

# 基于 FTA 法的宁夏电网运行元件故障率分析

杨洋, 谢开贵, 孙鑫

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 元件的故障率研究是电力系统可靠性分析中的一个重要环节。综合考虑影响故障率的三个因素, 建立了元件故障率的故障树模型。并用下行法求出了该故障树的最小割集, 给出了计算方法。通过对 2006 年宁夏电网下属银川供电局和石嘴山供电局的输变电设施的停运统计, 运用故障树法对变压器、架空线和断路器三类主要输变电设施进行了故障率计算与分析, 提出了影响宁夏电网故障率高低的因素, 为降低输变电设施的故障率提供有益的依据。

**关键词:** 运行可靠性; 元件; 故障率; 故障树; 最小割集

## Operating component failure rate analysis based on FTA for power system

YANG Yang, XIE Kai-gui, SUN Xin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Failure rate analysis of components is an important aspect of reliability of power system. By taking into account three aspects of failure rate, fault tree model of components' failure rate is established. Minimum cut set and solution of the fault tree are presented in the paper. By gathering outage data of Yinchuan and Shizuishan power supply bureau of Ningxia power system in 2006, the failure rate of transformer, overhead line and breaker, which are the three main power transmission facilities, is effectively calculated and analyzed by fault tree. The paper puts forward the factors of failure rate of Ningxia power system, which provides a useful basis for reducing failure rate of power transmission facilities.

**Key words:** operating reliability; component; failure rate; fault tree; minimum cut set

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0134-04

## 0 引言

现代电力系统规模的扩大、复杂程度的提高与电力市场的发展, 尤其是近年来国内外大停电事故频繁发生, 使得电力系统安全可靠运行问题日益突出并得到广泛关注。运行可靠性评估是一种短期评估, 其元件停运模型必须要反映当时的运行条件和工况。电力系统元件所处的外部环境和自身工况是随时间改变而不断变化的, 因此必须建立一个适当的数学模型来描述元件的状态。

文献[1]建立了基于实时运行条件的元件可靠性模型, 该模型考虑了机组的运行方式、负荷的实时变化、网络结构的变化等运行条件对元件的影响。在文献[1]的基础上文献[2]提出了元件实时可靠性模型的建模原则, 并给出了线路的双曲函数模型。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2004CB217908)

文献[3]分析导致元件停运的因素, 提出了在此基础之上的元件停运模型。但是文献[1~3]均未涉及自然环境气候状况等因素对元件故障率的影响。文献[4]在变压器运行容量分析中考虑了负荷与外界温度有关的不确定性。文献[5]提出了考虑天气因素的架空线路可靠性评估的状态空间马尔科夫模型和计算方法, 但建立的模型过于简单, 对模型的物理本质研究的不够深入。

针对以上原因本文将故障树分析法<sup>[6]</sup>(Fault Tree Analysis)引入到电力系统元件的故障率分析当中, 深入分析各种自然状况及偶然事件对元件故障率的影响, 建立元件故障率的故障树模型并给出计算方法。

故障树分析法是分析一个系统各种故障问题逻辑关系的有力工具, 它是一种倒立树状的逻辑因果关系图, 由各种事件符号、逻辑门符号、其他一些符号以及一些线条组成, 描述了系统中各种事件

之间的因果关系。

## 1 算法

### 1.1 元件故障率的影响因素

影响元件故障率的因素很多,需要在元件的故障树模型中加以考虑,而有关信息能否获取以及进行量化则是必要条件。本文大致把各种影响因素分为三大类:元件自身故障;外界环境引起的故障和误动导致的停运。外界环境影响包括气候因素、动物因素和偶然事故三个方面。误动包括人为误操作和元件保护误动。

### 1.2 故障树分析法

在复杂系统可靠性分析中,普遍采用的方法是故障树。故障树是这样一种图示方法,它把系统的故障与组成系统的子系统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。故障树是反映系统故障间因果关系的工具模型,从系统最不希望发生的故障顶事件出发,逐步分析其发生原因,获得中间原因(中间事件)和无需再分的基本原因(底事件),再利用符号逻辑门将事件间的逻辑关系表达为倒树形结构。

