

故障树分析法在变电站通信系统 可靠性分析中的应用

韩小涛, 尹项根, 张 哲

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

APPLICATION OF FAULT TREE ANALYSIS METHOD IN RELIABILITY ANALYSIS OF SUBSTATION COMMUNICATION SYSTEM

HAN Xiao-tao, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe

(School of Electrical & Electronic Eng., Huazhong University of Sci.&Tech., Wuhan 430074,
Hubei Province, China)

ABSTRACT: With the development of electronic and informational technology in Instrument & Control (I&C) area, the reliability of substation communication system (SCS) is playing an important role in the decision of the performance of SCS. As a powerful tool in system failure analyzing and system failure probability prediction, Fault tree analysis (FTA) can be applied in the reliability analysis and prediction of SCS. The basic concept of reliability theory, the principle of FTA method and the quantitative and qualitative ways to solve the reliability problem are described, and the failure models of SCS are abstracted in accordance with the characteristic of SCS. The main factors affecting the failure of SCS can be determined by qualitative analysis in which the minimal cut set analysis (MCSA) is used. For frequent topological forms of SCS the quantitative analysis is used to analyze their availabilities to illustrate the influence of different topological forms on reliability of SCS. Using FTA the analysis lever of SCS reliability can be improved and the results of the analysis can be used as the theoretical basis for the reliability analysis of newbuilt SCS.

KEY WORDS: Fault tree analysis (FTA); Reliability; Substation communication system (SCS); Minimal cut set analysis (MCSA); Network topology

摘要:随着测控技术的电子化和信息化的发展, 变电站通信系统的可靠性直接关系着变电站自动化水平。故障树作为系统失效分析和预测系统故障发生概率的有力工具, 可应用于变电站通信系统的可靠性分析与预测。文章介绍了故障树分析法的基本原理及其定性和定量分析方法。结合变电站通信系统的特点, 建立了变电站通信系统的失效模型, 采用最小割集分析法进行了定性分析, 以确定影响变电站通信系统失

效的主要因素, 针对变电站通信系统的常见拓扑结构定量分析了其有效度, 说明了不同拓扑结构对通信系统可靠性的影响。应用故障树分析法, 可以提高变电站通信系统的可靠性分析水平, 并可作为新建变电站通信系统可靠性分析的理论依据。

关键词:故障树分析法; 可靠性; 变电站通信系统; 最小割集分析; 网络拓扑

1 引言

随着微机技术和智能电子设备 (Intelligent Electronic Device, IED) 的迅速发展, 微机保护装置、微机故障录波装置、电子式互感器和智能电能测量装置等在变电站系统内得到了大量使用^[1]。由于智能设备的应用, 大量的变电站运行、状态和控制信息需要传送。因而负责传送这些信息的通信系统的性能便成为进一步提高变电站自动化水平的关键因素。对通信系统的研究除了研究其传输介质、通信速度、拓扑结构和服务品质外, 对通信系统可靠性的研究也是一个重要方面。

以往对可靠性的研究主要集中在输电网、配电网自身的可靠性建模和分析算法的研究上^[2~4], 或对不同的电网连接方式进行供电可靠性的研究^[5]。随着智能设备性能的提高, 通信系统的可靠性将直接影响变电站运行的可靠性, 也关系着整个电网运行的可靠性。

故障树分析法 (Fault Tree Analysis, FTA) 由美国贝尔电话实验室的 H.A.Watson 首先提出, 它是一种系统可靠性分析方法。利用故障树可以寻找

潜在故障或进行故障诊断,还可以进一步预测系统故障发生的概率。对系统进行可靠性分析与预测,已广泛应用于工程实践^[6]。对于由多个环节构成的变电站通信系统,也可以应用故障树分析法研究其系统的可靠性。

2 可靠性理论的基本概念

可靠性理论是进行故障树分析的基础。其中几个关键的技术指标,如可靠度、失效率、平均寿命、系统有效度和失效率等^[6]介绍如下:

(1) 可靠度 R 产品在规定的条件下和规定的时间 t 内,完成规定功能的概率称为该产品的可靠度,记为 $R(t) = P(T > t)$, $t \geq 0$ 。

(2) 失效率 I 单位时间内失效的元器件数与元器件总数之比称为失效率,它也是时间的函数。

(3) 平均寿命 对于不可修复产品,平均寿命指的是平均工作时间 (Mean Time To Failure, MTTF),对于可修复产品,平均寿命指的是相邻故障间的平均工作时间 (Mean Time Between Failure, MTBF)。二者统称为平均寿命。数学上就是寿命 T 的数学期望 $E(T)$ 。如果寿命 T 具有分布密度函数 $f(t)$, 则

$$\begin{aligned} MTBF = E(T) &= \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt = \int_0^{+\infty} tf(t)dt = \\ \int_0^{+\infty} t dF(t) &= \int_0^{+\infty} \int_0^t du dF(t) = \int_0^{+\infty} \int_u^{\infty} dF(t) du = \\ \int_0^{\infty} [1 - F(u)] du &= \int_0^{\infty} R(u) du \end{aligned} \quad (1)$$

