

DOI: 10.7667/PSPC160448

基于业务流量的配电通信网可靠性分析

尼俊红, 赵云伟, 申振涛

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

摘要: 电力通信网业务可靠性主要以网络中的业务数量为依据进行分析, 未考虑每条业务在业务流量上的差异。针对这一问题, 通过分析配电通信网的结构、业务类型及分布, 建立了配电通信网业务传输模型, 提出了一种基于业务流量的配电通信网业务可靠性分析方法。通过实例分析了此方法相比于原有基于业务数量的可靠性分析方法的优点。仿真结果验证了所提方法的可行性。

关键词: 网络架构; 配电通信网; 业务可靠性; 业务流量; 传输模型

Reliability analysis of distribution communications network based on traffic flow

NI Junhong, ZHAO Yunwei, SHEN Zhentao

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: The service reliability research of electric power communication network is mainly based on the number of business links, without taking the differences of traffic flow into account. By analyzing the structure, types and distribution of communication service, a transmission model of communication network service is established and a method of reliability analysis of distribution communication network based on traffic flow is proposed. Through an instance, the advantage of this method compared with the method which is based on the number of business links is analyzed. Simulation results verify the feasibility of this method.

Key words: network topology; distribution communication network; service reliability; traffic flow; transmission model

0 引言

电力通信网是承载电网生产、运营、营销、管理信息的国家电力行业专用通信网络, 是保障电网安全、稳定、经济、优质运行的重要基础信息通信平台^[1]。配电通信网是电力骨干通信网的延伸, 是用于传输用户的运行监控、经营管理信息数据的通信网络^[2]。智能电网的不断发展, 带动了配用电环节的发展, 有关配电通信网的研究受到了广泛的关注。文献[3-5]对配电通信网整体运营及网络投资效益方面做了系统的评价, 为配电通信网整体建设提供理论依据。

在网络可靠性研究方面, 目前主要以电力骨干传输网的研究为主, 侧重点主要集中在网络拓扑结构的可靠性^[6-7]、设备可靠性和业务通道可靠性方面。基于拓扑结构研究网络的可靠性算法简单, 意义明确, 但也有明显的不足。例如其没有考虑网络存在共享的问题, 没有考虑数据量及数据的重要度问题。文献[8]从业务重要度和业务链路数的角度对

电力通信网可靠性进行了分析, 但没有考虑业务的多路径问题以及业务断面流量的问题。

本文从业务流量的角度, 结合网络拓扑结构去研究配电通信网的可靠性, 旨在准确地分析通信网的业务可靠性, 为配电通信网的运行维护提供依据, 为配电通信网的规划、优化提供辅助决策支持。

1 配电通信网网架及业务类型

配电通信网建立在配电自动化体系之上。新型配电自动化体系结合了配电网和分布式电源接入方案, 其网络保护可参见文献[9]。配电自动化体系从结构层次上划分为3层, 如图1所示。第一层是系统主站, 是整个配电自动化及监控管理系统的核心。第二层为配电子站和通信子站, 是为了分散主站功能、优化信息传输、清晰系统的结构层次、方便通信系统组网而设置的中间层。第三层为配电终端, 是用于中、低压电网的各种远方监测、控制单元的总称, 包括配电柱上开关监控终端 FTU、配电变压器监测终端 TTU、公用及用户用电所的监控终端