### 1.3 元件故障率的故障树模型

下面根据目前电力元件运行的实际故障情况,建立元件故障率的故障树。

第一步:一般把系统最不希望发生的故障作为顶事件,顶事件的发生表明元件确实不能正常工作,失去了规定的功能。且顶事件必须是可以进一步进行分解的,可以找出引起它发生的直接或间接原因。本文把电力系统元件失效作为故障树的顶事件,满足上述要求。

第二步:用规定的逻辑符号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,将顶事件作为输出事件,把导致顶事件发生的各种事件作为输入事件即中间事件。这里的中间事件为元件自身故障( $A$ ),外界环境影响( $B$ ),误动( $C$ )。

对这三个中间事件做进一步分析找出他们的下一层输入事件,文中对于外界环境影响( $B$ )这一输出事件,它的输入事件即下一层中间事件为自然因素( $B_1$ ),动物因素( $B_2$ ),偶然事故( $B_3$ )。

第三步: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。

这里的基本事件为:元件自身故障( $A$ );雷击

( $B_{11}$ ),雨雪( $B_{12}$ ),山林火灾( $B_{13}$ ),风沙( $B_{14}$ ),洪水( $B_{15}$ ),地震( $B_{16}$ ),鸟害( $B_{21}$ ),兽害( $B_{22}$ ),树害( $B_{31}$ ),其他( $B_{32}$ );人为误操作( $C_1$ ),元件保护误动作( $C_2$ )。

第四步:建造故障树,这是核心部分之一。通过对收集的技术资料,建造故障树,上述3个中间事件与顶事件之间是逻辑“或”关系,基本事件与导出它们的中间事件之间同样是逻辑“或”关系,如基本事件“ $C_1, C_2$ ”与中间事件“误动”之间是逻辑“或”关系。将这一系列事件列成逻辑图,即形成元件故障树,如图1所示。

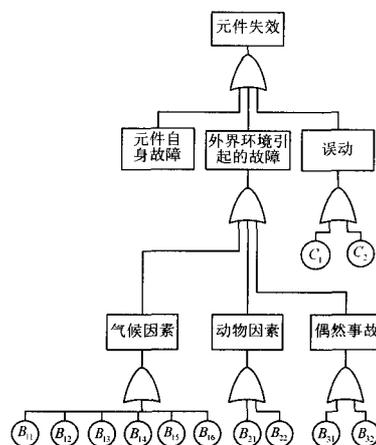


图1 元件故障率的故障树

Fig.1 Fault tree of component's failure rate

基于故障树分析法的元件自身故障的研究已有许多参考文献<sup>[7]</sup>。他们以元件失效为顶事件,中间事件则为元件内部零件的失效问题。由于本文主要研究外界环境对电力元件的影响,故对元件自身故障不再赘述。

### 1.4 故障树模型的求解

结构函数和最小割集是故障树分析时的两个重要概念,前者表达事件间的逻辑关系,后者表征导致顶事件发生的最少和最必要的底事件的组合。最小割集中的所有底事件都发生时该最小割集才发生,而任一最小割集的发生都会导致顶事件的发生。

采用下行法(Fussell法)求解系统的最小割集。下行法的步骤为:从顶事件T开始,依次用下一级的事件置換上一级事件,如果上一级被置換的是逻辑与门,则将其下一级的置換事件横向并列于表中;如果上一级被置換的是逻辑或门,则将其下一级的置換事件纵向列于表中,直到全部逻辑门都被置換成不可再分割的基本事件为止。最后可得到割集,但并非最小割集,需应用布尔代数公式找出最小割

集。下行法求解最小割集的过程如表1所示。

表1 下行法求解故障树最小割集过程

Tab.1 Process of acquiring minimum cut set with the method of Fussell

步骤 1	步骤 2	步骤 3	步骤 4
A			A
B	B <sub>1</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>11</sub>
		B <sub>12</sub>	B <sub>12</sub>
		B <sub>13</sub>	B <sub>13</sub>
		B <sub>14</sub>	B <sub>14</sub>
		B <sub>15</sub>	B <sub>15</sub>
		B <sub>16</sub>	B <sub>16</sub>
	B <sub>2</sub>	B <sub>21</sub>	B <sub>21</sub>
		B <sub>22</sub>	B <sub>22</sub>
	B <sub>3</sub>	B <sub>31</sub>	B <sub>31</sub>
B <sub>32</sub>		B <sub>32</sub>	
C	C <sub>1</sub>		C <sub>1</sub>
	C <sub>2</sub>		C <sub>2</sub>

