

基于业务风险均衡度的 电力通信网可靠性评估算法

赵子岩¹, 刘建明²

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 国网信息通信有限公司, 北京市 宣武区 100761)

A New Service Risk Balancing Based Method to Evaluate Reliability of Electric Power Communication Network

ZHAO Ziyan¹, LIU Jianming²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Information & Telecommunication Co., Ltd., Xuanwu District, Beijing 100761, China)

ABSTRACT: According to the features of electric power communication service for smart power grid and typical structure of electric power communication network, the service of electric power communication network is analyzed and a concept of service importance degree is proposed and then its metric is determined. On this basis the concepts of degree of service risk, channel segment's degree of service risk and degree of service risk balancing of whole communication network are put forward; based on the degree of service risk balancing of whole communication network, the index to evaluate and measure the reliability of electric power communication network is established as well as the evaluation model are established and the way to solve the established model is given. Taking an electric power communication network with 6- communication nodes and 8-edges as calculation example, the solution and calculation processes of network matrix, service matrix, the matrix of service importance degree and degree of service risk balancing are expounded. Calculation results show that the proposed measurement and evaluation index, evaluation model and solution method possess satisfied practicality and operability, so they are available for reference to the implementation of reliability evaluation of electric power communication network and optimization of service network as well as reasonable arrangement of service channels and operation modes of communication network.

KEY WORDS: electric power communication network; reliability; communication service; degree of risk balancing

摘要: 根据智能电网电力通信网业务的特点及电力通信网的典型结构, 对电力通信网业务进行了分析, 提出了业务重要度的概念, 确定了业务重要度量值; 在此基础上, 提出了业务风险度、通道段业务风险度、全网业务风险均衡度的概念, 建立了基于全网业务风险均衡度的电力通信网可靠性的

评估测度指标、评估模型及求解方法。以一个 6 节点、8 边的网络为算例, 阐述了网络矩阵、业务矩阵、业务重要度矩阵及业务风险均衡度的求解和计算过程。计算结果表明文中提出的指标测度、模型及求解方法具有良好的实用性和可操作性, 可对从业务层面实施电力通信网可靠性评估、优化业务网络、科学安排业务通道及通信网运行方式提供参考。

关键词: 电力通信网; 可靠性; 通信业务; 风险均衡度

0 引言

电力通信网是电力系统中第 2 张实体网络, 其安全可靠直接影响电网的安全稳定运行, 因此研究电力通信网的可靠性具有重要的意义^[1-2]。

关于电力系统可靠性技术, 已经在特高压电网^[3-4]、大电网安全稳定运行^[5-6]、电力系统规划^[7]、配电网经济规划与经济运行^[8]等领域开展研究并广泛应用。通信网可靠性的研究始于 20 世纪 60 年代, 在可靠性测度及分析方法^[9]、通信网抗毁性^[10-15]、通信网生存性方面取得了不少成果。而电力通信网可靠性研究则在电力通信网与电力系统的综合可靠性、通信通道可靠性^[16]和电力通信网可靠性管理等方面取得了一些成果。

上述的研究方向及研究工作主要是从网络本身或局部业务通道的可靠性分析入手, 形成的成果也主要是针对网络本身固有的可靠性测度指标及评估方法。作为支撑智能电网发展的重要平台, 电力通信网络及电力通信业务日益发展, 与电网之间的联系也更加紧密, 因此研究电力通信业务可靠性问题对于指导电力通信运行部门的日常业务网规划设计、业务通道组织安排、网络运行方式优化调

整等具有重要的意义。而目前针对电力通信业务的通信网可靠性评估采用的主要方法仍是基于单业务通道，对特定业务通道进行评估与改进，而对于网络整体业务可靠性水平评估指标及评估算法都很欠缺。

本文基于电力通信业务分析，提出了业务重要度、业务风险度及业务风险均衡度的概念，并基于业务风险均衡度形成了一种适用于电力通信网业务可靠性评估的指标、模型和方法，解决了全网电力通信业务的风险指标及风险评估的问题。

1 评估模型

给定一个电力通信网络拓扑及业务拓扑，电力通信网络可以表示为 $G=(N,E)$ ，其中： N 为网络节点集合； E 为网络中的无向边集合，并用 E_i 表示网络拓扑中第 i 条边。