DTU、开关站等^[10]。

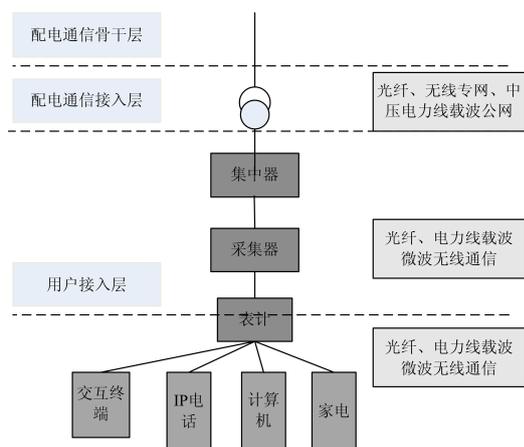


图1 配电自动化网络结构体系

Fig. 1 Architecture of distribution automation network

配电通信网的业务和骨干通信网有所不同。按照电网智能化建设及电力企业管理信息化建设的需求，配用电通信网业务主要分为以下几类^[2]：1) 配网自动化业务；2) 配网运行监控业务；3) 电能质量监控业务；4) 用户用电信息采集业务；5) 其他业务等。其中配电自动化业务对可靠性、实时性、安全性要求最高，是所有业务中重要度最高的业务，在此以配电自动化业务为例分析配电通信网的业务可靠性。

2 业务流量

在网络建设完成后，根据最小二乘法及其改进等^[11]会对于网络中所传输的业务以及每条业务所传输的数据量有相对准确的估值。一般可参照以上估值对网络进行分析。特殊情况下也可采用业务断面流量理论定量计算每条业务所传输的数据量。

业务断面是指两个通信实体节点间所有传输的业务总和。业务断面流量是指业务断面承载的所有业务流量的总和。对于某一类具体的配电通信业务，其业务流量计算公式表示为^[12]

配电通信网业务流量=

$$\frac{\sum \text{业务点流量} \times \text{业务点数量} \times \text{业务点业务间并发比例}}{\text{平均带宽利用率}}$$

3 业务可靠性分析

可靠性的一般定义是^[13]：可靠性是指部件或系统在规定运行条件下，在给定时间内完成规定功能的概率。其数学表示为

$$R(t) = P\{T \geq t\}$$

式中： t 表示观测时间； T 是一个随机变量；

$R(t) \geq 0$ ， $R(0) = 1$ ，且给定 t ， $R(t)$ 是失效时间 T 大于等于 t 的概率。

失效概率定义为

$$F(t) = 1 - R(t) = P\{T < t\}$$

文献[14]给出了通信网可靠性的定义：部件在规定条件下、给定时间内完成规定功能的概率。

可靠性有几个基本测度：有效性、生存性、抗毁性等。目前的研究多从有效性的角度去研究，利用有效性指标来表征网络的可靠性。有效性是指网络在运行状态下，在给定时刻完成规定功能的概率^[15]。有效性可以解释为网络运行时间与某个指定时间段的比值，数学表示为

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

式中： $MTBF$ 表示平均故障间隔时间； $MTTR$ 表示平均维修时间。

大型网络提供的业务数量和种类很多，确定业务量阈值是研究网络业务有效性的关键问题。在分析业务可靠性时，首先应该设定可靠性阈值。业务阈值确定后，网络业务状态就分为两种：一种是网络业务量大于等于给定阈值，网络处于“正常”状态；另一种是网络业务量小于给定阈值，网络处于“异常”状态。利用这种方法将多态系统转化为二态系统，使有效性研究方法变的更加简单。

设配电通信网络由 E 条边和 N 个节点组成，传输 S 条业务，则业务可靠性模型可定义为

$$M = (G(E, N), P, S, Q, \Phi, C_0)$$

式中： $E = (e_1, e_2, \dots, e_e)$ 表示 e 条边； $N = (n_1, n_2, \dots, n_n)$ 表示 n 个节点； $G(E, N)$ 是 e 条边和 n 个节点组成的拓扑网络； $P = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_m)$ 表示业务路径集合， p_m 表示第 m 条路径； $S = (S_1, S_2, \dots, S_i)$ 表示业务集合， S_i 表示第 i 条业务； $Q = (q(S_1), q(S_2), \dots, q(S_i))$ 表示每条业务的数据量集合， $q(S_i)$ 表示业务 S_i 的数据流量；路径与网络图的映射关系为 Φ ； C_0 表示数据量阈值。