如果可靠度服从指数分布,即 $R(t) = P(T > t) = e^{-It}$, $t \geq 0$, 则

$$MTBF = E(T) = \int_0^{\infty} R(u) du = \int_0^{\infty} e^{-Iu} du = 1/I \quad (2)$$

(4) 系统有效度 A $A = MTBF / (MTBF + MTTR)$

式中 $MTTR$ (Mean Time To Repair) 为系统平均维修时间。

(5) 系统失效率 q $q = MTTR / (MTBF + MTTR)$ 。由上可见 $A + q = 1$ 。

3 故障树分析法的基本理论

故障树分析法是研究引起系统发生故障这一事件的各种直接的或间接的原因(例如硬件、软件、环境、人为等因素),在这些原因间建立逻辑关系,并用逻辑框图(即故障树)表示的一种方法。故障树以图形化的方式表示了在一个系统内故障或其

它事件之间的交互关系。在故障树中,底事件(basic event)通过一些逻辑符号(如与门和或门)连接到一个或多个顶事件(top event)。顶事件一般指危及系统的事件或是不希望发生的系统故障。底事件通常指部件故障或者是人员的错误操作。

故障树分析法的基本步骤如下:

定义系统和系统故障,确定系统故障事件,即“顶事件”;

建造故障树;

进行定性与定量分析。

对故障树的定性分析通常采用最小割集法,即利用引起发生事件的基本事件链来发现系统的薄弱环节,进而采取改进措施,提高系统的可靠性。设故障树中有 n 个基本事件 x_1, x_2, \dots, x_n , 而 C 为由其中某些基本事件组成的集合, $C = \{x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}, \dots, x_{i_e}\}$, $1 \leq i_k \leq n$, $k = 1, 2, \dots, e$ 。当 C 中基本事件都发生时,顶事件必发生,此时则称 C 为故障树的一个割集。若 C 中去掉任意一个基本事件后就不再是割集时,则称此时的 C 为最小割集。最小割集的求解方法有上行法 (Semanderes 算法) 下行法 (Fussell-Vesely 算法) 和质数法。

若已求得故障树的所有最小割集 C_1, C_2, \dots, C_m , 并且已知基本事件 x_1, x_2, \dots, x_n 发生的概率, 则顶事件发生的概率为

$$P(T) = P\left(\bigcup_{i=1}^m C_i\right) \quad (3)$$

$$\text{若 } C_i \text{ 两两相斥, 则 } P(T) = \sum_{i=1}^m P(C_i) \quad (4)$$

否则

$$\begin{aligned} P(T) &= \sum_{i=1}^m P(C_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq m} P(C_i C_j) + \\ &\sum_{1 \leq i < j < k \leq m} P(C_i C_j C_k) - \dots + (-1)^{m-1} P(C_1 C_2 \dots C_m) \end{aligned} \quad (5)$$

系统可靠度 $R_s = 1 - P(T)$ 。此即为故障数的定量分析。

4 变电站通信网络失效模型及其分析

4.1 概念

失效模型及其分析就是分析变电站通信网络的构成和可能引起网络功能失效的各种组成部分,并分析每一部分的失效率和各部分间的相互关系。当已知各部分的失效率-时,利用故障树分析法可以

很容易得到系统的总失效度：用或逻辑（OR）将一部分的失效会导致上一级失效的所有部分的失效度加起来，用与逻辑（AND）将只有所有部分都失效才会导致上一级失效的所有部分的失效度乘起来，根据这样的原则从底部向上依次构造故障树，得到系统的总失效度或“顶事件”。

4.2 通信系统模型

目前的变电站通信网络通常包括集线器（hubs）、交换机（switches）、路由器（routers）、IED 网络接口设备（IED Network Interfaces）和服务器（servers）等硬件设备。根据设备厂商提供的数据和假定 MTTR 为 48 h，按照前面可靠性基本理论的计算可以得到如表 1 所示的各设备的失效度 q 。

表 1 变电站通信网络设备的失效度 q
Tab. 1 The unavailability of network devices in substation communication system

设备名称	集线器	交换机	路由器	服务器	IED 接口设备	微机保护装置
MTBF /a	118.9	131.5	9.5	14.3	19.2	99.6
q	46×10^{-6}	42×10^{-6}	577×10^{-6}	385×10^{-6}	285×10^{-6}	55×10^{-6}