网络的业务拓扑可表示为 $G_s=(N_s,E_s,S)$ ，如图 1 所示。其中下标 s 表示网络的业务拓扑； N_s 为具有上下业务或有业务流经的网络节点集合； E_s 为网络中有业务流过的边集合，并用 $E_s(i,j)$ 表示网络中有业务流经的节点 i 和节点 j 之间的一条边； S 为表示网络的业务集合，并使用 $S_{E_s(i,j)}$ 表示流经网络中 $E_s(i,j)$ 边的业务集合。

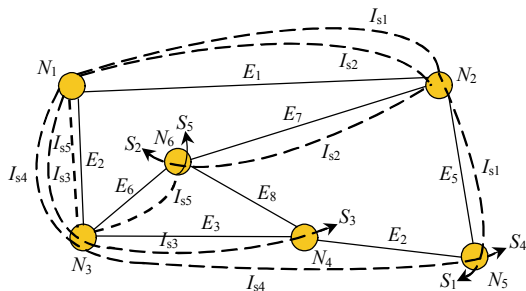


图 1 基于业务风险均衡度的电力通信网可靠性评估模型

Fig. 1 Evaluation model for communication network reliability assessment based on service risk balance

在图 1 中 I_{s_i} 表示网络中第 i 个业务重要度值。

在图 1 所给定的网络和业务拓扑图中，网络节点集合为 $N_s=\{N_1,N_2,N_3,N_4,N_5,N_6\}$ 。网络承载业务的边集合为 $E_s=\{E_1,E_2,E_3,E_4,E_5,E_7\}$ ，边 E_6 、 E_8 不承载业务，因此不属于 E_s 。业务集合为 $S=\{S_1,S_2,S_3,S_4,S_5\}$ ，各条业务路由如虚线所示。

2 业务分析

2.1 业务种类

电力通信网业务种类按照业务属性^[17]，可以分为以下几种：1) 语音业务，包括行政电话业务、

调度电话业务；2) 数据业务，包括调度数据网业务、综合数据网业务、专线数据业务、企业信息化业务等；3) 视频业务，视频会议业务、视频监控业务、会商视频业务等。

按照业务服务对象，分为以下几种：1) 生产、调度业务，包括保护业务、自动化业务、远动业务、安全稳定控制业务、调度电话、调度数据网业务等；2) 企业经营业务，包括营销服务业务(95588)、用户用电信息采集业务等；3) 企业管理及信息化业务，包括数据容灾中心业务、SG-ERP 业务等。

2.2 业务重要度

业务重要度指当该业务发生中断或存在缺陷(业务通道可靠性降低)的情况下，对电网安全稳定运行的影响程度，影响程度越大，业务重要度越高。该指标是评估电力通信业务对电网影响的重要测度指标。

2.3 业务重要度定级

按照电网生产及管理的特点、现状、需求及今后智能电网的发展方向，电力通信网各类业务及其重要度分布如表 1 所示^[18]。

表 1 电力通信网业务及业务重要度一览

Tab. 1 List of electric power communication service and risk importance degree

业务分类	业务名称	业务重要度	编码位置
生产、调度控制类业务	继电保护	10.00	1
	安全稳定控制	10.00	2
	调度数据网	5.98	3
	输变电状态监测	2.98	4
	变电站综合监控	2.86	5
	调度电话	9.38	6
	配网自动化	2.05	7
	配网运行监控	1.20	8
	通信智能化管理系统	0.58	9
	调度会商系统业务	0.77	10
公司经营 管理业务	营销业务管理系统	1.08	11
	客户联络系统	0.61	12
	客户关系管理系统	0.59	13
	95598 及故障抢修管理系统	0.61	14
	电能质量管理系统	1.16	15
	用户用电信息采集	2.14	16
	电力市场交易运营	5.98	17
企业信息化 与管理业务	数据(容灾)中心	5.58	18
	SG-ERP	5.05	19
	会议电视系统	0.62	20
	行政电话业务	0.62	21

3 业务风险均衡度评估测度指标与算法

3.1 业务风险度

业务风险度指当业务完全中断或业务可靠性降低时对电网安全稳定运行影响程度的度量值。对于电力通信网通道段所承载的单业务，其风险水平可以表示为

$$R(E_s(i, j)_{s_i}) = I_{s_i} (1 - P_{E_s(i, j)}) \quad (1)$$

其中： $R(E_s(i, j)_{s_i})$ 表示网络中第 $E_s(i, j)$ 边所承载的 s_i 业务的业务风险值； I_{s_i} 表示网络中第 $E_s(i, j)$ 边上承载的第 i 个业务的重要度。 $P_{E_s(i, j)}$ 表示网络中承载第 i 个业务的第 $E_s(i, j)$ 边的可靠度值。