下面运用此模型分析配电通信网的可靠性，以配电自动化业务为例从业务数量和业务流量两个方面分析。图2所示为配电通信网络的拓扑示意图。如图所示，配电通信网可以分为：骨干层、汇聚层、接入层。在配电网骨干层采用SDH环网传输，在接入层多采用手拉手型EPON网络或双T型EPON网络传输。在汇聚层使用光纤组成环网并采用1:1保护方式传输。

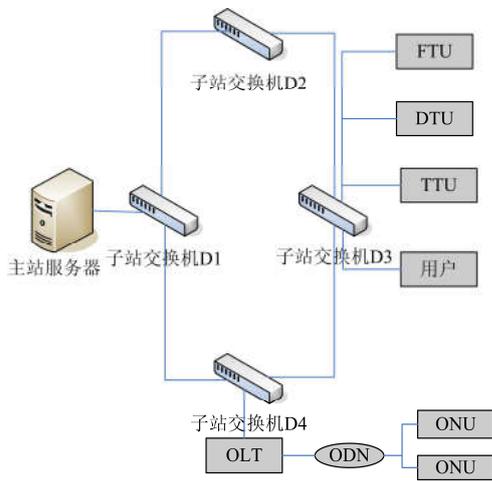


图 2 配电通信网业务传输模型

Fig. 2 Transmission model of distribution communication network service

配电通信网络中所有的用户信息都是从终端用户传到配电主站，主站经过分析汇总再把要传输的信息传输到网络的各个部分。所以配电通信网络的信息通信实际是用户与配电主站之间的通信。在环网中所传输的目的都是传到主站服务器，如图 2 所示，由 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 所收到的数据都需要传输到 D_1 ，再由 D_1 传至主站服务器。由此可得配电通信网络的可靠性分为 3 部分，接入层网络传输的可靠性、汇聚层网络的可靠性和骨干层网络的可靠性。骨干层网络传输与电力通信网骨干层传输方式相似，在此不在做具体分析；接入层网络多为直接传输或采用 EPON 手拉手方式的拓扑网络，其可靠性的研究可参考文献[16]；本文主要研究汇聚层网络的业务可靠性。

汇聚层网络传输模型如图 3 所示。在阴影部分的站点即 D_3 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 都有配电自动化业务要传输到主站服务器。其中 e 表示传输路径； D 表示中间站点。

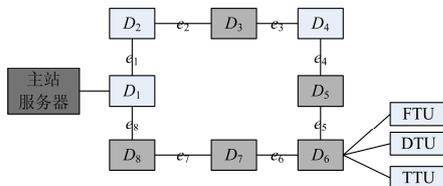


图 3 汇聚层传输模型

Fig. 3 Transmission model of convergence layer

设定有效性阈值为 80%。若网络正常传输的业务数据量大于总体的 80%，则网络处于“正常”状态，否则网络处于“异常”状态。上述拓扑中共

有 5 条业务，用 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 表示，分别代表 D_3, D_5, D_6, D_7, D_8 传输到站点 D_1 的配电自动化业务，其业务流量如表 1 所示。

表 1 业务流量表示

Table 1 Traffic flow

业务	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
流量	1 M	3 M	3 M	2 M	1 M

5 条配电自动化业务中所传输的总的数据量为 10 M，业务量阈值为 80%，即有 8 M 配电自动化业务数据正常传输时称网络处于“正常”状态。由于受环网保护的影响，单纯的设定业务路径进而确定最小路集是不合理的。在此首先给出所有可能的最小路集，然后对所有的最小路集进行验证，最后得到所有满足条件的最小路集。找出所有最小路集后计算每条最小路集的有效性，进而计算网络业务整体的有效性。最小路集用 A_i 表示，参照表 1 可以找出满足条件的最小路集为

