

故障树分析在电力系统可靠性研究中的应用

张蔼蔷

(安徽省电力设计院,安徽 合肥 230022)

摘要:对于设计人员来说,如何在方案论证阶段就直观、清晰地了解到各种方案中电力系统的可靠性是十分重要的。为解决较复杂的电力系统的安全性和可靠性问题,应把系统的故障与组成系统的部件的故障有机地联系在一起。通过实例分析,介绍了故障树分析的基本概念、建模方式、计算步骤及其在电力系统可靠性研究中的应用。

关键词:电力系统;故障树分析;可靠性

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9529(2005)02-0014-04

Application of fault tree analysis to reliability study of electric power system

ZHANG Ai-qiang

(Anhui Electric Power Design Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: To designers, it is of great importance to clearly know the reliability of the electric power system in various designing plans in the plan demonstration stage. To solve the relatively complicated safety and reliability problems in the electric power system, the fault of the system and the fault of its components should be linked organically. Through example analysis, the basic concept, modeling method, calculating steps of fault tree analysis were introduced, as well as its application to study of electric power system reliability.

Key words: electric power system; fault tree analysis; reliability

目前对电力系统可靠性评估的主要方法是蒙特卡洛模拟法和解析法。蒙特卡洛模拟法属于统计试验方法,较为简单直观,但求解时间随精度要求提高而急剧增加且针对性不强。解析法的物理概念清楚,模型的精度高。但它的计算量随系统规模的增大而呈指数增长。为了解决较为复杂的系统,有必要引入故障树分析法^[1-3]。故障树分析(Fault Tree Analysis,简称 FTA)是较为适用于大型复杂系统(例如应用于核电站、航天、导弹、化工厂等)安全性与可靠性的常用的有效方法,它是以图形的方式表明“系统是怎样失效的”。

笔者针对某双母线输变电工程系统含旁路母线及取消旁母的两种不同方案,使用故障树分析的方法,采用图形有层次地分别描述系统在失效的进程中,各种中间事件的相互关系,比较直观地得到系统的可靠性参数,为系统的选优提供了理论基础。

1 故障树分析法的实例处理步骤

以 500 kV 宣城变电所为例,介绍故障树分析法对电力系统可靠性的研究。本期工程建设 1 组

750 MVA 主变压器,220 kV 远期共 14 回出线,本期 7 回出线。终期建设 3 组 750 MVA 主变压器。对于 220 kV 是否带旁路,根据实际情况进行详细分析论证,提出推荐意见,进行可靠性计算。系统接线方案如图 1 所示。

并由此利用 FTA 分为以下几个阶段处理^[4,5]:

1.1 步骤一

把系统不希望发生的事件(失效状态)作为故障树的顶事件(Top Event),确定系统的分析边界、定义范围和成功与失败的准则。

这里的顶事件为:凤凰 1,莲塘 1,莲塘 2,泾县 2,泾县 1,黄山 2,黄山 1(T_1),宁国 2,宁国 1,凤凰 2,郎溪 1,郎溪 2,宣二 1,宣二 2(T_2)等电力中断。由于前 8 个事件的故障情况和失效概率相同,为简化分析,统一定义为 T_1 事件。同理定义 T_2 事件;

