

# 电力通信系统可靠性模型研究

熊小伏<sup>1</sup>, 田娟娟<sup>1</sup>, 周家启<sup>1</sup>, 欧阳前方<sup>2</sup>

(1. 重庆大学高电压及电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 大连电力勘察设计院, 辽宁 大连 116011)

**摘要:** 电力通信系统在电力系统运行控制和安全保护等方面起着不可替代的作用, 其可靠性研究是电力系统可靠性研究的重要组成部分。从非冗余系统、完全冗余系统、部分冗余系统以及备用系统的可靠性模型出发, 分析建立了典型电力通信系统的可靠性模型, 对电力通信系统的可靠性评估提供了依据, 并为完善电网可靠性评估方法提供了帮助。

**关键词:** 电力通信系统; 可靠性; 冗余系统

## Reliability model research of electric power communication system

XIONG Xiao-fu<sup>1</sup>, TIAN Juan-juan<sup>1</sup>, ZHOU Jia-qi<sup>1</sup>, OUYANG Qian-fang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Dalian Electric Power Exploration and Design Institute, Dalian 116011, China)

**Abstract:** The electric power communication system plays a very important role in the operation control and security protection of power systems, so its reliability is an important part of power system reliability. This paper discusses the reliability models of non-redundancy system, entirely redundancy system, portion redundancy system and standby system, and gives the reliability model of typical electric power communication system, which provides foundation for the reliability evaluation of electric power communication system and gives help to improve the reliability evaluation of power systems.

**Key words:** electric power communication system; reliability; redundancy system

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)14-0028-05

## 0 引言

电力通信为电网调度、控制、管理提供了广泛的技术支撑, 最大限度地满足了各个部门的通信要求。因此, 电力通信已被纳入到电力生产的安全考核项目中。近年来, 电力系统重大安全事故时有发生, 引发了关于广域安全的深入研究, 即从保护电网整体或区域电网的角度出发, 保证整个电力系统的安全稳定运行, 这同时也对电力通信系统的安全可靠性提出了新的要求。因此, 研究电力通信系统的可靠性评估模型和方法, 对提高和保障电力系统的整体可靠性将起到十分重要的作用。

电力通信系统可靠性问题既有通信系统的共性, 又有其自身特点。目前国内外关于通信系统可靠性的研究尚显不足, 国内的研究主要集中在通信电源系统的可靠性研究<sup>[1,2]</sup>、总线系统的可靠性研究<sup>[3]</sup>以及通信中数据传输的可靠性研究<sup>[4]</sup>; 国外则主要集中在通信系统可靠性算法的研究<sup>[5~7]</sup> (包括布尔代数法、神经网络法、递归算法等) 和系统的可靠性分析<sup>[8~14]</sup>。由此可见, 目前针对电力通信系

统可靠性的研究相对较少, 其可靠性模型以及系统的可靠性评价方法均有待进一步的深入研究。

## 1 通信系统可靠性及指标

通信系统可靠性是指在人为或非人为的外来破坏以及内在老化的作用下, 网络在规定条件下、规定时间内的生存能力。无论是在网络的规划设计还是运行维护阶段, 可靠性都是一个重要的技术性能指标。

抗毁性和生存性是最早提出的两个与可靠性相关的网络可靠性指标。网络的抗毁性表征了网络系统在人为作用下网络的可靠性。网络的生存性一般用连通概率表示。网络的有效性是一个基于网络性能的可靠性指标, 表征了网络系统在网络部件失效条件下满足通讯性能要求的程度。

通信系统可靠性评估, 通常采用平均故障间隔时间 *MTBF* (*Mean Time Between Failure*)、平均运行 (无故障) 时间 *MTTF* (*Mean Time to Failure*)、平均修复时间 *MTTR* (*Mean Time to Restore*) 以及可用度 *A*、不可用度 *U* 来衡量, 其关系为:

$$MTBF_i = MTTF_i + MTTR_i \quad (1)$$

$$A_i = MTTF_i / MTBF_i \quad (2)$$

$$U_i = MTTR_i / MTBF_i \quad (3)$$

其中:  $\lambda_i$  为元件  $i$  的故障率;  $\mu_i$  为元件  $i$  的修复率。

一般在计算中, 各个元件或任务功能模块的寿命函数服从指数分布<sup>[15~17]</sup>, 则有:

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (4)$$

$$MTTF_i = 1/\lambda_i \quad (5)$$

$$MTTR_i = 1/\mu_i \quad (6)$$

其中:  $R_i$  为元件  $i$  的可靠度,  $\lambda_i$ 、 $\mu_i$  同前。

## 2 电力通信系统的结构及可靠性模型

### 2.1 电力通信系统的结构

电力通信网是电力系统的专用网, 是一个包含多种通信设备, 多种网络结构, 具有电力系统行业特色的通信服务网络, 电力通信网发展的现状是多种设备共存、多种网络互通、多种监控系统独立运行。电力通信系统可靠性受到通信设备类型、运行方式以及工作环境等三个方面影响因素, 针对系统安全可靠薄弱环节的要求, 可采用冗余技术、 $N+1$ 备用、主备用方式、人工切换方式、自动报警寻呼、改善运行环境、采用高可靠性设备等措施来提高电力通信系统的安全可靠性<sup>[23]</sup>。相关文献<sup>[18~24]</sup>介绍了基于 SDH 自愈环结构的电力通信系统结构、基于多

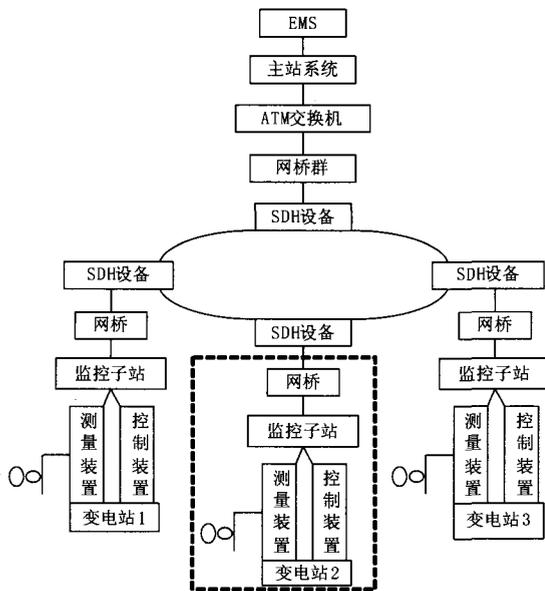


图1 电力通信系统结构

Fig.1 Structure of electric power communications system

Agent 技术的电力通信系统结构等等。限于篇幅, 本文只介绍常用的基于 SDH 自愈环结构的电力通信系统结构, 如图 1 所示。

### 2.2 典型电力通信系统的可靠性模型

电力通信网络系统的可靠性评价的基本思路: 采用  $MTBF$ 、 $MTTF$ 、 $MTTR$  等参数评估基础产品(包括设备、仪器、硬软件平台)的可靠性, 采用非冗余系统、完全冗余系统、部分冗余系统以及备用系统来评估系统或分系统的可靠性, 然后根据系统的拓扑结构评价整个网络系统的可靠性水平。

#### 2.2.1 非冗余系统

非冗余系统, 即串联系统。由  $N$  个独立元件或独立任务功能模块组成的系统, 只有当  $N$  个元件或任务功能模块都正常工作, 系统才能正常工作; 系统中任何一个元件或任务功能模块的失效都会导致该系统的失效。系统寿命为第一个出现故障的元件或任务功能模块的寿命。此时, 系统可靠度  $R_S$ 、可用度  $A_S$  以及  $MTTF_S$  为:

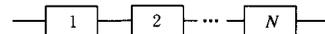


图2 非冗余系统

Fig.2 Non-redundancy system

$$R_S = \prod_{i=1}^N R_i \quad (7)$$

$$A_S = \prod_{i=1}^N A_i \quad (8)$$

$$MTTF_S = 1/\lambda_S = 1/\sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (9)$$

#### 2.2.2 完全冗余系统

完全冗余系统, 即并联系统。由  $N$  个独立元件或独立任务功能模块组成的系统, 只要系统中有一个元件或任务功能模块正常工作, 系统就能正常工作; 只有系统中全部元件或任务功能模块都失效, 系统才失效。系统寿命为系统中  $N$  个并联元件或任务功能模块中最好的元件或任务功能模块的寿命。此时, 系统可靠度  $R_S$ 、可用度  $A_S$  以及  $MTTF_S$  为:

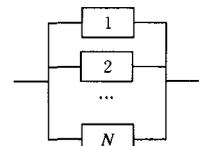


图3 完全冗余系统

Fig.3 Entirety redundancy system

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i) \quad (10)$$

$$A_S = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - A_i) \quad (11)$$

$$MTTF_S = \int_0^{\infty} R_S dt = \int_0^{\infty} [1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i)] dt \quad (12)$$