备有上述数据后，就可以建造故障树。以一变电站为例，站内有 30 套主保护装置和 30 套后备保护装置负责站内线路、开关和变压器等的监控，有 60 套 IED 设备负责电压、电流和功率等电量和非电量信息的传送。在底层，每 6 组保护装置和 6 组 IED 设备共享一个交换机，5 个交换机以星型方式连接到路由器，并与服务器和广域网（WAN）交换信息。系统连接框图如图 1 所示。

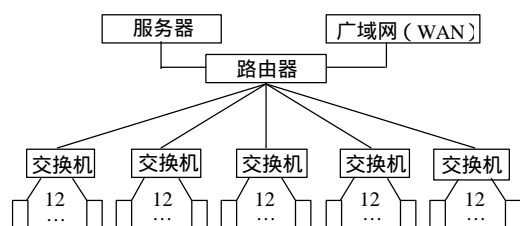


图 1 星型连接的网络结构图

Fig. 1 Star topology network block diagram

图 1 中每个交换机下的 12 个设备是 6 套保护装置接口和 6 套 IED 设备接口。保护设备引起的故障因素有微机保护装置失效、保护装置接口（也是 IED 设备接口）失效。而系统的失效因素有保护设备故障、交换机故障、IED 设备接口故障、路由器故障和服务器故障。据此可以建立如图 2 所示的故障树，其中顶事件定义为变电站通信系统故障。

利用该故障树建立通信网络的失效模型后，就可以进行最小割集的定义分析和定量分析。

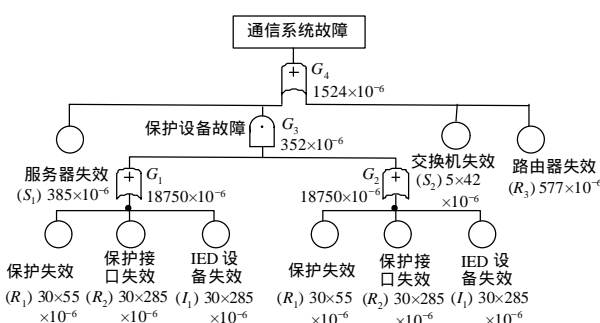


图 2 星型连接通信系统的故障树

Fig. 2 Star topology communication system fault tree

4.3 最小割集定性分析

本文采用上行法进行分析，即从最末一级起，将该级中各事件用基本事件表示，继而将上一级中的事件用最末一级中的事件和本级中有关的基本事件表示，如此向上运算，直到最上一级。每进行一步，必须用事件间的逻辑运算规则进行运算并简化。这样可以得到全部的最小割集。顶事件用 T 表示。按照该原则，便可得到由下至上的最末一级、上一级、最上一级和顶事件的表达式：

$$G_1 = R_1 + R_2 + I_1 ; G_2 = R_1 + R_2 + I_1 \quad (6)$$

$$G_3 = G_1 \cdot G_2 = R_1 + R_2 + I_1 \quad (7)$$

$$G_4 = S_1 + G_3 + S_2 + R_3 = R_1 + R_2 + R_3 + S_1 + S_2 + I_1 \quad (8)$$

$$T = G_4 = R_1 + R_2 + R_3 + S_1 + S_2 + I_1 \quad (9)$$

由此可得该系统的最小割集为 $\{R_1\}$ ， $\{R_2\}$ ， $\{R_3\}$ ， $\{S_1\}$ ， $\{S_2\}$ ， $\{I_1\}$ ，并可发现割集 $\{R_3\}$ （即路由器失效）的影响最大。可见若要提高系统的可靠性，路由器的选择则非常重要。

4.4 不同网络拓扑结构的定量分析

在上述基本事件相互独立的情况下，按照故障树进行逻辑运算就可以得到系统的总失效度。对图 3 所示的星型连接系统进行逻辑运算，可得到 G_4 的输出为 1524×10^{-6} ，此即为系统的总失效度，则有效度为 $1 - 1524 \times 10^{-6} = 99.8476\%$ 。

在变电站通信网络中还有一种常见的连接方式是总线型连接，如图 3 所示。采用级联方式将各集线器连接在一起，每一个集线器下的连接对象也用星型连接。但由于集线器不能解决所谓的广播数据风暴问题（Broadcast Data Storm, BDS），所以网络接口的可靠性必须分为两部分：一部分为影响设备的接口故障，失效率为 274×10^{-6} ；另一部分为 BDS 引起的网络故障，失效率为 11×10^{-6} 。其故障树如图 4 所示。依次计算可得到系统的总失效度为