故图 1 所示故障树的最小割集为:

$$D = \{A, B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}, B_{15}, B_{16}, B_{21}, B_{22}, B_{31}, B_{32}, C_1, C_2\}$$

共计 13 个, 均为一阶最小割集。

本文假定元件故障由  $k$  个基本  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  组成, 各基本事件的故障率为  $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_k)$ 。元件故障树的所有最小割集已求出为  $D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_n$ , 则元件的故障率为:

$$P(T) = P(\bigcup_{i=1}^n D_i), \quad i = (1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

根据概率加法定理:

$$P(T) = P(\bigcup_{i=1}^n D_i) = \sum_{i=1}^n P(D_i) - \sum_{i < j=2}^n P(D_i \cap D_j) + \dots + (-1)^{n-1} P(D_1 \cap D_2 \dots \cap D_n) \quad (2)$$

式中:  $P(T)$  为元件故障总故障率;  $D_i$  为第  $i$  个故障树最小割集;  $n$  为故障树最小割集的总数。由式 (2) 知, 当最小割集数较多时,  $P(T)$  的项数往往较多, 计算较复杂, 因而在工程上计算时通常只采用前  $n$  项之和作为  $P(T)$  的近似结果, 此结果通常称为故障率上界, 并记作  $P(T)_{sup}$ 。而实际系统的  $P(T)$  小于上界值, 当元件故障率较小时, 上界值与准确值相差甚小, 故本文采用上界值计算, 即:

$$P(T) \approx P(T)_{sup} = \sum_{i=1}^n P(D_i) \quad (3)$$

由式 (3) 可得图 1 所示元件故障树的故障率:

$$\lambda(T) = \sum_{i=1}^k \lambda(D_i) \quad (4)$$

## 2 宁夏电网运行元件故障率分析

以宁夏电力公司下属银川供电局和石嘴山供电局 2006 年电力元件运行数据为例进行故障树的计算。

宁夏省跨东部季风区域和西北干旱区域, 西南靠近青藏高原高寒地带, 属于温带大陆性干旱气候。气候干燥, 气温日夜温差较大, 光线充足, 太阳辐射强。主要的气象灾害有干旱, 大风沙尘暴, 暴雨, 冰雹, 霜冻和干热风等。

### 2.1 变压器

表 2 2006 年银川供电局与石嘴山供电局变压器运行故障原始数据

Tab.2 Original data of transformer fault in 2006 Yinchuan power supply bureau and Shizuishan power supply bureau

	银川供电局		石嘴山供电局	
	停运次数	分故障率	停运次数	分故障率
A	3	3.952	3	3.890
B <sub>11</sub>				
B <sub>12</sub>			1	1.297
B <sub>13</sub>				
B <sub>14</sub>				
B <sub>15</sub>				
B <sub>16</sub>				
B <sub>21</sub>				
B <sub>22</sub>				
B <sub>31</sub>				
B <sub>32</sub>				
C <sub>1</sub>	1	1.317		
C <sub>2</sub>				

由式 (4) 可得 2006 年银川供电局变压器总故障率为 5.269 次/百台年, 石嘴山供电局变压器总故障率为 5.187 次/百台年。

从表 2 可以看出变压器故障的最主要因素还是在于元件自身质量的好坏, 气候对变压器故障率的影响因地区天气的不同而影响或大或小, 人为误操作等因素可以在提高操作人员素质与经验积累的情况下得以消除。

### 2.2 架空线

由式 (4) 可得 2006 年银川供电局架空线总故障率为 0.273 次/百公里年, 石嘴山供电局架空线总故障率为 0.253 次/百公里年。

从表 3 可以得知, 因地区的不同各种因素对架空线的影响也不同。且架空线的制造工艺不如变压器、断路器等电力元件复杂, 质量好坏较为稳定, 所以对其故障率影响较小。对银川地区来说, 鸟害对其架空线故障率的大小影响最大, 所造成的停运次数达 7 次, 所以应加强鸟害的防治。其次其他情况 (包括外力损坏、运输碰撞等一些偶然因素) 对架空线故障率的大小影响也较大, 再次就是风沙对其的影响, 2006 年银川地区架空线故障损害就由这

