论。在最近的 20 个测量周期内, 研究链路 *m* 在不同类型攻击下的脆弱性变化情况, 结果如图 2 所示。

从图 2 中可知, 混合型攻击导致链路 *m* 的脆

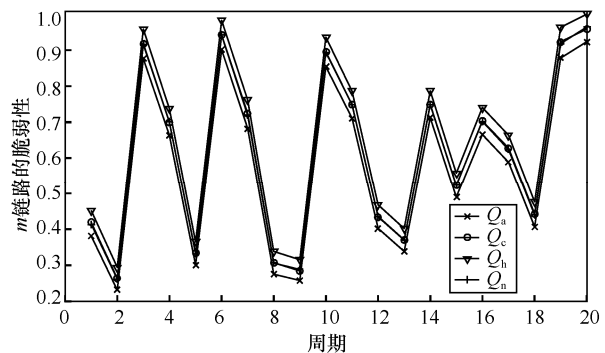


图2 最近 20 个测量周期的脆弱性对比



弱性 Q_h 增强比较明显, 冲击型攻击的脆弱性 Q_c 和能量型攻击脆弱性 Q_n 导致的结果相差不大, 其影响也使得链路的脆弱性微弱地提升。这表示, 脆弱性主要由业务的关联程度减弱所导致, 同时说明耗时较长、占据带宽较大的业务, 在链路上持续传输, 长时间占用链路资源, 会导致链路脆弱性明显增大。

由以上仿真计算可以看出, 基于力学模型的脆弱性评估方法符合网络的现实运行情况, 在对链路的重要度及脆弱性评估方面有较好的数据支持能力, 证明了所用模型的正确性。

5 结束语

本文提出的基于广义力学模型的评估方法对电力通信网链路的业务脆弱性有比较好的实时计算能力, 对链路重要度也给出了计算方法, 同时, 也反映了脆弱性并不是一个固定不变的值, 它具有一定的时变特性, 这对网络的业务规划具有一定的指导作用。广义力学模型具有可拓展性, 也可以对其他网络进行分析, 而对于具有其他特定概率分布规律的网络, 泊松分布可以改为其他分布, 进行参数或者半参数估计, 再运用力学模型进行评价, 以后也将继续研究完善力学模型在通信网脆弱性评估中的应用, 也可以在电力系统脆弱性评估、城市管网规划等其他应用场景中推广。

参考文献:

- [1] 孙跃, 李敏, 陈乐然, 等. 基于 POTN 技术的电力通信网规划方案[J]. 电信科学, 2017, 33(Z1): 28-32.
SUN Y, LI M, CHEN L R, et al. Scheme of electric power communication network based on POTN technology [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(Z1): 28-32.
- [2] 李彬, 张洁, 陈宋宋, 等. 基于复杂网络的电力通信网扩容保护策[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1974-1980.
LI B, ZHANG J, CHEN S S, et al. Expansion strategy of power communication network survivability based on complex network[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1974-1980.
- [3] 周静, 刘国军. 一种电力通信网规划成效评价方法[J]. 电信科学, 2015, 31(3): 155-159, 170.
- [4] 张益辉, 苏汉, 陈香宇, 等. 基于评价树的电力通信网络业务质量评价方法[J]. 电信科学, 2017, 33(Z1): 57-62.
ZHANG Y H, SU H, CHEN X Y, et al. Service quality evaluation method of power communication network based on evaluation tree[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(Z1): 57-62.
- [5] 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 B, ZENG Y, TANG L R. Vulnerability assessment of power communication network based on information entropy[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(9): 2138-2144.
- [6] 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 B, TANG L R. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1191-1197.
- [7] 王秀娟, 孙博, 廖彦文, 等. 贝叶斯属性攻击图网络脆弱性评估[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(4): 106-112.
WANG X J, SUN B, LIAO Y W, et al. Computer network vulnerability assessment based on bayesian attribute network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(4): 106-112.
- [8] 彭静, 卢继平, 汪洋, 等. 广域测量系统通信主干网的风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(5): 84-90.
PENG J, LU J P, WANG Y, et al. Risk assessment of backbone communication network in WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(5): 84-90.
- [9] 金鑫. 电力通信传输网业务可靠性分析方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010: 7-18.
JIN X. Research on service reliability analysis method of electric power communication transmission network[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010: 7-18.
- [10] 李思. 基于业务重要度的电力通信网可靠性评估[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
LI S. The reliability evaluation of power communication networks based on service importance[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [11] 刘涤尘, 冀星沛, 王波, 等. 基于复杂网络理论的电力通信网拓扑脆弱性分析及对策[J]. 电网技术, 2015(12): 3615-3621.
LIU D C, JI X P, WANG B, et al. Topological vulnerability analysis and countermeasures of electrical communication network based on complex network theory[J]. Power System Technology, 2015(12): 3615-3621.
- [12] 刘秉正, 彭建华. 非线性动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 140-141.
LIU B Z, PENG J H. Nonlinear dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 140-141.
- [13] LU Z M, LI X F. Attack vulnerability of network controllability[J]. PLoS ONE, 2016.

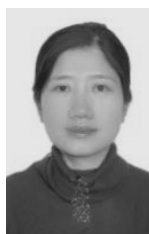
- [14] 冯杭, 王胜兵. 有限混合泊松分布参数优化的改进 EM 算法[J]. 兵工自动化, 2017, 36(1): 80-82.

FENG H, WANG S B. Improved EM algorithm of limited mixed Poisson distribution parameters optimization[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(1): 80-82.

[作者简介]



王耀升（1993—），男，四川大学电气信息学院硕士生，主要研究方向为高压直流输电、智能电网等。



张英敏（1974—），女，博士，四川大学电气信息学院副教授、硕士生导师，主要研究方向为高压直流输电、智能电网等。



王畅（1993—），男，四川大学电气信息学院硕士生，主要研究方向为现代信号处理等。