1.2 步骤二

用规定的逻辑符号表面找出导致这一不希望事件所有可能发生的直接因素和原因,它们是处于过渡状态的中间事件。

这里的中间事件有:母线 1A 无电(m_1),母线

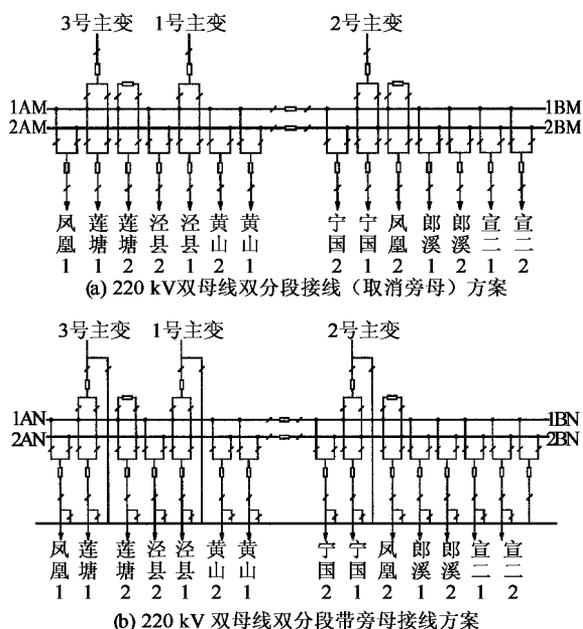


图 1 宣城变 220 kV 主接线示意图

2A 无电 (m_2), 母线 1B 无电 (m_3), 母线 2B 无电 (m_4);

1.3 步骤三

逐步深入分析,直到找出事故的基本原因,即故障树的底事件为止。这些底事件又称为基本事件,它们的数据是已知的,或者已经有过统计或实验的结果。

这里的底事件为:母线 1A 故障 (x_1), 母线 2A 故障 (x_2), 母线 1B 故障 (x_3), 母线 2B 故障 (x_4), 主变 3 故障 (x_5), 断路器主 3 故障 (x_6), 隔离开关主 3 故障 (x_7), 隔离开关主 3 - 1A 故障 (x_8), 隔离开关主 3 - 2A 故障 (x_9), 主变 1 故障 (x_{10}), 断路器主 1 故障 (x_{11}), 隔离开关主 1 故障 (x_{12}), 隔离开关主 1 - 1A 故障 (x_{13}), 隔离开关主 1 - 2A 故障 (x_{14}), 主变 2 故障 (x_{15}), 断路器主 2 故障 (x_{16}), 隔离开关主 2 故障 (x_{17}), 隔离开关主 2 - 1B 故障 (x_{18}), 隔离开关主 2 - 2B 故障 (x_{19}), 分段 1 断路器故障 (x_{20}), 分段 1A 隔离开关故障 (x_{21}), 分段 1B 隔离开关故障 (x_{22}), 分段 2 断路器故障 (x_{23}), 分段 2A 隔离开关故障 (x_{24}), 分段 2B 隔离开关故障 (x_{25}), 分断路器故障 (x_{26}), 分隔离开关故障 (x_{27}), 隔离开关 1A 故障 (x_{28}), 隔离开关 2A 故障 (x_{29}), 母联 A 断路器故障 (x_{30}), 母联 A 隔离开关故障 (x_{31}), 隔离开关 1B 故障 (x_{32}), 隔离开关 2B 故障 (x_{33}), 母联 B 断路器故障 (x_{34}), 母联 B 隔离开关故障 (x_{35})

1.4 步骤四

建造故障树,这是 FTA 的核心部分之一,通过对已收集的技术资料,建造故障树;

1.5 步骤五

对故障树进行简化或者模块化,为了简化结构,图 2 将主要中间事件模块化为中间事件故障树,并将其应用在图 3 顶事件故障树中;

1.6 步骤六

定性分析,求出故障树的全部最小割集,当割集的数量太多时,可以通过程序进行概率截断或割集阶截断;

根据中间事件故障树可得到 (式中运算符号中代表逻辑运算符,而不同于普通运算符);

$$m_1 = x_1 + (x_5 + x_6 + x_7 + x_8) (x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13}) (x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} + x_{20} + x_{21} + x_{22});$$

$$m_2 = x_2 + (x_5 + x_6 + x_7 + x_9) (x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{14}) (x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{19} + x_{23} + x_{24} + x_{25});$$

$$m_3 = x_3 + (x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18}) (x_{20} + x_{21} + x_{22} + (x_5 + x_6 + x_7 + x_8) (x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13}));$$

$$m_4 = x_4 + (x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{19}) (x_{23} + x_{24} + x_{25} + (x_5 + x_6 + x_7 + x_9) (x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{14})).$$