通道段综合业务风险度指网络中承载业务的某一通道段，即网络中相应的边所承载的各类业务风险度的综合值。

如式(1)所示，网络中边所承载的单业务风险值为 $R(E_s(i, j)_{s_i})$ ，使用 $R(E_s(i, j))$ 表示图中 $E_s(i, j)$ 边承载的所有业务风险值的总和。则有

$$R(E_s(i, j)) = \sum_{i=1}^m (N_i R_{E_s(i, j)_{s_i}}) = P_{E_s(i, j)_{s_i}} \sum_{i=1}^m (N_i I_{s_i}) \quad (2)$$

其中： m 表示网络中边 $E_s(i, j)$ 承载的各类业务类别的数量； N_i 表示边 $E_s(i, j)$ 所承载的第 i 类业务数量。

3.2 业务风险均衡度

1) 全网业务风险度。

定义全网业务风险度 $R(G_s)$ 为网络 $G_s = (N_s, E_s, S)$ 的全网业务风险的综合度量。考虑业务具有双向性， $R_{E_s(i, j)}$ 和 $R_{E_s(j, i)}$ 均表示同一个网络边的业务风险值，则 $R(G_s)$ 可以表示为

$$R(G_s) = [\sum_{i, j} R(E_s(i, j))] / 2 \quad (3)$$

求解全网业务风险度需要进行完成 2 个步骤：首先对网络中第 $E_s(i, j)$ 边所承载的业务的的风险度值进行求和；其次对属于业务网络 G_s 的所有边业务风险度值进行求和。

2) 全网平均业务风险度。

根据全网业务风险度及网络拓扑中边的数量，可以计算全网业务平均风险度如下：

$$R(G_s)_{\text{average}} = R(G_s) / N \quad (4)$$

其中 N 表示全网中的边数量。

3) 网络业务风险均衡度。

网络业务风险均衡度指标使用如下公式计算：

$$B_{R(G_s)} = \frac{\sqrt{\sum_{i, j(i < j)} (R(E_s(i, j)) - R(E_s)_{\text{average}})^2}}{N} \quad (5)$$

利用全网业务风险度均衡度 $B_{R(G_s)}$ 可以从网络业务的风险度及风险分布均衡度 2 个方面对网络总体业务分配均衡性进行度量。业务风险均衡度指标能够反映网络中各业务通道段所承载的业务风险度均衡分布情况，如果该指标值过高，则表示网络

中业务通道上承载的业务分布不均，个别链路上重载，或个别链路上轻载，或个别链路上重要业务(高业务重要度)过于集中；如果该指标值趋于 0，则表示全网的业务安排风险均衡，网络运行风险较小。

3.3 评估编码

1) 网络节点业务连接矩阵编码。

基于节点之间的邻接关系及节点之间业务连接关系，节点间业务状态矩阵 $S(G_s)$ 可以表示为

$$S(G_s)_{n \times n} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

节点业务连接矩阵 $S(G_s)$ 中的元素 $S(G_s)_{ij}$ 等价于 $S_{E_s(i, j)}$ ，表示节点 i 和 j 之间的边 $E_s(i, j)$ 的业务连接状态；若节点 i 和 j 之间有业务连接，则 $S(G_s)_{ij} = 1$ ；若节点 i 和 j 之间无业务连接，则 $S(G_s)_{ij} = 0 (i \neq j)$ ；而 $S(G_s)_{ii} = 0$ ，即节点自身没有业务连接关系。

2) 业务重要度矩阵编码。

电力通信网承载了多种电力通信业务，假设业务的种类为 M 种，则 M 种电力通信业务重要度可用 $M \times 1$ 阶的矩阵形式表示为

$$C = [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_M]^T \quad (7)$$

3) 网络边业务重要度计算。

对于电力通信网的边 $E_s(i, j)$ ，该边所承载的业务矩阵 $S_{E_s(i, j)} = [S_{k1} \ S_{k2} \ \dots \ S_{kM}]$ ，下标 M 表示电力通信业务种类，而 S_{ki} 则表示 $E_s(i, j)$ 边所承载的第 i 类业务的数量。 $S_{E_s(i, j)}$ 为构成 $S(G_s)$ 的一个元素。