$$A_1 = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$$

$$A_2 = \{S_1, S_2, S_3, S_5\}$$

$$A_3 = \{S_2, S_3, S_4, S_5\}$$

计算每一条最小路集的有效性。第一条最小路集中不包括业务 S_5 ，也就是业务 S_5 失效，分析引发故障的原因。 S_5 失效可能是因为 D_1 、 D_8 、 e_7 、 e_8 故障引起的。当 D_1 故障时，所有业务全部中断。当 e_7 故障时，业务 S_5 可以通过 e_8 传输。当 e_8 故障时，业务 S_5 可以通过 e_7 传输。所以能引发业务 S_1 中断的原因只有 D_8 故障或 D_8 与其相连的链路同时故障。从网络约简的角度来看，第二种原因可以等价于第一种，即可以把引发故障的原因归结于 D_8 故障。在此情况下，所有的业务必须通过上层环路传输，其有效性表示为

$$R(A_1) = \prod_{i=1}^7 R(D_i) \prod_{j=1}^6 R(e_j)$$

同理可得 $R(A_2)$ ， $R(A_3)$ 。设所有站点和光纤的有效性均为 0.99，得出每条最小路集有效性数值结果如表 2。

表 2 基于业务流量分析时最小路集有效性

Table 2 Reliability of minimal path sets based on traffic flow

A_i	A_1	A_2	A_3
$R(A_i)$	0.877 521	0.877 521	0.913 517

由容斥定理^[17-18]可得配电自动化业务整体的有效性表示为

$$\begin{aligned}
 R &= P[\bigcup_{i=1}^3 A_i] = \\
 &\sum_{1 \leq i \leq 3} P(A_i) - \sum_{1 \leq i \leq j \leq 3} P(A_i A_j) + \\
 &\sum_{1 \leq i < j < k \leq 3} P(A_i A_j A_k) = \\
 &P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) - [P(A_1 A_2) + \\
 &P(A_1 A_3) + P(A_2 A_3)] + P(A_1 A_2 A_3) = \\
 &0.998\ 703
 \end{aligned}$$

在同样情况下如果不考虑每条业务的数据量, 直接以业务链路数作为分析的基本单元, 可得最小路集为

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \{S_2, S_3, S_4, S_5\} \\
 A_2 &= \{S_1, S_3, S_4, S_5\} \\
 A_3 &= \{S_1, S_2, S_4, S_5\} \\
 A_4 &= \{S_1, S_2, S_3, S_5\} \\
 A_5 &= \{S_1, S_2, S_3, S_4\}
 \end{aligned}$$

同样设所有站点和光纤的有效性均为 0.99, 运用以上方法分别计算每条最小路集的有效性, 最后根据容斥定理可得配电自动化业务整体的有效性表示为

$$\begin{aligned}
 R &= P[\bigcup_{i=1}^5 A_i] = \\
 &\sum_{1 \leq i \leq 5} P(A_i) - \sum_{1 \leq i \leq j \leq 5} P(A_i A_j) + \\
 &\sum_{1 \leq i < j < k \leq 5} P(A_i A_j A_k) + \dots + \\
 &(-1)^{m-1} P(A_1 A_2 A_3 A_4 A_5) = 0.999\ 947
 \end{aligned}$$

从上述计算结果可以看到, 在考虑业务流量的情况下, 计算得到的业务可靠性与基于业务链路数所计算得到的可靠性有所不同, 分析两种方法的利弊如下。

1) 业务可靠性分析是对网络整体性能的衡量, 在分析可靠性时首先按照业务重要度对业务进行归类。每一类业务重要度相同, 所以传输的数据的重要度也相同。决定业务整体可靠性的不是业务链路数, 而应该是业务数据量。从数据量的角度去衡量可靠性更具有权威性。

2) 在接入层环网的每个站点所接入的设备种类可能不同, 设备的个数也会不同, 设备多的站点所对应的业务的数据量就会变大。

3) 业务传输路径的选择及路由策略对可靠性也会有一定的影响, 从数据量的角度去分析可靠性更容易对业务传输路径做出指导。

4 实例分析

某地区的配电通信网络架构如图 4 所示。在此

环网中传输 43 条业务, 其中 9 条配电自动化业务, 7 条配电运行监控业务, 10 条电能质量监测业务, 11 条用电信息采集业务, 6 条其他业务。下面以配电自动化业务为例, 计算该网络的有效性。