而根据顶事件故障树可得到:

$$T_1 = x_{26} + x_{27} + x_{28} x_{29} + m_1 m_2 + x_{28} m_2 (x_{30} + x_{31}) + x_{29} m_1 (x_{30} + x_{31});$$

$$T_2 = x_{26} + x_{27} + x_{32} x_{33} + m_3 m_4 + x_{32} m_4 (x_{34} + x_{35}) + x_{33} m_3 (x_{34} + x_{35}).$$

这里由于此顶事件割集数量较多,需要使用计算机和相应软件进行概率截断。

1.7 步骤七

定量分析,需要计算顶事件发生概率即系统的点无效度和区间无效度,此外还可进行重要度等进一步分析。

1.7.1 故障率计算

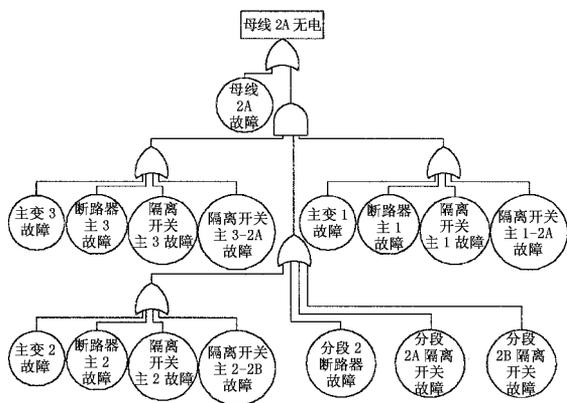
故障率 = 发生故障的次数 / 台 · a

已知数据有:综合故障率 ($FR = 0.77826$ 次/a)、及各元件故障率,其中断路器 (0.03208),隔离开关 (0.00158),母线 (0.00284)。

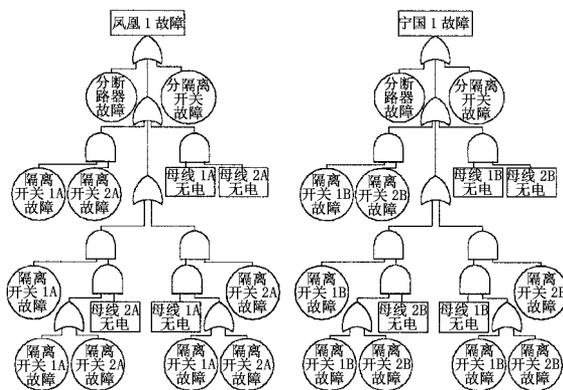
如果对于底事件 x_1, x_2, \dots, x_n 发生的概率为 q_1, q_2, \dots, q_n 。则

$$(1) n \text{ 个独立事件: } q(x_1 x_2 \dots x_n) = q_1 q_2 \dots q_n, \text{ 而 } q(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2) \dots (1 - q_n)$$

$$(2) n \text{ 个相斥事件: } q(x_1 x_2 \dots x_n) = 0, \text{ 而 } q$$



(a) m_1 事件



(a) T_1 事件

(b) T_2 事件

图 3 顶事件故障树

$$(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

$$(3) n \text{ 个相容事件: } q(x_1 x_2 \dots x_n) = q(x_1) q(x_2 | x_1) q(x_3 | x_1 x_2) \dots q(x_n | x_1 x_2 \dots x_{n-1})$$

$$\text{而 } q(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \sum_{i=1}^n q_i - \sum_{i < j=2}^n q(x_i x_j) + \dots + (-1)^{n-1} q(x_1 x_2 \dots x_n)$$

$$\sum_{i < j < k=3}^n q(x_i x_j x_k) + \dots + (-1)^{n-1} q(x_1 x_2 \dots x_n)$$

因为各元件故障均为独立小概率事件,符合第一种情况。此外,当 $q < 0.01$ 时,各事件可以基本上看成相对独立事件。

按照故障率计算规则,将各元件的故障概率代入计算得到:中间事件故障率: $q_{n1} = 0.0029$, $q_{n2} = 0.0029$, $q_{n3} = 0.0039$, $q_{n4} = 0.0039$ 和顶事件故障率: $q_{T1} = 0.0336$, $q_{T2} = 0.0336$ 。