2.2.3 部分冗余系统

部分冗余系统,是指由  $N$  个独立元件或具有独立任务功能模块组成的系统,只有系统中正常工作元件或任务功能模块数不小于某一阈值(假定为  $M$ ),系统才能正常工作,亦称为  $M/N$  表决系统。假设系统  $N$  个元件或任务功能模块具有相同的可靠度和可用度。此时,系统可靠度  $R_S$ 、可用度  $A_S$  以及  $MTTF_S$  为:

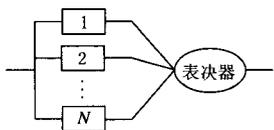


图4 部分冗余系统

Fig.4 Portion redundancy system

$$R_S = \sum_{i=M}^N C_N^i R_0^i (1 - R_0)^{N-i} \quad (13)$$

$$A_S = \sum_{i=M}^N C_N^i A_0^i (1 - A_0)^{N-i} \quad (14)$$

$$MTTF_S = \int_0^{\infty} R_S dt = \int_0^{\infty} [\sum_{i=M}^N C_N^i R_0^i (1 - R_0)^{N-i}] dt \quad (15)$$

其中:  $R_0$ 、 $A_0$  为  $N$  个相同元件的可靠度和可用度。

2.2.4 备用系统

备用系统,或称旁联系统,是指系统中存在多个完全功能相同的元件或任务功能模块,当其中一个失效后,通过故障监测或转换装置使得另外一个承接失效元件功能而投入运行;只有主用系统与所有备用系统的同时故障导致整个系统的失效。系统寿命为所有元件或任务功能模块的寿命之和。

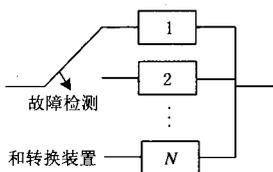


图5 备用系统

Fig.5 Standby system

假定故障监测或转换装置均能够可靠动作,即为理想切换状态。此时,假设各个元件相同,则系

统的可靠度为:

$$R_S(t) = e^{-\lambda t} [1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{N-1}}{(N-1)!}] \quad (16)$$

以两备用(记做 1 和 2)为例,系统可用度  $A_S$ 、 $MTTF_S$  为:

$$A_S = A_1 + \bar{A}_1 A_2 \quad (17)$$

$$MTTF_S = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \quad (18)$$

若故障监测或转换装置不能实现理想切换,则对系统的可靠性会产生影响。因此在可靠性要求较高的系统中,对故障监测或转换装置的可靠性有严格要求。若考虑非理想切换,则在表达式中相应位置引入故障监测或转换装置的可靠度即可。

2.3 典型电力通信系统可靠性模型

对于图 1 所示的电力通信网络而言,不同规模的电网其变电站的数目不等,且是相互独立的并联关系。对主站系统而言,一般采用主、备用方式来提高其可靠性水平。对于 SDH 环而言,由于具有良好的自愈性和网络性,网络生存性极强。而对于电力信息网络的完整性要求而言,取只有同时接受到大于某一规定值数目的监控子站的信息数据,才能满足要求。

假设各元件的可用度:测量装置  $A_1$ 、控制装置  $A_2$ 、监控子站  $A_3$ 、网桥  $A_4$ 、SDH 环  $A_5$ 、网桥群  $A_6$ 、ATM 交换机  $A_7$ 、主站系统(主、备用设备完全相同)  $A_8$ 、EMS 通信接口  $A_9$ (其下脚标分别在图 6 中表示相应的元件)。

图 1 中虚线框中的子系统(记做子系统 X),模块 1 与模块 2 并联后再与模块 3、4 串联,根据式(8)、(11)得到子系统 X 的可用度  $A_X$ :

$$A_X = (A_1 + A_2 - A_1 A_2) A_3 A_4 \quad (19)$$

对于各并联变电站信息完整度要求,系统中有  $n$  个变电站,假设要求至少接受不小于  $m$  个变电站的数据。依据式(14),得到  $m/n$  子系统(记做子系统 Y)的可用度  $A_Y$ :

$$A_Y = \sum_{i=m}^n C_n^i A_X^i (1 - A_X)^{n-i} \quad (20)$$

主站系统为两备用系统,根据式(18),得到主站系统(记做子系统 Z)的可用度  $A_Z$ :

$$A_Z = 2A_8 - A_8^2 \quad (21)$$

综上,图 1 所示的典型电力通信系统(记做系统 S)的可用度  $A_S$  为:

$$A_s = A_Y A_5 A_6 A_7 A_Z A_9 \quad (22)$$

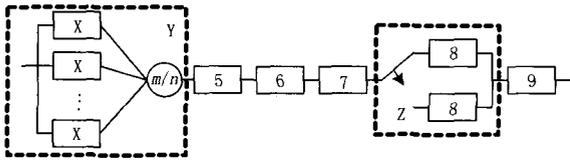


图 6 电力通信系统等效模型

Fig. 6 Equivalent model of electric power communication system

由上式看到, 进行等效以后此典型电力通信系统为一串联模型, 其中子系统 Y、子系统 Z 以及元件 5 因冗余、备用及自愈功能而具有较高的可靠性, 故影响系统可靠性水平的关键在于元件 6、7、9 的可靠性水平。