2.839×10^{-6} , 有效度为 $1 - 2.839 \times 10^{-6} = 99.7161\%$ 。

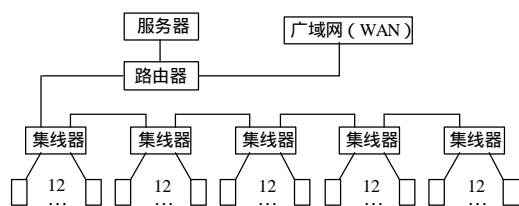


图 3 级联总线型的网络结构图

Fig. 3 Cascaded bus topology network block diagram

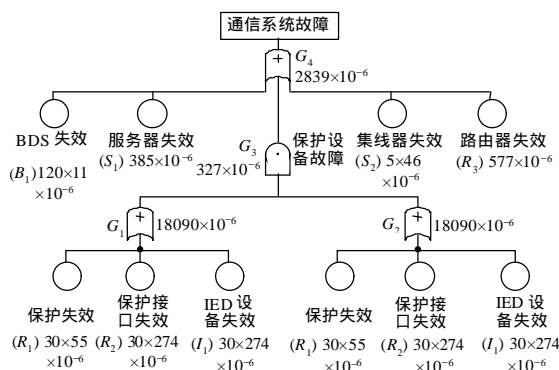


图 4 总线型连接的通信系统故障树

Fig. 4 Bus topology network fault tree

为了提高系统运行可靠度, 经常采用的方法是系统冗余设计, 将图 1 所示的系统全部采用双冗余设计, 则可得到图 5 所示的故障树, 其系统的总失效度为 397×10^{-6} , 有效度为 $1 - 397 \times 10^{-6} = 99.9603\%$ 。

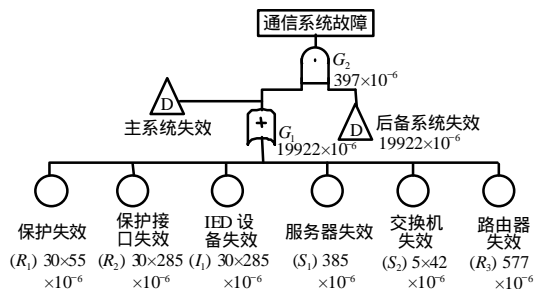


图 5 星型连接的冗余通信系统故障树

Fig. 5 Redundant star topology network fault tree

比较上述 3 种通信网络拓扑结构的系统可靠性可以发现, 星型连接冗余通信系统的可靠性最高, 级联总线型的可靠性最低。当然若要全面评价各方案的性能, 则还须考虑性价比、后期维护以及诊断

的难易性等指标。

5 小结

利用故障树分析法可以很快地找出影响变电站通信系统可靠性的因素, 以便于故障诊断和维护; 通过对不同方案的比较分析, 也有利于新建通信系统的可靠性设计。目前故障树分析法的发展很迅速, 而且还有专用软件可供设计分析。利用好故障树分析法, 对提高变电站通信系统可靠性设计水平将起到积极作用。

参考文献

- [1] 陈升 (Chen Sheng). 网络化变电站自动化系统的应用 (Application of computer network based substation automation system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 26(10): 59-63.
- [2] 丁明, 刘友翔, 戴仁昶, 等 (Ding Ming, Liu Youxiang, Dai Renchang et al). 输电系统的分层可靠性建模及概率模拟 (Hierarchical transmission system reliability modeling and probabilistic simulation) [J]. 清华大学学报 (自然科学版) (增刊) (Journal of Tsinghua University (Sci.&Tech.)), 1997, 37(S1): 99-103.
- [3] 洪梅, 丁明, 戴仁昶 (Hong Mei, Ding Ming, Dai Renchang). 保护系统的概率模型及其对组合系统可靠性的影响 (The probabilistic modeling of protection system and its effect on composite system reliability) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1997, 21(8): 45-48.
- [4] 刘开培, 李俊娥 (Liu Kaipei, Li Jun'e). 配电网自动化系统的可靠性模型与分析 (Reliability model and analysis of distribution grid automatic system) [J]. 电工技术 (Electric Engineering), 2002, (4): 13-14.
- [5] 甘正宁, 甘正佳 (Gan Zhengning, Gan Zhengjia). 电力系统环形网络的供电可靠性研究 (A study on power supply reliability of power system loop network) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the EPSA), 2002, 14(2): 49-50.
- [6] 唐月英, 樊鑫瑞. 仪表可靠性基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.

收稿日期: 2002-07-30.

作者简介:

韩小涛 (1974-), 男, 湖北广水人, 博士研究生, 研究方向为智能传感器及其在电力系统中的应用。

(编辑 查仁柏)