1.7.2 停运概率计算

停运概率 = (非计划停运时间 + 计划停运时间) / 8760 h

各元件停运概率(停运系数): 断路器 (0.00472), 隔离开关 (0.00126), 母线 (0.00068)。

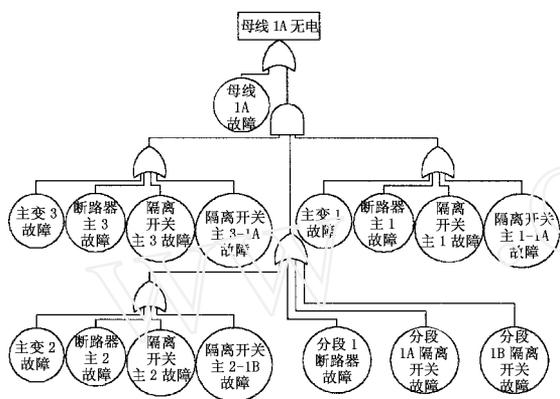
计算得到中间事件停运概率: $q_{m1} = 0.00003$, $q_{m2} = 0.00003$, $q_{m3} = 0.000030022$, $q_{m4} = 0.000030022$, 和顶事件停运概率: $q_{T1} = 0.00018$, $q_{T2} = 0.00018$ 。

非计划停运时间 = 非计划停运概率 × 总时间 = $0.00018 \times 8760 = 1.5768$ (h/a)

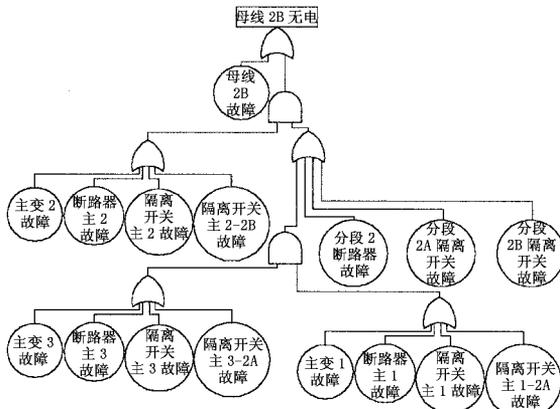
计划停运时间 = 停运时间 - 非计划停运时间 = $52.56 - 1.5768 = 50.9832$ (h/a)

在上述故障树基础上,双母线双分段带旁母接线另需补充绘制故障树如图 4。

已知综合故障率 $FR = 0.84194$ 次/a



(c) m_3 事件



(d) m_4 事件

图 2 中间事件故障树

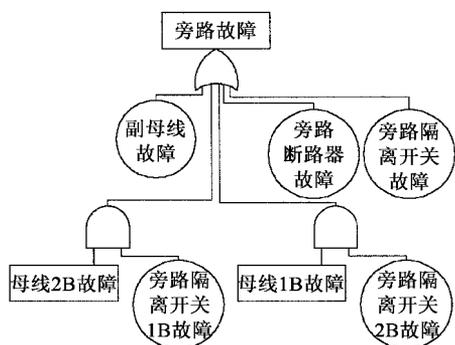


图4 旁路母线故障树

底事件: 副母线故障 (x_{36}), 母线 1B 故障 (x_3), 母线 2B 故障 (x_4), 旁路断路器故障 (x_{37}), 旁路隔离开关故障 (x_{38}), 旁路隔离开关 1B 故障 (x_{39}), 旁路隔离开关 2B 故障 (x_{40})

顶事件: T_3 为旁路故障

$$T_3 = x_{36} + x_{39} x_4 + x_{40} x_3 + x_{37} + x_{38}$$

按照逻辑运算规则, 代入各元件的故障、停运和非计划停运概率计算得到:

$q_{r3} = 0.0364$, $q_{r13} = 0.0066$, $q_{r13} = 0.00018999$
 如果设原电网可以正常工作工作的概率为 $P(A) = 1 - q_{r1} = 1 - q_{r2}$, 使用备用网路正常工作的概率为 $P(B)$ 。则 $q_{r3} = 1 - P(B|\bar{A})$ 。则有了备用旁路后, $q_{r4} = q_{r1} q_{r3} = 0.00122304$

通过计算期望值的方法计算停运时间: (设定非计划停运后, 启用旁路需要 0.8 h)。

非计划停运时间 = $0.8 \times 0.0336 + (1.5768 / 0.0336) q_{r4} = 0.08427552$ h/a

停运时间 = $0.8 \times 0.0336 + (1.5768 / 0.0336) q_{r4} + (50.9832) q_{r3} = 1.94$ h/a

计划停运时间 = 停运时间 - 非计划停运时间 = $1.94 - 0.0843 = 1.8557$ h/a

2 结果分析

将计算结果列入表 1。

表 1 可靠性计算结果表 h

接线方式	双母线双分段接线	双母线双分段带旁母接线
年平均停运时间 ¹⁾	52.56	1.94
年非计划停运时间	1.5768	0.0843
年计划停运时间	50.9832	1.8557
综合故障率/次·a ⁻¹	0.77826	0.84194

注: 1) 停运时间是针对各线路出线回路的可靠性指标; 综合故障率是针对整个主接线系统的可靠性指标。

就整个 220 kV 主接线系统来说, 取消旁路母线后, 系统的综合故障率比带旁母主接线的综合

故障率略低一些。就单回主变回路或出线回路来说, 使用旁路母线是可以在一定程度上提高供电可靠性的, 但其实际效果主要体现在计划检修时段 (原因是目前计划检修的时间长, 依全国统计数据, 每回出线回路年平均检修 51.02 h), 而对于由故障造成的非计划停运时间, 两种主接线的差别并不大。线路回路的非计划停运时间为 1.5768 h (无旁母) 和 0.0843 h (有旁母)。

综上所述, 取消旁路母线后, 就实际运行方式和检修情况来说, 供电可靠性指标并没有明显降低, 出线回路的非计划停运时间较有旁母时略高, 220 kV 主接线综合故障率较有旁母时略低, 设备维护工作量降低了, 通过比较投资和非计划停运造成的停电损失, 取消旁母经济上更为有利。

3 结语

将故障树分析法应用于电力系统可靠性分析具有一些较显著的优点, 它是一种使用图形演绎逻辑推理方法, 清晰地用图说明了系统的失效原因, 把系统的故障与组成系统的部件的故障有机地联系在一起, 可以找出系统全部可能的失效状态, 也就是故障树的全部最小割集, 或者称它们是系统的故障谱。故障树本身也是一种形象化的技术资料, 当它建成以后, 对不曾参与系统设计的管理、运行人员也是一种直观的教学和维修指南。

在分析复杂系统时, 由于逻辑关系复杂, 故障树分析法的计算量较大, 因此它离不开计算机化和软件化。随着目前软件工业的迅速发展, 故障树分析法从定性、定量以及图形化、微机化等方面将会取得进一步发展, 它将会在电力系统可靠性分析中发挥越来越大的作用。

参考文献:

- [1] 郭永基. 电力系统及电力设备的可靠性 [J]. 电力系统自动化, 2001, 9(10).
- [2] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 电力系统可靠性评估的混合法研究 [J]. 中国电力, 2001(3).
- [3] 宋云亭, 郭永基, 程林. 电力系统可靠性基本数据的统计分析 [J]. 继电器, 2002, 7(15).
- [4] 黄祥瑞. 可靠性工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [5] 高社生, 张玲霞. 可靠性理论与工程应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

收稿日期: 2004-11-02

作者简介: 张蔼菴 (1976-), 女, 工程师, 设计师, 从事电力系统及其自动化设计工作。