### 3 算例分析

在上述分析的基础上, 利用系统中各个功能模块的可用度数据计算整个系统的可靠性。表 1 为结合实际情况进行的假设数据。表 2 为根据表 1 数据计算得到的子系统及系统的可用度。

表 1 元件可用度数据

Tab.1 Data of components availability

元件	可用度 A	元件	可用度 A
1	0.990	6	0.990
2	0.990	7	0.980
3	0.970	8	0.950
4	0.965	8(备用)	0.950
5	0.999	9	0.985

表 2 子系统及系统的可用度

Tab.2 Availability of sub-system and system

(子) 系统	子系统 X	子系统 Y	子系统 Z	系统 S
可用度 A	0.9360	0.9974	0.9975	0.9498

注: m/n 表决子系统中 n=10, m=7

从电力通信系统的网络结构及计算结果, 可以看到, 网络的薄弱环节主要在网络中串联且无备用的任务功能模块, 其可靠性程度的高低对系统可靠性影响较大, 故应保证此类元件的可靠性水平或采用相应的冗余系统。对于表决系统而言, 高阶事故的小概率性使得其可靠性水平得以保证。对于主站系统, 备用系统的存在大大提高了其整体可靠性, 但同时需要加强切换装置的可靠性水平。

同时, 电力通信系统的可靠性不仅与元件或任务功能模块本身的可靠性有关, 而且与网络的拓扑结构密切相关。提高系统中元件或任务功能模块的可靠性水平, 改善网络拓扑结构, 采用合理的网络

通信协议都可以达到优化系统可靠性的目的。

### 4 结论

本文分析了电力通信网络的结构, 从几种典型网络结构的可靠性模型出发, 建立了典型电力通信系统的可靠性模型, 通过算例验证了该方法的可行性, 为综合评价电力通信系统的可靠性提供了一定的理论依据。

在研究网络拓扑相关的可靠性指标的同时, 应进一步研究电力通信系统信息相关的可靠性指标参数, 例如信息丢失量、信息有效性等, 实现对电力通信系统可靠性的整体评价。

### 参考文献

- [1] 朱雄世. 通信电源系统的可靠性[J]. 通信电源技术, 1997, 4(1): 1-4.  
ZHU Xiong-shi. The Reliability of Communications Electrical Source System[J]. Communications Electrical Source Technique, 1997,4(1):1-4.
- [2] 李克民, 王改娥. 通信电源系统可用度和设备的可靠性统计与计算[J]. 邮电设计技术, 1995, (2): 44-52.  
LI Ke-min, WANG Gai-e. Statistic and Calculation of Availability of Communications Electrical Source System and Facility Reliability[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunication, 1995, (2):44-52.
- [3] 刘文怡, 李进武. 基于 RS485 总线多机通信系统可靠性的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005:102-104.  
LIU Wen-yi, LI Jin-wu. The Research of Reliability of Multi-computer Communication System via RS485 Bus[J]. 2005:102-104.
- [4] 李翠然. 应用数理统计评价通信系统可靠性[J]. 铁道运营技术, 1999, (5): 60-61.  
LI Cui-ran. Reliability Estimate of Communications System Applying Mathematical Statistics Method[J]. Railway operation Technology, 1999, (5): 60-61.
- [5] Fratta F, Montanari U G. A Boolean Algebra Method for Computing the Terminal Reliability in a Communication Network[J]. IEEE Trans on Circuit Theory, 1973, 20(3): 203-211.
- [6] Hansler E. A Fast Recursive Algorithm to Calculate the Reliability of a Communication Network[J]. IEEE Trans on Communications, 1972, 20(3):637-640.
- [7] Aboelfotoh H M F, Al-Sumait L S. A Neural Approach to Topological Optimization of Communication Networks, with Reliability[J]. IEEE Trans on Reliability, 2001, 50(4): 397-408.
- [8] Lam Y F, LI V O K. Reliability Modeling and Analysis of Communication Network with Dependent Failures[J]. IEEE Trans on Communications, 1986, 34(1):82-84.
- [9] Murthy V V. Quality and Reliability in Communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 1988, 6(8):1284-1286.
- [10] Sanso B, Soumis F. Communication and Transportation