用 $I_{E_s(i, j)}$ 表示网络中边 $E_s(i, j)$ 承载的各类业务重要度之和， $I_{E_s(i, j)}$ 与节点业务连接矩阵、边业务矩阵及业务重要度矩阵的关系如下：

$$I_{E_s(i, j)} = S(G_s)_{ij} S_{E_s(i, j)} C \quad (8)$$

4) 全网业务重要度计算。

按照节点之间的业务连接关系，全网业务的重要度分布矩阵可表示为

$$I(G_s) = \begin{bmatrix} I_{E_s(1,1)} & \dots & I_{E_s(1,i)} & \dots & I_{E_s(1,n)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I_{E_s(i,1)} & \dots & I_{E_s(i,i)} & \dots & I_{E_s(i,n)} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I_{E_s(n,1)} & \dots & I_{E_s(n,i)} & \dots & I_{E_s(n,n)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$I(G_s)$ 为 $n \times n$ 阶矩阵，其中 n 为网络中节点数量，而 $I(G_s)$ 中的每个元素则表示任意 2 节点之间

各类业务的重要度之和。

由式(1)可以推演出求解全网业务风险度的计算公式如下：

$$R(G_s) = I(G_s)P(G_s) \quad (10)$$

如果仅考虑风险与业务重要度的关系，则 $R(G_s)$ 的矩阵形式可以表示为： $R(G_s) = I(G_s)$ ，如公式(9)所示。 $I_{E_s(i,j)}$ 可以按照公式(8)计算。

全网承载业务的各边的风险度总和为

$$R_{G_s} = \sum_{i,j(i<j)} I_{E_s(i,j)} \quad (11)$$

再利用公式(4)(5)即可求解全网业务平均风险度及风险均衡度。

而网络中第 i 个节点 N_i 的业务风险度为

$$R_s(N_i) = \sum_j R(E_s(i,j)) = \sum_j I_{E_s(i,j)} \quad (12)$$

4 算例分析

以图2网络拓扑为例进行全网业务风险均衡度的分析与计算。

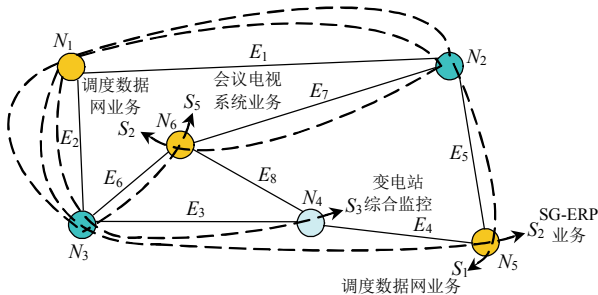


图2 全网业务风险均衡度计算网络及业务拓扑算例
Fig. 2 Sample of network and services topology for network risk balance calculation

1) 网络结构分析。

图2中网络节点集合为 $N_s = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6\}$ ，网络中承载有业务的边集合为 $E_s = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7\}$ ，网络承载的业务集合为 $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ ，其中 S_1, S_2 为调度数据网业务， S_3 为变电站综合监控业务， S_4 为SG-ERP业务， S_5 为会议电视系统业务，各业务路由用图2中虚线表示。

2) 网络拓扑编码及业务矩阵分析。

按照网络与业务拓扑关系，进行网络节点连接及业务矩阵编码，得到网络业务拓扑矩阵：

$$S(G_s)_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

按照业务重要度定级标准，在综合电力通信业务的基础上，得到各项业务重要度，形成电力通信

全业务重要度编码矩阵如下：

$$C = [10 \ 10 \ 5.98 \ 2.98 \ 2.86 \ 9.38 \ 2.05 \ 1.20 \ 0.58 \ 0.77 \ 1.08 \ 0.61 \ 0.59 \ 0.61 \ 1.16 \ 2.14 \ 5.98 \ 5.58 \ 5.05 \ 0.62 \ 0.62]^T$$

以 $E_s(1,2)$ 边为例进行分析，其中： $S_{E_s(1,2)} = [S_{1,2(1)} \ S_{1,2(2)} \ \dots \ S_{1,2(21)}]$ ， $S_{1,2(i)}$ 表示节点 N_1 和节点 N_2 之间第 i 类业务的数量，则在此网络中 $E_s(1,2)$ 边上的业务分布矩阵为 $S_{E_s(1,2)} = [0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]$ 。其边业务矩阵采用同样方法获得。