三部分组成。石嘴山地区因气候地貌的不同其架空线故障因素的组成也不同。雷击、雨雪、山林火灾、风沙、鸟害等对其均有影响,且影响较为平均。其他情况对石嘴山地区架空线故障率的大小影响较大,比银川地区的统计数据略高。所以对架空线来说减少其他一些偶然事故的发生对于降低架空线的故障率有着巨大的影响。

表 3 2006 年银川供电局与石嘴山供电局架空线运行故障原始数据

Tab.3 Original data of overhead line fault in 2006 Yinchuan power supply bureau and Shizuishan power supply bureau

	银川供电局		石嘴山供电局	
	停运次数	分故障率	停运次数	分故障率
A				
B <sub>11</sub>			1	0.023
B <sub>12</sub>			2	0.046
B <sub>13</sub>			1	0.023
B <sub>14</sub>	2	0.042	1	0.023
B <sub>15</sub>				
B <sub>16</sub>				
B <sub>21</sub>	7	0.147	1	0.023
B <sub>22</sub>				
B <sub>31</sub>				
B <sub>32</sub>	4	0.084	4	0.092
C <sub>1</sub>			1	0.023
C <sub>2</sub>				

2.3 断路器

表 4 2006 年银川供电局与石嘴山供电局断路器运行故障原始数据

Tab.4 Original data of breaker fault in 2006 Yinchuan power supply bureau and Shizuishan power supply bureau

	银川供电局		石嘴山供电局	
	停运次数	分故障率	停运次数	分故障率
A	9	3.696	4	0.894
B <sub>11</sub>				
B <sub>12</sub>	1	0.411		
B <sub>13</sub>				
B <sub>14</sub>	1	0.411		
B <sub>15</sub>				
B <sub>16</sub>				
B <sub>21</sub>				
B <sub>22</sub>				
B <sub>31</sub>				
B <sub>32</sub>			5	1.117
C <sub>1</sub>	1	0.411	1	0.223
C <sub>2</sub>			1	0.223

由式(4)可得 2006 年银川供电局断路器总故障率为 4.929 次/百台年,石嘴山供电局断路器总故

障率为 2.457 次/百台年。

从表 4 中可知,银川供电局断路器元件自身故障次数较多,对元件的故障率大小影响较大。在自然情况方面,雨雪、风沙各造成了一次停运,人员的误操作也造成了一次停运。石嘴山供电局断路器自身故障造成的停运占有不小比例,但对其故障率大小影响最大的因素仍是其他情况,所造成的停运次数达到了 5 次。而误动方面人为误操作与元件保护误动各占一次。由此可见提高断路器的质量水平对其故障率的降低有着重要意义。

3 结论

找出了导致元件故障的各个相互独立的因素并进行了分类,把故障树分析法引入了电力系统运行可靠性元件故障率的研究之中,建立了元件的故障树,找出了最小割集,并给出了计算方法。通过对宁夏省两供电局的实例分析,证明了该方法的有效性和可行性。该方法在基于大量统计数据之上能直观地让人找出对元件故障率产生影响的各个因素;同时该故障树可根据各地区计算需求的不同进行扩展,进而在更大范围内找出当地电力系统元件的薄弱环节;且计算简单、快速,因此该方法具有一定的实用性。

参考文献

[1] 孙元章,程林,刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12.  
 SUN Yuan-zhang, CHENG Lin, LIU Hai-tao. Power System Operational Reliability Evaluation based on Real-time Operating State[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12.

[2] 程林,何剑,孙元章. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术,2006,30(13): 8-13.  
 CHENG Lin, HE Jian, SUN Yuan-zhang. Impact Analysis of Model and Parameters of Transmission Lines upon Power System Operational Reliability Evaluation[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 8-13.