- Network Reliability Using Routing Models[J]. IEEE Trans on Reliability. 1991,40(1):29-38.
- [11] Kubat P. Assessing Throughput and Reliability in Communication and Computer Networks[J]. IEEE Trans on Reliability,1988, 37(3):308-311.
- [12] Zafropulo P. Reliability Optimization in Multiloop Communication Networks[J].IEEE Trans on Communication, 1973,21(8):898-907.
- [13] Niver E, Mouskos K, Dwyer P,et al.Evaluation of Transmits Communication System[A]. In:10th Mediterranean Electro-technical Conference[C].2000:664- 667.
- [14] Jan Rong-hong,Hwang Fung-Jen,Cheng Sheng-Tzong. Topological Optimization of a Communication Network Subject to a Reliability Constraint[J]. IEEE Trans on Reliability,1993,42(1):63-70.
- [15] R 别林登, R. N. 阿伦,周家启,等译. 工程系统可靠性评估—原理与方法[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1988.
- [16] 金星, 洪延基, 等. 工程系统可靠性数值分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [17] 周家启, 任震, 译. 电力系统可靠性评估[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986.
- [18] 夏江珍, 谢同林. 大跨距无中继光纤通信系统—西部电力通信系统的一种技术选择[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (151): 32-35.  
XIA Jiang-zhen, Xie Tong-lin. Long Span Unrepeated Fiber Communication System Technical Option Suitable for the West Electric Power Communication[J]. Telecommunications for Electric Power System,2005, 26(151):32-35.
- [19] 韩际晖. 电力通信系统 1+1 交换方案. 电力系统通信, 2005, 26 (148): 19-21, 24.  
HAN Ji-Hui. Switching Scheme of Electric Power Communication System[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005,26(148):19-21,24.
- [20] 江黛如, 金生明. 电力通信系统中的 SDH 自愈环网及其应用探讨[J]. 电力系统通信, 2006, 27: 32-35, 39.  
JIANG Dai-ru, JIN Sheng-ming. Discussion About The Construction and Application of SDH Self-healing Ring in Electric Power Communication System[J]. Telecommunications for Electric power System, 2006, 27:32-35.
- [21] 李伟英, 高强. 基于 SEE—CMM 的电力通信系统安全性评估[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (155): 34-39.  
LI Wei-ying, GAO Qiang. Research on Security Evaluation of Telecommunication Network for Electric Power System Based on The Methods of SSE-CMM[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005,26 (155):34-39.
- [22] 罗雪军, 高强, 张鑫林. 一种 SEE—CMM 的电力通信系统风险度算法分析[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (158): 11-13, 24  
LUO Xue-jun, GAO Qiang, ZHANG Xin-lin. Research on SSE-CMM Based Security Evaluation Algorithmic of Power Communication System[J]. Telecommunications for Electric power System, 2005,26(158):11-13,24.
- [23] 李良沫. 电力通信系统安全可靠性的技术保护措施[J]. 电力安全技术, 2000, 4 (2): 38-39.  
LI Liang-mo. The Technical Measures of Electric Power Communications System Reliability[J]. Electric Safety Technology, 2000, 4(2):38-39.
- [24] 王小渭, 汪立新, 武自芳. 分布式电力远东通信系统及其可靠性研究[J]. 微电子学与计算机, 1999, 3:29-31.  
WANG Xiao-wei, WANG LI-xin, WU Zhi-fang. The Distributed Power System Telemechanics Communications System and Its Reliability Research[J]. Micro-electronics and Computer, 1999, 3:29-31.

收稿日期: 2007-01-09

作者简介:

熊小伏 (1962-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统保护与监控的科研、教学工作;

田娟娟 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断及可靠性; E-mail:juanjuansweet@tom.com

周家启 (1938-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统规划与可靠性、电力系统风险分析等方向的教学和科研工作。

(上接第 27 页 continued from page 27)

- [14] Ianni A. Reinforcement Learning and the Power Law of Practice: Some Analytical Results[J]. Proceeding of the North American Winter Meetings of the Econometric Society,2001.
- [15] 邹斌, 言茂松, 谢光前. 不同定价方式下电力拍卖市场运行特征的比较研究(一): 模型与算法[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):7-14.  
ZOU Bin, YAN Mao-song, XIE Guang-qian.Comparison Among Pricing Methods in Pool-Based Electricity

Market by Agent-Based Simulation,Part One: Model and Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(16):7-14.

收稿日期: 2007-02-07; 修回日期: 2007-03-29

作者简介:

秦绪彬 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: qxbvsqxb@163.com

邹斌 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向电力市场和自动化。