3) 网络业务风险度计算。

根据 $R(G_s) = I(G_s)$ 可以得到网络中边业务风险分布矩阵如下：

$$R(G_s) = \begin{bmatrix} I_{E_s(1,1)} & I_{E_s(1,2)} & I_{E_s(1,3)} & I_{E_s(1,4)} & I_{E_s(1,5)} & I_{E_s(1,6)} \\ I_{E_s(2,1)} & I_{E_s(2,2)} & I_{E_s(2,3)} & I_{E_s(2,4)} & I_{E_s(2,5)} & I_{E_s(2,6)} \\ I_{E_s(3,1)} & I_{E_s(3,2)} & I_{E_s(3,3)} & I_{E_s(3,4)} & I_{E_s(3,5)} & I_{E_s(3,6)} \\ I_{E_s(4,1)} & I_{E_s(4,2)} & I_{E_s(4,3)} & I_{E_s(4,4)} & I_{E_s(4,5)} & I_{E_s(4,6)} \\ I_{E_s(5,1)} & I_{E_s(5,2)} & I_{E_s(5,3)} & I_{E_s(5,4)} & I_{E_s(5,5)} & I_{E_s(5,6)} \\ I_{E_s(6,1)} & I_{E_s(6,2)} & I_{E_s(6,3)} & I_{E_s(6,4)} & I_{E_s(6,5)} & I_{E_s(6,6)} \end{bmatrix}$$

按照本网络及业务拓扑算例结合公式(8)–(10)可计算得到：

$$R(G_s) = \begin{bmatrix} 0 & 11.96 & 8.53 & 0 & 0 & 0 \\ 11.96 & 0 & 0 & 0 & 5.98 & 5.98 \\ 8.53 & 0 & 0 & 7.91 & 0 & 0.62 \\ 0 & 0 & 7.91 & 0 & 5.05 & 0 \\ 0 & 5.98 & 0 & 5.05 & 0 & 0 \\ 0 & 5.98 & 0.62 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

按照公式(3)则可计算全网业务风险度为 $R_{G_s} =$

$$[\sum_{i,j}^6 R(E_s(i,j))] / 2 = 46.03$$

按照公式(4)可计算全网业务平均风险度为 $R(G_s)_{average} = 5.754$ 。

按照公式(5)，可计算全网业务风险均衡度为 $B_{R(G_s)} = 1.317$ 。

4) 网络节点风险度计算。

按照公式(12)，通过对全网节点进行遍历，可得各节点业务风险度如下： $R_{N_1} = 20.49$ ， $R_{N_2} = 11.96$ ， $R_{N_3} = 8.53$ ， $R_{N_4} = 7.91$ ， $R_{N_5} = 11.03$ ， $R_{N_6} = 6.6$ 。

5 结论

本文提出的业务风险均衡度指标，可以从业务通道段承载业务的风险度水平方面对电力通信网的安全性、可靠性进行评估。这对于不断提高电力通信网的可靠性水平，具有非常重要的意义。评估指标与方法在评价现有网络业务承载的综合风险

度量、合理安全业务通道、组织运行方式等方面具有广泛的应用前景。

关于通信网全网业务风险均衡度的门限值、业务风险均衡度的分布对电力系统可靠性的影响及基于业务风险均衡度的电力通信网络及业务优化方法等,均需进行进一步深入分析与研究。