每个站点上所要传输配电自动化业务的数据量如表 3 所示。

表 3 站点及业务流量表示

Table 3 Sites and traffic flow					
站点 (业务)	D_1 (S_1)	D_2 (S_2)	D_3 (S_3)	D_4 (S_4)	D_6 (S_5)
流量	2 M	3 M	1 M	2 M	1 M
站点 (业务)	D_7 (S_6)	D_8 (S_7)	D_9 (S_8)	D_{10} (S_9)	
流量	3 M	2 M	1 M	2 M	

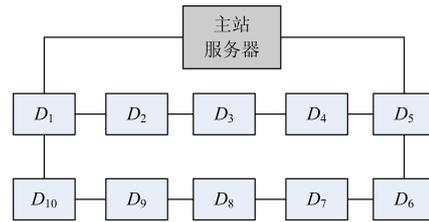


图 4 网络拓扑结构

Fig. 4 Network topology

网络中的配电自动化业务数据量共 17 M, 在此设定业务量有效性阈值为 0.85, 即 $17 \times 0.85 = 14.45$ M。也就是说在此网络中至少有 15 M 业务数据正常传输时才认为网络处于“正常”状态。由此可得配电自动化业务的最小路集为

$$\begin{aligned}
 S_{MPS} &= \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6\} = \\
 &\{(S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9) \\
 &(S_1, S_2, S_4, S_6, S_7, S_8, S_9) \\
 &(S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_9) \\
 &(S_1, S_2, S_3, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9) \\
 &(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_8, S_9) \\
 &(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8)\}
 \end{aligned}$$

此网络中站点和光纤的有效性已给出, 如附表 1 所示(见附录)。

计算每条最小路集的有效性, 得表 4 结果。

由最小路集的有效性计算业务整体有效性, 根据容斥定理有

$$R = P[\bigcup_{i=1}^6 A_i] = 0.999\ 999\ 78$$

如果不考虑业务流量, 只是以业务链路作为分析业务有效性的基础去计算有效性, 有 8 个最小路集, 运算过程中将会出现 $2^8 - 1$ 个精确到小数点后 6

表 4 最小路集的有效性

Table 4 Reliability of minimal path sets

最小路集	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
有效性	0.999 390	0.999 479	0.999 424	0.999 449	0.999 507	0.999 375

位以上的数值，运算较为繁琐，在此只给出所得结果为

$$R = P[\bigcup_{i=1}^8 A_i] = 0.999 999 97$$

按照上述方法分别计算所有业务的可靠性，所得结果如附表 2 所示(见附录)。其中 R_1 表示基于业务流量所计算得到的有效性数值， R_2 表示基于业务链路数计算得到的有效性数值。

附录

附表 1 网元有效性

Attached Table 1 Reliability of network element

网元	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
有效性	0.999 978	0.999 954	0.999 987	0.999 972	0.999 996	0.999 987	0.999 978
网元	D_8	D_9	D_{10}	e_1	e_2	e_3	e_4
有效性	0.999 988	0.999 985	0.999 997	0.999 989	0.999 967	0.999 994	0.999 899
网元	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}	
有效性	0.999 979	0.999 912	0.999 847	0.999 963	0.999 985	0.999 948	

附表 2 网络所有业务的可靠性

Attached Table 2 Reliability of all the service

业务种类	配电自动化业务	配电运行监控业务	电能质量检测业务	用电信息采集业务	其他业务
有效性 R_1	0.999 999 78	0.999 999 71	0.999 998 97	0.999 999 46	0.999 999 67
有效性 R_2	0.999 999 997	0.999 999 996	0.999 999 989	0.999 999 989	0.999 999 999

参考文献

[1] DL/T 554-2011 电力通信运行管理章程[S]. DL/T 554-2011 the charter of operation and management of power communication systems[S].