[3] 刘海涛,程林,孙元章,等. 基于实时运行条件的元件停运因素分析与停运率建模[J]. 电力系统自动化, 2007, 30(7): 6-11.  
 LIU Hai-tao, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Outage Factors Analysis and Outage Rate Model of Components based on Operating Conditions[J]. Automation of Electric Power Systems,2007, 30(7): 6-11.

```
<LogControl name="Log" datSet="Positions" logName="C1">
  <TrgOps dchg="true" qchg="true"/>
</LogControl>
```

3) 对一个 LCB 数据分配足够空间, 并填充其属性;

4) 把这个 LCB 添加到所属 LN 的 LCB 循环双链表首位。

#### 4 结束语

本文通过对 IEC61850 标准中的报告控制块和日志控制块进行简单介绍、图例说明, 阐述了报告控制块和日志控制块的作用、特点以及使用过程。

目前国内已经建造了一些实行 IEC61850 标准的数字化变电站, 并投入了运行。但相对于传统变电站, 它们的数量有限、规模较小。随着数字化变电站不断增多、增大, 可能在变电站的信息交换上陆续遇到一些问题。研究基于 IEC61850 的报告控制块和日志控制块, 对于了解 IEC61850 标准和当前变电站自动化技术的发展趋势, 研发符合 IEC61850 的变电站自动化系统具有一定参考意义。

#### 参考文献

- [1] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC61850 介绍[J]. 电网技术, 2001, 25 (9): 8-11.
- TAN Wen-shu. An Introduction to Substation Communication Network and System-IEC 61850[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 8-11.
- [2] IEC61850-7-4.Communication Networks and Systems in
- (上接第 137 页 continued from page 137)
- [4] FU Wei-hui, Mccalleyjd, Vittal V. Risk Assessment for Transformer Loading[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 346-353.
- [5] 郭晓敏, 韩富春, 简靖森, 等. 基于状态空间法的架空输电线路的可靠性评估[J]. 电气技术, 2006, (7): 39-41.
- GUO Xiao-min, HAN Fu-chun, JIAN Jing-sen, et al. Reliability Evaluation of Overhead Power Transmission Line based on State-space Techniques[J]. Electric Technology, 2006, (7): 39-41.
- [6] 朱继洲. 故障树原理和应用[M]. 西安西安交通大学出版社, 1989.
- ZHU Ji-zhou. Fault Tree Theory and Application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989.
- [7] 杨国旺, 王均华, 杨淑英. 故障树分析法在大型电力

Substations Part 7-4: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment-Compatible Logical Nodes Classes and Data Classes[S].

- [3] IEC61850-7-1.Communication Networks and Systems in Substations Part 7-1: Basic Communication Structure for Sbstation and Feeder Equipment - Principles and Models[S].
- [4] 中华人民共和国电力行业标准 DL/T860. 71: 变电站通信网络和系统第 7-1 部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构原理和模型[S].
- [5] Kostic Tatjana, Frei Christian. Modelling and Using IEC61850-7-2 (ACSI) as an API[Z]. ABB.
- [6] 韩明峰, 郑永志, 唐永建, 等. IEC61850 日志服务的实现策略[J]. 电力系统自动化, 2007(18).
- HAN Ming-feng, ZHENG Yong-zhi, TANG Yong-jian, et al. Realization Strategy of IEC 61850 Log Services[J], Automation of Electric Power Systems, 2007,30(18):58-60.

收稿日期: 2008-10-10; 修回日期: 2008-11-17

作者简介:

徐永晋(1963-), 男, 副教授, 研究方向为计算机网络, 嵌入式系统;

张乐(1983-), 男, 在读硕士, 研究方向为计算机网络; E-mail:zhangle630@163.com

叶申锐(1980-), 男, 在读硕士, 研究方向为计算机网络。

变压器故障研究中的应用[J]. 电网技术, 2006,30(S): 385-369.

YANG Guo-wang, WANG Jun-hua, YANG Shu-ying. Application of Fault Tree Analysis to Large-scale Power Transformer Fault Study[J]. Power System Technology, 2006,30(S):385-369.

收稿日期: 2008-10-06; 修回日期: 2008-12-01

作者简介:

杨洋(1981-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统规划与可靠性研究; E-mail: youngyoung77@126.com

谢开贵(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 现从事电力系统规划与可靠性、电力系统优化运行及电力市场等方面的研究和教学工作。

孙鑫(1980-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护研究。