参考文献

- [1] 赵子岩, 陈希, 刘建明. 建立电力系统通信网可靠性管理体系相关问题的探讨[J]. 电力系统通信, 2006, 27(168): 58-61.
Zhao Ziyang, Chen Xi, Liu Jianming. Issues of establishing a reliable management system in power telecommunication network [J]. Telecommunication for Electric Power System, 2006, 27(168): 58-61(in Chinese).
- [2] Zhao ziyang, Liu jianming, Zhang ruihui, et al. Research of safety and risk assessment technology for power system communication services[C]//2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou, China: IEEE Power Engineering Society (IEEE/PES), Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE), 2010: A110-A111.
- [3] 高雁, 杨靖波, 韩军科. 超-特高压多回路杆塔结构可靠性分析[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 181-184.
Gao Yan, Yang Jingbo, Han Junke. Analysis on structural reliability of multi-circuit tower of EHV and UHV AC Power transmission line[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 181-184(in Chinese).
- [4] 李英民, 郑妮娜, 肖红伟, 等. 基于可靠性理论的特高压送电线路杆塔设计风速确定方法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 5-8.
Li Yingmin, Zheng Nina, Xiao Hongwei, et al. Determination of design value of wind speed for pole and tower of UHV power transmission line based on reliability theory[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 5-8(in Chinese).
- [5] 赵渊, 周家启, 周念成, 等. 大电力系统的可靠性评估解析计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-16.
Zhao Yuan, Zhou Jiaqi, Zhou Niancheng, et al. An analytical approach of bulk power system reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-16(in Chinese).
- [6] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 电力系统运行可靠性最优控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 15-20.
He Jian, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Optimal control of power system's operational reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 15-20(in Chinese).
- [7] 程浩忠, 高赐威, 马则良, 等. 多目标电网规划的分层最优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 11-16.
Cheng Haozhong, Gao Ciwei, Ma Zeliang, et al. The lexicographically stratified method for multi-object optimal electric power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 11-16(in Chinese).
- [8] 彭建春, 何禹清, 周卓敏, 等. 基于可靠性指标逆流传递和顺流归并的配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 40-45.
Peng Jianchun, He Yuqing, Zhou Zhuomin, et al. Distribution system reliability evaluation based on up-stream delivering and down-stream merging of reliability indices[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 40-45(in Chinese).
- [9] 丁开盛, 张学渊, 梁雄健. 通信网可靠性的定义及其综合测度指标[J]. 通信学报, 1999, 20(10): 75-78.
Ding Kaisheng, Zhang Xueyuan, Liang Xiongjian. Definition and general measuring indicator on reliability of communication network[J]. Journal of China Institute of Communications, 1999, 20(10): 75-78(in Chinese).
- [10] 施继红, 宗容, 刘宇明, 等. 电力通信网的抗毁性和拓扑优化研究[J]. 电力系统通信, 2009, 30(203): 11-13.
Shi Zonghong, Zong Rong, Liu Yuming, et al. Study on the invulnerability and topology optimization of power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(203): 11-13(in Chinese).
- [11] 高强, 刘献伟, 邱丽君. 电力系统应急通信网络及其抗毁性研究[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 104-108.
Gao Qiang, Liu Xianwei, Qiu Lijun. Emergency communication network in power system and its invulnerability analysis[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 104-108(in Chinese).
- [12] 王建忠, 张萍, 马洪江, 等. 光互联网的抗毁性设计研究[J]. 应用光学, 2006, 27(2): 92-95.
Wang Jianzhong, Zhang Ping, Ma Hongjiang, et al. Study of optical internet protection and restoration[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(2): 92-95(in Chinese).
- [13] 刘啸林. 网络抗毁性研究介绍[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(6): 135-136, 144.
Liu Xiaolin. Review of the research on network survivability [J]. Computer Applications and Software, 2007, 24(6): 135-136, 144(in Chinese).
- [14] 丁琳, 谭敏生, 肖炜. 基于业务的复杂通信网抗毁性仿真分析[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2009, 23(1): 81-84.
Ding Lin, Tan Minsheng, Xiao Wei. Invulnerability simulation analysis of complex communication networks based on traffic [J]. Journal of University of South China: Science and Technology, 2009, 23(1): 81-84(in Chinese).
- [15] 饶育萍, 林竟羽, 侯德亭. 基于基于最短路径数的网络抗毁性评价方法[J]. 通信学报, 2009, 30(4): 113-117.
Rao Yuping, Lin Jingyu, Hou Deting. Evaluation method for network invulnerability based on shortest route number[J]. Journal on Communications, 2009, 30(4): 113-117(in Chinese).
- [16] 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(4): 84-89.
Peng Jing, Lu Jiping, Wang Yang, et al. Risk assessment of backbone communication networks in WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 84-89(in Chinese).
- [17] 中国电力企业联合会. DL/T 55391—2007 电力系统通信设计技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [18] 赵子岩. 复杂网络理论在电力通信网评估与优化中的应用研究[D]. 北京, 中国电力科学研究院, 2011: 127.



赵子岩

收稿日期: 2011-04-06.

作者简介:

赵子岩(1975), 男, 博士研究生, 主要从事电力通信与网络技术、通信网优化与评估等有关研究工作, E-mail: zzy@epri.sgcc.com.cn;

刘建明(1955), 男, 博士生导师, 教授级高级工程师, 研究方向为信息与通信技术、多媒体技术。

(责任编辑 李兰欣)