[2] 国家电网公司. 电力通信十二五规划总报告[R]. 北京: 国家电力调度通信中心, 2010. State Grid Corporation of China. The twelfth five-year plan of power communication (general report)[R]. Beijing: National Electric Power Dispatching and Communication Center, 2010.

[3] 刘胜利, 曹阳, 冯跃亮, 等. 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 119-125. LIU Shengli, CAO Yang, FENG Yueliang, et al. Research and application of distribution grid investment effectiveness evaluation and decision-making model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 119-125.

[4] 王晓勇. 配电自动化系统中通信网络的规划与组建[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013. WANG Xiaoyong. Planning and construction of communication network in distribution automation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Post and Telecommunication, 2013.

[5] 刘健, 林涛, 赵江河, 等. 面向供电可靠性的配电自动化系统规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 52-60. LIU Jian, LIN Tao, ZHAO Jianghe, et al. Specific planning of distribution automation systems based on the requirement of service reliability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 52-60.

[6] 项佩. 电力通信网络拓扑可靠性分析及评估系统实现[D]. 昆明: 云南大学, 2013. XIANG Pei. Network topology analysis for statutes of the electric power communication network and evaluation system[D]. Kunming: Yunnan University, 2013.

- [7] 郝川, 李英涛, 张中兆, 等. 通信网络的拓扑可靠性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(1): 87-89, 92.
HAO Chuan, LI Yingtao, ZHANG Zhongzhao, et al. Reliability analysis of communication network topology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(1): 87-89, 92.
- [8] 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 Si. The reliability evaluation of power communications networks based on service importance[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [9] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [10] 贾巍. 配电网自动化体系结构和通信方式的研究[J]. 供用电, 2008, 25(3): 49-51.
JIA Wei. Study of distribution network automation architecture and communication method[J]. Distribution & Utilization, 2008, 25(3): 49-51.
- [11] 陈毅波, 郑玲, 姚建刚. 基于粗糙集理论与 D-S 证据理论改进的多元回归负荷预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 62-67.
CHEN Yibo, ZHENG Ling, YAO Jiangang. Improved multiple regression load forecasting method based on rough set theory and D-S evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 62-67.
- [12] 赵子岩, 胡浩. 一种基于业务断面的智能配用电通信网业务流量计算方法[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 12-17.
ZHAO Ziyang, HU Hao. A new service section based method to calculate service data flow of communication network for smart power distribution and utilization system[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 12-17.
- [13] EBELING C E. An introduction to reliability and maintainability engineering[M]. Boston: McGraw Hill Publication, 1997.
- [14] ITU-T Recommendation E.800-1994. Telephone network and ISDN quality of service, network management and traffic engineering: terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability[S].
- [15] VYASARAJ V M. Quality and reliability in communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1988, 6(8): 1284-1286.
- [16] 鲍兴川. 配电通信网接入层 EPON 保护组网可靠性与性价比分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 96-101.
BAO Xingchuan. Reliability and cost performance ratio analysis on EPON protection networking of power distribution communication network access layer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 96-101.
- [17] 唐善刚. 广义容斥原理及其应用[J]. 山东大学学报(理学版), 2009, 44(1): 83-90.
TANG Shangang. Generalized principle of inclusion exclusion and its application[J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2009, 44(1): 83-90.
- [18] 孙艳蕊, 赵连昌, 张祥德. 计算网络可靠度的容斥原理算法[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(5): 830-833.
SUN Yanrui, ZHAO Lianchang, ZHANG Xiangde. An inclusion-exclusion algorithm for network reliability[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2007, 28(5): 830-833.

收稿日期: 2016-03-30; 修回日期: 2016-05-13

作者简介:

尼俊红(1971-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力通信网可靠性分析;

赵云伟(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电通信网可靠性分析; E-mail: 1048884216@qq.com

申振涛(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为无线资源分配及可靠性分析。E-mail: shenzhentaotao66@163.com

(编辑 周金梅)